



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIA DE MATERIALES SUSTENTABLES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

CONSTRUCCIÓN DE TECNOSUELOS A
PARTIR DE DISTINTOS RESIDUOS Y SU USO
POTENCIAL EN LA RESTAURACIÓN
ECOLÓGICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN CIENCIA DE MATERIALES
SUSTENTABLES

P R E S E N T A

ALDO RIVERA AMBRIZ

DIRECTOR DE TESIS: ROBERTO ANTONIO LINDIG CISNEROS

MORELIA, MICHOACÁN

NOVIEMBRE, 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.



ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

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

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

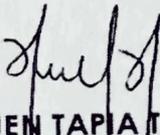
Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 03** del **Comité Académico** de la **Licenciatura en Ciencia de Materiales Sustentables** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **21 de septiembre de 2022**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Aldo Rivera Ambriz** de la Licenciatura en **Ciencia de Materiales Sustentables**, con número de cuenta **313088696**, con el trabajo titulado: **"Construcción de tecnosuelos a partir de distintos residuos y su uso potencial en la restauración ecológica"**, bajo la dirección como tutor del **Dr. Roberto Antonio Linding Cisneros**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Orlando Hernández Cristóbal
Vocal:	Dr. José Núñez González
Secretario:	Dr. Roberto Antonio Linding Cisneros
Suplente:	Dr. Daniel Rojas Solís
Suplente:	Dr. Erick de la Barrera Montpellier

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 10 de noviembre de 2022.


DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

Agradecimientos institucionales

Agradezco enormemente al Dr. Roberto Lindig por su guía, apoyo y sobre todo por acercarme y compartir su enorme conocimiento en el campo de la restauración.

Al financiamiento de esta tesis por parte del *Programa de Apoyo de Procesos de Investigación e Innovación Tecnológica* PAPIIT DGAPA, UNAM "Restauración ambiental de sitios severamente degradados considerando los efectos esperados del cambio climático" AG200221.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas del conocimiento desde la Escuela Nacional Preparatoria hasta finalmente formarme como profesionista en la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia.

A la empresa CONCRETOS RECICLADOS S.A. DE C.V. y GEA Ambiental por facilitar los materiales usados en la construcción del tecnosuelo.

Al Dr. Daniel Rojas Solis por enriquecer este proyecto, sobre todo por acercarme y compartir su conocimiento en las PGPB.

A la Dra. Verónica Osuna Vallejo por su apoyo, guía y paciencia en el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Felipe García-Oliva por facilitar el uso del equipo para la cuantificación de los macronutrientes en los materiales orgánicos del tecnosuelo.

Al Dr. Orlando Hernández Cristobal y al Lic. Pablo Vega Hernández por la disposición y resultados obtenidos en la caracterización SEM.

Al Dr. José Núñez González, Dr. Orlando Hernández Cristobal, Dr. Erick de la Barrera Montpellier y Dr. Daniel Rojas Solis por aceptar formar parte del jurado y por complementar este trabajo con sus comentarios.

Agradezco al Lic. Alejandro Rebollar, Lic. Agustín Martínez Morales y Méd. Mónica Cortés por su apoyo y guía durante mi proceso de titulación. Al Departamento de Servicios Escolares por la atención durante mis estudios de licenciatura y la beca otorgada: TITULACIÓN-EGRESADOS ALTO RENDIMIENTO 2022-2023.

Agradecimientos personales

A mi familia. Papá, mamá gracias por respetar y apoyar mis decisiones personales que me llevaron hasta este momento, sin ustedes ninguno de mis logros sería posible. A mis abuelos Lili y Agus por su crianza y amor. A mi hermana y sobrinos por darle alegría a mi estadía en casa. Gracias por forjar la persona que soy, comparto este logro con ustedes.

A toda la familia Ponce por abrirme las puertas de su casa y ofrecerme un lugar en la mesa, sin duda este logró lo comparto con ustedes, especialmente con el Sr. Efrén y la Sra. Katy.

A cada amistad sumada o perdida a lo largo de mi carrera universitaria. Principalmente a mi implacable roomie Sophie, Aarón, Jorge, Cheche, el marrano letrado, ballo, tristeza, Pablo, Ethel, María bombero y Fany por todas las buenas anécdotas, sin duda, sin ustedes Morelia no habría sido lo mismo, fueron un gran soporte para mí y les agradezco enormemente. A las personas que conocí al final de mi estadia universitaria sin duda son personas increíbles y complementaron enormemente mi travesía por Morelia.

Personalmente agradezco al Dr. Lindig por permitirme desarrollar este tema y poder implementarlo en la zona donde vivo. Así como agradezco especialmente a cada persona que me ha ayudado en el desarrollo del proyecto: Edgar, Carlos, Argenis, Iván, Aarón, Ubaldo y Vero.

Pocas son las palabras, pero mi gratitud con cada uno de ustedes es enorme.

Porque también somos lo que hemos perdido...

Resumen

En el presente trabajo se evaluó el crecimiento de las especies vegetales *Zea mays* y *Albizia occidentalis* en tecnosuelos contruidos con residuos, con el fin de imitar los componentes de un suelo natural. Los residuos empleados en la construcción del tecnosuelo fueron: concreto, lodos residuales, biocarbón y materia orgánica composteada. Bacterias del suelo *Klebsiella oxytoca* y *Rhodococcus wratislaviensis* fueron adicionadas con el fin de mejorar el crecimiento de las especies vegetales e imitar los componentes biológicas del suelo. Los lodos residuales fueron el material orgánico con mayor de nitrógeno y fósforo (17.83 mg/g y 4.41 mg/g, respectivamente), por lo que hubo mejor crecimiento en *Zea mays* con este artefacto, para *Albizia occidentalis* no hubo diferencias significativas entre los artefactos orgánicos. Ambas especies tuvieron del 95-100 % de supervivencia. *Zea mays* creció el 61 % y tuvo el 26 % de la biomasa del follaje del sustrato control. *Albizia occidentalis* creció el 32 % y tuvo el 7 % de la biomasa del follaje del sustrato control. En ambas especies vegetales la presencia de las bacterias fue beneficiosa, el carácter de Bacteria Promotora de Crecimiento Vegetal se atribuye a *Klebsiella oxytoca*.

Abstract

In the present work the growth of *Zea mays* y *Albizia occidentalis* was evaluated in a constructed technosol, which was built with wastes in order to mimic natural soil components. The technosol was built with different kind of wastes: waste concrete, wastewater sludge, biochar and compost of organic wastes. Bacterias *Klebsiella oxytoca* y *Rhodococcus* was added to enhance growth of vegetal species, also in order to mimic biological part of the soil. Wastewater sludge was the organic waste with the most content of nitrogen and phosphorus (17.83 mg/g and 4.41 mg/g, respectively), so *Zea mays* showed the best growth with it, *Albizia occidentalis* did not show significant difference with organic wastes. Both plant species showed high survival (95-100%). *Zea mays* growht 61 % and had the 26 % of foliage biomass of control substrate. *Albizia occidentalis* growht 32 % and had the 7 % of foliage biomass of control substrate. Both plant species exhibit enanced growth in the presence of bacteria, so plant growth promoting agent is attributed to *Klebsiella oxytoca*.

Índice general

Agradecimientos institucionales	III
Agradecimientos personales	V
Resumen	VII
Abstract	VIII
1 Introducción	1
2 Objetivos	3
§2.1 Objetivo general	3
§2.2 Objetivos particulares	3
3 Marco Teórico	4
§3.1 Suelo	4
§3.1.1 Propiedades	8
§3.1.2 Clasificación del suelo	10
§3.1.3 Tecnosuelos	11
§3.1.4 Tecnosuelos construidos	12
§3.2 Residuos	15
§3.2.1 Concreto	15
§3.2.2 Lodos residuales	17
§3.2.3 Residuos orgánicos	17

4 Metodología	19
§4.1 Caracterización de residuos	19
§4.1.1 Coulombimetría	19
§4.1.2 Colorimetría	19
§4.1.3 Difracción de rayos X	20
§4.1.4 Microscopía electrónica de barrido	20
§4.1.5 Conductividad eléctrica y pH	21
§4.2 Tecnosuelo	22
§4.2.1 Obtención de residuos	22
§4.2.2 Construcción del tecnosuelo	23
§4.2.3 Tecnosuelo con consorcio bacteriano	25
§4.2.4 Selección y germinación de semillas	27
§4.2.5 Seguimiento del experimento	28
§4.2.6 Propiedades químicas	28
5 Resultados y discusión	29
§5.1 Componentes del tecnosuelo	29
§5.1.1 Análisis químico Concreto	29
§5.1.2 Análisis químico materia orgánica	36
§5.1.3 Ensayo de antagonismo de <i>Klebsiella oxytoca</i> y <i>Rhodococcus wrotislaviensis</i>	38
§5.2 Crecimiento de especies vegetales en el tecnosuelo	38
§5.2.1 Crecimiento de <i>Zea mays</i>	39
§5.2.2 Crecimiento de <i>Albizia occidentalis</i>	47
§5.3 Tecnosuelos	55
§5.3.1 pH	55
§5.3.2 Conductividad eléctrica	65
§5.3.3 Morfología del concreto	76
6 Conclusiones	80

Índice de figuras

3.1	<i>La pedósfera como intersección entre la litósfera, atmósfera, hidrósfera y biósfera (imagen tomada de [15]).</i>	5
3.2	<i>Proceso de formación del suelo (imagen tomada de [14]).</i>	6
3.3	<i>Izquierda: Colonización liquénica de fracturas en pizarras de bajo metamorfismo. Derecha: Líquenes en las primeras fases de formación del suelo sobre rocas sílices desnudas (imagen adaptada de [18]).</i>	7
3.4	<i>Idealización de los distintos horizontes de un suelo capaz de soportar vegetación (imagen de [17]).</i>	8
3.5	<i>Potencial de los tecnosuelos como soportes de vegetación (imagen adaptada de [6]).</i>	12
3.6	<i>Funciones ecosistémicas cumplidas por tecnosuelos construidos como azoteas verdes (imagen adaptada de [42]).</i>	13
3.7	<i>Distintos residuos empleados en la construcción de tecnosuelos para la reclamación de espacios abandonados (imagen de [8]).</i>	14
4.1	<i>Tamaños de partícula del concreto usado en la construcción del tecnosuelo 1" (izquierda) y 3/16" (derecha).</i>	23
4.2	<i>Izquierda: Lodos residuales en lecho de secado. Derecha: Lodos residuales deshidratados.</i>	23
4.3	<i>Residuos orgánicos sometidos a valorización.</i>	24
4.4	<i>Combinaciones de tecnosuelo en macetas de 1 L.</i>	25
4.5	<i>Bacterias utilizadas en el experimento <i>R. wratislaviensis</i> (aislado 54, arriba) <i>K. oxytoca</i> (aislado 49, abajo).</i>	26

5.1	<i>Caracterización del concreto por técnica de difracción de rayos X.</i>	30
5.2	<i>Detección de porlandita por BSE en distintos tamaños de partícula. Izquierda: Concreto reciclado 0.5 cm. Derecha: Concreto reciclado <44 μm.</i>	32
5.3	<i>Mapeo químico elemental por EDS de un concreto con tamaño 0.4 cm.</i>	33
5.4	<i>Mapeo químico elemental por EDS de concreto con tamaño de partícula <44 μm.</i>	34
5.5	<i>Valores promedio de pH y conductividad eléctrica del concreto fino.</i>	35
5.6	<i>Cuantificación de nutrientes esenciales en los distintos artefactos orgánicos.</i>	36
5.7	<i>Propiedades químicas medidas en los artefactos orgánicos.</i>	37
5.8	<i>Crecimiento de Z. mays en tecnosuelo.</i>	42
5.9	<i>Comportamiento de la biomasa del follaje de Z. mays en las distintas combina- ciones de tecnosuelo.</i>	43
5.10	<i>Comportamiento de la raíz de Z. mays en las distintas combinaciones de tecnosuelo.</i>	44
5.11	<i>Relación entre la longitud de la raíz y contenido de biomasa de Z. mays en tecnosuelo.</i>	45
5.12	<i>Valores promedio del contenido de clorofila (μmol/m²) de Z. mays en las distintas combinaciones de tecnosuelo.</i>	46
5.13	<i>Crecimiento de Z. mays en sustrato control según el factor BAC</i>	48
5.14	<i>Crecimiento de A. Occidentalis en tecnosuelo.</i>	50
5.15	<i>Comportamiento de la biomasa del follaje de A. occidentalis en las distintas combinaciones de tecnosuelo.</i>	51
5.16	<i>Comportamiento de la raíz de A. occidentalis en los distintas combinaciones de tecnosuelo.</i>	52
5.17	<i>Valores promedio del contenido de clorofila (μmol/m²) de A. occidentalis en las distintas combinaciones de tecnosuelo.</i>	53
5.18	<i>Crecimiento de A. occidentalis en sustrato control.</i>	54
5.19	<i>Mediciones semanales de pH en Z.mays.</i>	59
5.20	<i>Comportamiento de la altura final y la clorofila según el ΔpH en la especie vegetal Z. mays.</i>	60

5.21	<i>Mediciones semanales de pH en A. occidentalis</i>	64
5.22	<i>Comportamiento de la altura final y la clorofila según el ΔpH en la especie vegetal A. occidentalis.</i>	66
5.23	<i>Mediciones de conductividad eléctrica (dS/m) de los distintos tecnosuelos en la especie vegetal Z. mays</i>	70
5.24	<i>Mediciones de conductividad eléctrica (dS/m) de los distintos tecnosuelos en la especie vegetal A. occidentalis</i>	75
5.25	<i>Observación de concreto a través de un microscopio óptico marca CARL ZEISS modelo CL 6000 LED. Izquierda: Concreto reciclado con exposición a tecnosuelo. Derecha: Concreto reciclado sin exposición.</i>	77
5.26	<i>Imágenes BSE del concreto reciclado sin exposición a tecnosuelo.</i>	78
5.27	<i>Imágenes BSE del concreto reciclado con exposición a tecnosuelo.</i>	79

Índice de tablas

4.1	<i>Combinaciones de tecnosuelo y su porcentaje en volumen (v/v %) de cada artefacto.</i>	24
5.1	<i>Porcentaje en peso de las distintas fases cristalinas presentes en el concreto <40 μm de distintas muestras.</i>	31
5.2	<i>Crecimiento de <i>K. oxytoca</i> y <i>R. wratislaviensis</i> en ensayo de antagonismo en concentración 10^{-4}.</i>	38
5.3	<i>Código de letras asociados a cada combinación de tecnosuelo.</i>	39
5.4	<i>Valores del análisis ANOVA para altura final, contenido de clorofila, biomasa del follaje y raíz en la especie vegetal <i>Z.mays</i>. Código para los valores significativos: *$P \leq 0.05$ **$P < 0.01$ ***$P < 0.001$.</i>	40
5.5	<i>Valores del análisis ANOVA para la longitud de la raíz en la especie vegetal <i>Z. mays</i>. Código para los valores significativos: *$P \leq 0.05$ **$P < 0.01$ ***$P < 0.001$.</i>	40
5.6	<i>Valores del análisis ANOVA para altura final, contenido de clorofila, biomasa del follaje y raíz en la especie vegetal <i>A. occidentalis</i>. Código para los valores significativos: *$P \leq 0.05$ **$P < 0.01$ ***$P < 0.001$.</i>	47
5.7	<i>Valores del análisis ANOVA para altura final, biomasa del follaje y raíz en la especie vegetal <i>A. occidentalis</i> en sustrato control. Código para los valores significativos: *$P \leq 0.05$ **$P < 0.01$ ***$P < 0.001$.</i>	55
5.8	<i>Valores del análisis ANOVA para las mediciones de pH del tecnosuelo de la especie vegetal <i>Z. mays</i>. Código para los valores significativos: *$P \leq 0.05$ **$P < 0.01$ ***$P < 0.001$.</i>	55

5.9 Valores de las medias del pH según el factor del tecnosuelo (textura, materia orgánica y biocarbón) en la especie vegetal *Z. mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$ 57

5.10 Valores de las medias del pH acorde a cada tecnosuelo en la especie vegetal *Z. mays*. Ver tabla 5.3 para el código de letras asociado a cada tecnosuelo. 58

5.11 Valores del análisis ANOVA para el ΔpH del tecnosuelo de la especie vegetal *Z. mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$ 59

5.12 Valores del análisis ANOVA para las mediciones de pH del tecnosuelo de la especie vegetal *A. occidentalis* . Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$ 61

5.13 Valores de las medias del pH según el factor del tecnosuelo (textura, materia orgánica y biocarbón) en la especie vegetal *A. occidentalis*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$ 62

5.14 Valores de las medias del pH acorde a cada tecnosuelo en la especie vegetal *A. occidentalis*. Ver tabla 5.3 para el código de letras asociado a cada tecnosuelo. 63

5.15 Valores del análisis ANOVA para el ΔpH del tecnosuelo de la especie vegetal *A. occidentalis*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$ 63

5.16 Valores del análisis ANOVA para las mediciones de conductividad eléctrica (CE) directa (suelo) y lixiviado (lix.) del tecnosuelo en la especie vegetal *Z. mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$ 67

5.17 Valores de las medias de ambas conductividades eléctricas (CE) según el factor del tecnosuelo (textura, materia orgánica y BAC) en la especie vegetal *Z. mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$ 68

5.18 Valores de las medias de ambas conductividades eléctricas (CE) acorde a cada tecnosuelo en la especie vegetal *Z. mays*. Ver tabla 5.3 para el código de letras asociado a cada tecnosuelo. 69

5.19 *Valores del análisis ANOVA para las mediciones de conductividad eléctrica (CE) directa (suelo) y lixiviado (lix.) del tecnosuelo en la especie vegetal A. occidentalis . Código para los valores significativos: *P ≤ 0.05 **P <0.01 ***P <0.001.* 72

5.20 *Valores de las medias de ambas conductividades eléctricas (CE) según el factor del tecnosuelo (textura, materia orgánica y BAC) en la especie vegetal A. occi- dentalis. Código para los valores significativos: *P ≤ 0.05 **P <0.01 ***P <0.001.* 73

5.21 *Valores de las medias de ambas conductividades eléctricas (CE) acorde a cada tecnosuelo en la especie vegetal A. occidentalis. Ver tabla 5.3 para el código de letras asociado a cada tecnosuelo.* 74

Capítulo 1

Introducción

La urbanización es un proceso socioeconómico complejo que transforma el entorno construido, convirtiendo los asentamientos rurales en urbanos, y altera la distribución de la población, en general por el desplazamiento de las zonas rurales a las urbanas [1]. Si bien, el proceso de urbanización trae consigo una mayor accesibilidad a los servicios básicos, tales como: la provisión de agua, energía, transporte, recolección y disposición de residuos, entre otros; muchas veces la falta de planeación urbana repercute en la mala calidad de estos servicios [2].

Uno de los servicios básicos con mayores carencias es el manejo de residuos; los sistemas de manejo actuales no poseen un enfoque de sustentabilidad, en la mayoría de los casos el enfoque es meramente logístico y no hay estrategias para la disminución y valorización de residuos [3]. En este sentido, cuando un material cumple la función con la que originalmente fue diseñado, este es desechado, ya que su vida útil ha terminado, y es llamado residuo por el primer usuario, al no ver más valor en él. La generación de residuos está íntimamente ligada al proceso de urbanización [4]. Por lo que la cantidad de recursos que demandamos en las zonas urbanas inherentemente repercute en la cantidad de residuos que generamos. Los residuos, independientemente de cuál sea su fuente de origen, son un problema serio en México, ya que no hay estrategias claras sobre su manejo, hay altas tasas de generación y se suma la falta de infraestructura necesaria para su valorización o disposición final [5].

Dada la continua acumulación de materiales distintos a los que naturalmente se encontrarían

en un suelo natural, la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, por sus siglas en inglés) ha creado un nuevo grupo de clasificación de suelos; los tecnosuelos. Dentro de esta clasificación se encuentran los tecnosuelos construidos como soporte de vegetación.

Los tecnosuelos construidos son suelos que contienen distintos materiales orgánicos e inorgánicos, generalmente su construcción se realiza con residuos, poseen la capacidad de brindar o recuperar servicios ecosistémicos, pueden ser diseñados acorde a la función que desempeñarán y prometen ser una gran alternativa para abatir la degradación del suelo, también se han convertido en un ejemplo de economía circular [6-8].

Por otra parte, ciertas actividades relacionadas al reverdecimiento en sitios urbanos conllevan a la continua extracción del horizonte O (es decir la capa de materia orgánica del suelo) de suelos fértiles [9]. A pesar de que se conocen los impactos ambientales por la sobreexplotación de la capa fértil del suelo [10], es una actividad económica regulada por la legislación mexicana en la NOM-027-SEMARNAT-1996 y representó el 3.4% del valor de la producción de recursos no maderables a nivel nacional [11, 12]. Debido a ello, distintas actividades de valorización de residuos deben de ser propuestas para mejorar las prácticas de revegetación en las ciudades [9].

En este sentido, un material sustentable es aquel cuyo aprovechamiento es el óptimo en términos ambientales, sociales y económicos con relación a otro material que tiene la capacidad de cumplir la misma función en un determinado producto [13]. Por lo que la construcción de tecnosuelos resulta una alternativa sustentable y eficaz a la continua demanda de suelos fértiles; ya que se trabaja exclusivamente con residuos y no se demandan materiales vírgenes para su creación.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo general

Diseñar tecnosuelos a partir de residuos orgánicos e inorgánicos como una alternativa potencial de restauración ecológica.

2.2. Objetivos particulares

- Caracterizar la composición química de distintos residuos orgánicos e inorgánicos potencialmente útiles para el diseño de un tecnosuelo.
- Evaluar el crecimiento de las especies vegetales *Zea mays* y *Albizia occidentalis* en los distintos tecnosuelos.
- Determinar el comportamiento de múltiples residuos en el diseño de tecnosuelos como una alternativa para su valorización.
- Cuantificar el desempeño de las bacterias del suelo *Klebsiella oxytoca* y *Rhodococcus wratislaviensis* como agentes promotores del crecimiento vegetal.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Suelo

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) considera al suelo como un recurso no renovable, ya que su proceso de formación es de aproximadamente 1 cm/1000 años. Los suelos proporcionan múltiples servicios ecosistémicos: suministran materiales y alimentos, regulan el clima, son fuente de suministro y calidad de agua, conservan la biodiversidad, almacenan carbono, además de ser un hábitat de microorganismos [14].

Dada la magnitud e importancia de ciertos componentes de la Tierra, estos, han sido clasificados en términos de hidrósfera (para el agua), atmósfera (aire), litósfera (rocas) y biósfera (organismos), así el suelo se considera dentro de la pedósfera. Se entiende como pedósfera a la capa de suelo que recubre la Tierra y que no es continua, siendo la interfaz entre la atmósfera y la litósfera, entre la biósfera y la litósfera [15]. Por lo que se puede pensar a la Tierra como la conformación de estas cinco esferas y su continua interacción. La pedósfera representa la intersección entra las demás esferas y dentro de ella ocurren transferencias de materia y energía con las mismas [15, 16] (ver fig. 3.1). A través del término pedosfera se puede entender el suelo como un cuerpo específico de la naturaleza que se desarrolló en el tiempo y espacio, por distintos factores formadores de suelo [15].

El suelo se define el producto final de la influencia del tiempo en sus materiales parentales

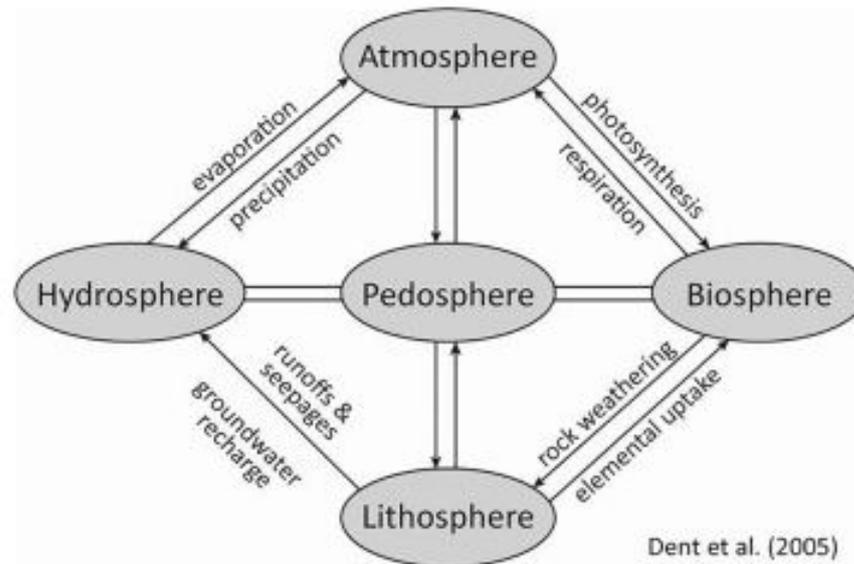


Figura 3.1: La pedósfera como intersección entre la litósfera, atmósfera, hidrósfera y biósfera (imagen tomada de [15]).

(término usado para describir el material inicial que da lugar al suelo, pudiendo ser materiales consolidados, como: las rocas, o materiales no consolidados, como: arenas, arcillas y grava) con la interacción del clima, la topografía y distintos organismos [14]. Siendo estos los cinco factores formadores del suelo, los cuales son determinantes en las propiedades y características de los suelos, en este sentido, la pedogénesis se encarga del estudio del origen y formación del suelo.

El proceso pedogenético inicia con el intemperismo del material parental. El suelo es formado mediante dos procesos fundamentales que afectan directamente al material parental y tienen lugar cerca de la superficie terrestre, los procesos son denominados meteorización o intemperismo [17].

Los procesos de formación del suelo se ilustran en la figura 3.2, se observa como las rocas o cristales presentes pierden ciertos elementos, que sirven como micro- y macronutrientes para procesos metabólicos de otros organismos. Se observa como el intemperismo empieza en la superficie, generando cambios menos acentuados en el fondo.

El intemperismo puede ocurrir de manera física o química [17]. El intemperismo físico ocurre cuando una roca se rompe en pedazos cada vez más pequeños por distintos métodos mecánicos, esto sin alterar la composición química, dichas transformaciones pueden ser por: fragmentación



Figura 3.2: Proceso de formación del suelo (imagen tomada de [14]).

por hielo, descompresión y/o expansión térmica. El intemperismo químico descompone las estructuras químicas de los minerales transformándolas en uno o más productos, las reacciones que pueden ocurrir son: de disolución, de oxidación o de hidrólisis.

La acción biológica sobre los materiales parentales es muy importante ya que conlleva a un intemperismo físico o químico, este proceso se da principalmente por cualquier organismo vivo e.g. bacterias, hongos, algas o líquenes, quienes son los primeros organismos en colonizar a la roca (ver fig. 3.3), y que con los ácidos segregados por sus procesos metabólicos favorecen la meteorización química al romper las estructuras cristalinas presentes en el material parental, transformando los elementos presentes en la roca a una forma asimilable para otros organismos [17, 18]. Una vez que organismos más complejos van llegando al suelo; como la vegetación, las raíces, en la búsqueda de nutrientes, pueden perforar poco a poco la roca, favoreciendo la meteorización física, a su vez las zonas cercanas a la raíz se convierten en una zona importante



Figura 3.3: *Izquierda: Colonización liquénica de fracturas en pizarras de bajo metamorfismo. Derecha: Líquenes en las primeras fases de formación del suelo sobre rocas sílices desnudas (imagen adaptada de [18]).*

de actividad biológica [19]. Por último, la muerte de los organismos propicia una nueva adición de materia orgánica; contribuyendo al proceso pedogenético (ver fig. 3.2).

Cuando el proceso pedogenético ha evolucionado, distintas capas u horizontes pueden ser identificadas en el suelo. El conjunto de horizontes vistos desde una perspectiva vertical constituye el *perfil del suelo*. Los horizontes se clasifican como O, A, E, B y C, distintas características pueden ser observadas dentro de cada uno. La textura, color, estructura y extensión de cada horizonte se acentúan conforme pasa el tiempo y varía dependiendo el tipo de ambiente. En la figura 3.4 se observa una idealización de un suelo capaz de soportar vegetación.

El horizonte O se compone de capas que corresponden a material fresco sin descomponer, descomposición intermedia y material altamente descompuesto [10], aproximadamente el 35 % corresponde a materia orgánica. El horizonte A se compone de materia orgánica principalmente humificada íntimamente asociada con materia inorgánica. Estos primeros horizontes constituyen la capa superficial del suelo [17]. Los tres horizontes por debajo de estos son caracterizados por tener altos contenidos de materia mineral. Conforme el agua pasa por el horizonte E transporta las partículas más finas hacia el fondo, por lo que esta capa se conoce como la zona de eluviación. Las partículas eluviadas se concentran en el horizonte B (o zona de acumulación).

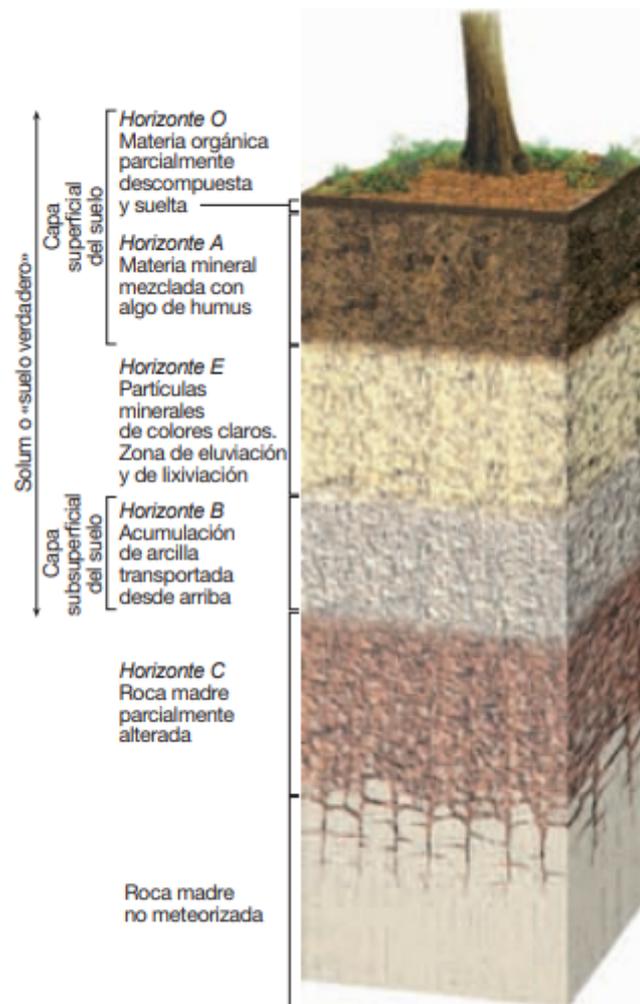


Figura 3.4: Idealización de los distintos horizontes de un suelo capaz de soportar vegetación (imagen de [17]).

3.1.1. Propiedades

Un suelo ya formado y que tiene la capacidad de soportar vegetación se compone de una fase sólida (minerales y materia orgánica), una líquida (agua) y una gaseosa (aire), estas tres fases son dinámicas y típicamente cambian en períodos cortos de tiempo [17]. Un suelo óptimo se conforma en volumen por un 50 % de fase sólida (la materia orgánica es de aproximadamente 5 %), 25 % de fase líquida y 25 % gaseosa.

Las propiedades físicas de un suelo (como la textura y la densidad aparente), químicas (capacidad de intercambio catiónico, pH, conductividad eléctrica, etc.) y biológicas (microorganismos, macro y mesofauna) se ven influenciadas por los factores pedogenéticos.

La química del suelo está dominada por la interacción entre sus componentes sólidos (principalmente los compuestos insolubles de sílice, calcio y aluminio) y su fase acuosa, estas interacciones pueden tener un impacto directo en las condiciones físicas del suelo [20].

El pH es uno de los parámetros más importantes en el suelo [21]. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo es una propiedad muy relevante que afecta a muchas otras propiedades fisicoquímicas y biológicas [20]. A distintos pH la disponibilidad de nutrientes para las plantas se ve afectada [20, 21].

La conductividad eléctrica en el suelo, se usa como una medida de las sales disueltas presentes (salinidad) [22]. Toma en cuenta los aniones y cationes de las sales disueltas en el agua del suelo. Sus unidades son Siemens por longitud y sirven como una medida en la salinidad del suelo, si los valores son $>4\text{dS/m}$ se considera como un suelo salino [20].

Por otra parte, las propiedades biológicas responden directamente a las propiedades físicas y químicas, por lo que pueden ser usadas como un indicador de calidad de suelo [20]. La materia orgánica es un factor clave para los microorganismos, ya que se convierte en la fuente de carbono principal [8, 23]).

La mayor actividad microbiana se encuentra en los primeros centímetros del suelo desde la superficie. La mayor actividad microbiana se encuentra en la rizosfera, la concentración de microorganismos en esta zona es de 10-1000 veces mayor que en otras partes del suelo [24]. La rizosfera se define como la parte del suelo influenciado por la raíz, así como el suelo que rodea la raíz en el que las propiedades físicas, químicas y biológicas han sido modificadas por el crecimiento y la actividad de la raíz [19].

Durante mucho tiempo se ha reconocido que algunos de estos microorganismos, como los hongos micorrizicos o las bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno, desempeñan un papel importante en el rendimiento de las plantas al mejorar la nutrición mineral [23]. Con base en lo anterior, ciertos microorganismos presentes en la rizosfera, especialmente bacterias, suelen definirse como Bacterias Promotoras de Crecimiento de las Plantas (PGPB, por sus siglas en inglés) ya que actúan mediante dos mecanismos principales: estimulan de manera directa el crecimiento o ayudan en el control de enfermedades [25], cabe mencionar que tan solo del 2-5 %

de las rizobacterias son PGPB [26].

Las PGPB constituyen una alternativa sustentable en la agricultura y la restauración de suelos; ya que pueden sustituir a los agroquímicos [27]. También son usadas para mitigar diversos tipos de estrés biótico y abiótico [24].

La alteración de factores abióticos en suelos es un problema ambiental que se ha ido incrementando [28]. Distintas bacterias han sido empleadas en procesos de mejoramiento de suelos, incluyendo la biorremediación, para esto último aquellas que han demostrado tolerar factores abióticos extremos han sido las bacterias *Klebsiella spp.* y *Rhodococcus wratislaviensis* [29-34].

Diversas especies del género *Klebsiella* han sido encontradas en lugares hostiles caracterizados por la presencia de metales, en experimentos han mostrado tolerar una alta concentración de metales [29]. El carácter de *Klebsiella spp.* en los procesos de biorremediación en hábitats con altas cantidades de metales ha sido demostrado en distintos estudios, tanto en suelo como en agua [29-31].

De igual forma, *Rhodococcus spp.* ha sido encontrada en hábitats hostiles que contienen metales pesados [32]. Su efecto biorremediador ha sido demostrado en suelo, agua y lixiviados de rellenos sanitarios con altas concentraciones de metales [32-34].

3.1.2. Clasificación del suelo

Por ser un recurso sumamente valioso es de vital importancia su clasificación. El sistema internacional de clasificación de suelos, WRB, es editado por el grupo de trabajo de la Unión Internacional de Ciencias del Suelo (IUSS) y publicado por la FAO [35].

Para la IUSS (2015) el suelo se define como:

"Cuerpo natural continuo que tiene tres dimensiones espaciales y una temporal. Posee tres rasgos principales: está formado por constituyentes minerales y orgánicos e incluye fases sólida, líquida y gaseosa. Los constituyentes están organizados en estructuras, específicas para el medio pedológico, estas estructuras forman el aspecto morfológico de la cubierta edáfica. El suelo está en constante evolución, dando así al suelo su cuarta dimensión, el tiempo."

Dada su definición de suelo, la IUSS lo clasifica en función de sus horizontes discernibles.

Toma en cuenta las características morfológicas, físicas, químicas y biológicas de un suelo determinado y las clasifica de acuerdo con el grado de desarrollo de este [36]. Tiene por objetivo clasificar cualquier material dentro de los 2 m de la superficie de la Tierra que esté en contacto con la atmósfera, con la exclusión de organismos vivos, áreas con hielo continuo que no estén cubiertas por otro material, y cuerpos de agua más profundos que 2 m, la definición incluye roca continua, suelos urbanos pavimentados, suelos de áreas industriales, suelos de cuevas y suelos subacuáticos. [36].

Lo notable de esta clasificación es que logra afrontar problemas ambientales en los suelos, nombrando cualquier objeto que forme parte de la *epidermis de la tierra* [37].

3.1.3. Tecnosuelos

Los tecnosuelos, también llamados suelos urbanos, son uno de los 32 grupos de suelo de referencia de la WRB. Son suelos que contienen una cantidad significativa de artefactos, o están sellados por roca dura técnica (material duro creado por el hombre, que tiene propiedades diferentes a la roca natural). Incluyen suelos de desechos (rellenos sanitarios, lodos, escorias, escombros o desechos de minería y cenizas), pavimentos con sus materiales subyacentes no consolidados, suelos con geomembranas y suelos construidos con materiales hechos por el hombre [36].

También IUSS (2015) los define como:

"Suelos que contienen más del 20 % de materiales artificiales por volumen y se encuentran dentro de los primeros 100 cm de la superficie terrestre."

Por lo tanto, a diferencia de un suelo natural, el cual su material parental son rocas o minerales naturales, en los tecnosuelos el término material parental (o *artefacto*) se refiere a los materiales que lo conforman y que son hechos o expuestos a actividades humanas, que de otra forma su formación no ocurriría sobre la superficie de la tierra [36]. Al igual que en un suelo natural, en los tecnosuelos ocurren procesos de pedogénesis, los cuales, están fuertemente afectados por los materiales parentales y su organización, por lo que las propiedades de los tecnosuelos están originadas por su origen técnico [36].

Morel et al. (2014) identifican tres categorías de tecnosuelos acorde a su potencial para soportar vegetación: tecnosuelos diseñados con vegetación, tecnosuelos de sitios de disposición final y tecnosuelos desnudos, los cuales tienen un alto, medio y bajo potencial para permitir el desarrollo de vegetación, respectivamente (ver fig. 3.5).



Figura 3.5: *Potencial de los tecnosuelos como soportes de vegetación (imagen adaptada de [6]).*

3.1.4. Tecnosuelos construidos

Los tecnosuelos ingenieriles están específicamente diseñados para favorecer el desarrollo de vegetación en el largo plazo, en esta categoría se pueden identificar dos tipos de tecnosuelos: los construidos y/o modificados, y los sustratos de azoteas verdes [6]. Ambos tecnosuelos son diseñados con el objetivo de imitar a un suelo natural, por lo que son fuente de servicios ecosistémicos (ver fig. 3.6), como: almacenamiento de carbono, provisión de alimentos y biomasa, regulación de clima local, regulación de calidad de agua y aire, conservación de la biodiversidad y protección del suelo natural (por ser suelos construidos con residuos y no ser necesaria la extracción de suelos vírgenes ricos en nutrientes para revegetar las ciudades) [6, 38].

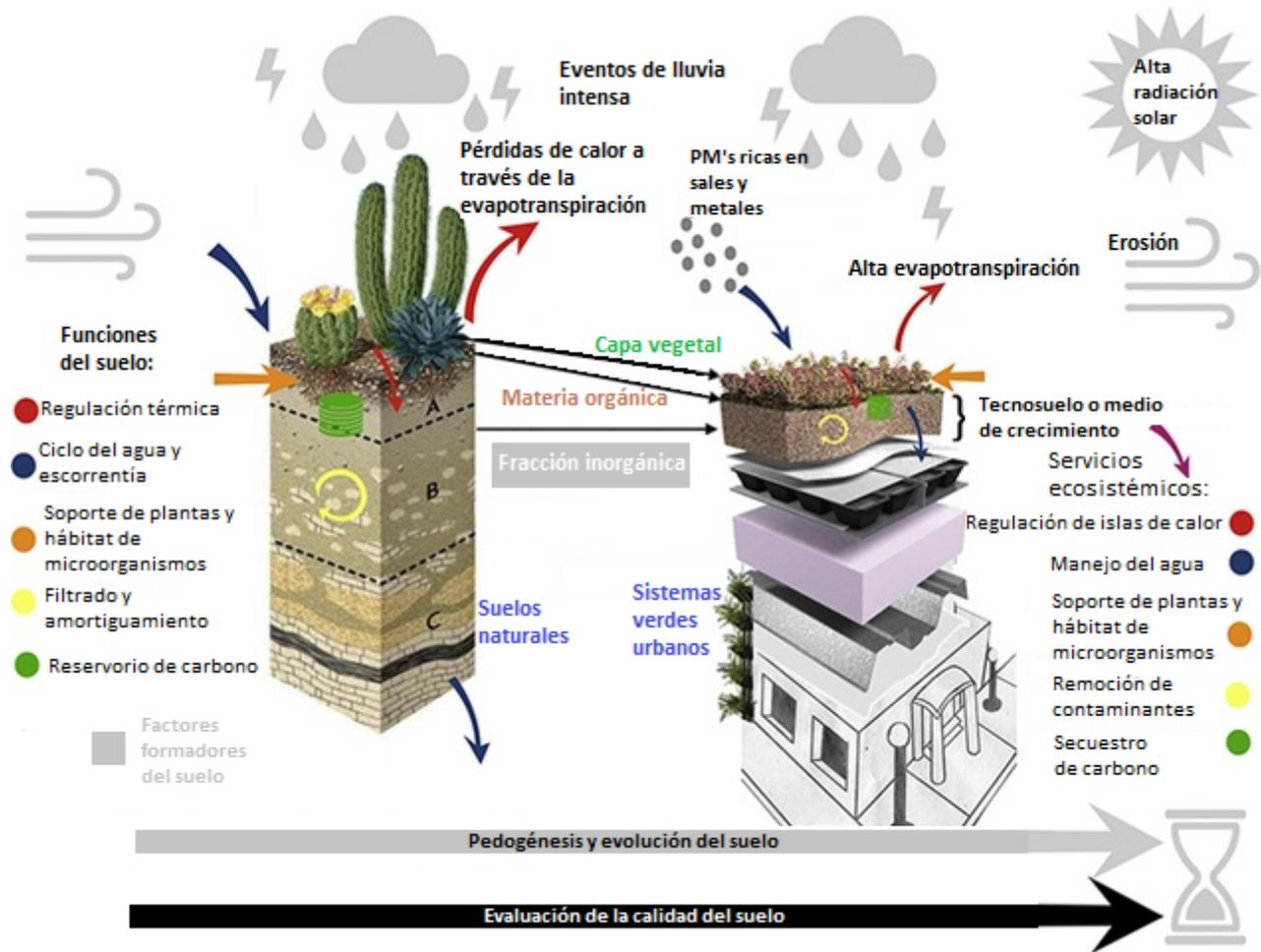


Figura 3.6: Funciones ecosistémicas cumplidas por tecnosuelos construidos como azoteas verdes (imagen adaptada de [42]).

Uno de los objetivos principales de los tecnosuelos construidos es acelerar el proceso natural de formación del suelo [39, 40]. Cabe señalar que no existe una definición universal de tecnosuelos construidos, muchos estudios los han definido como mezclas de residuos o subproductos, así como una variedad de materiales orgánicos y/o inorgánicos construidos que buscan cumplir propósitos específicos [39-41].

Al construir un tecnosuelo se ha tratado de usar una enfoque de economía circular en la selección de los artefactos [8]. Se busca que a través de la valorización de residuos se imiten los componentes orgánicos e inorgánicos del suelo natural [40]. Los tecnosuelos construidos están destinados a ser sustratos fértiles para el crecimiento de las plantas, incluso si su composición a veces está lejos de la ideal [8].

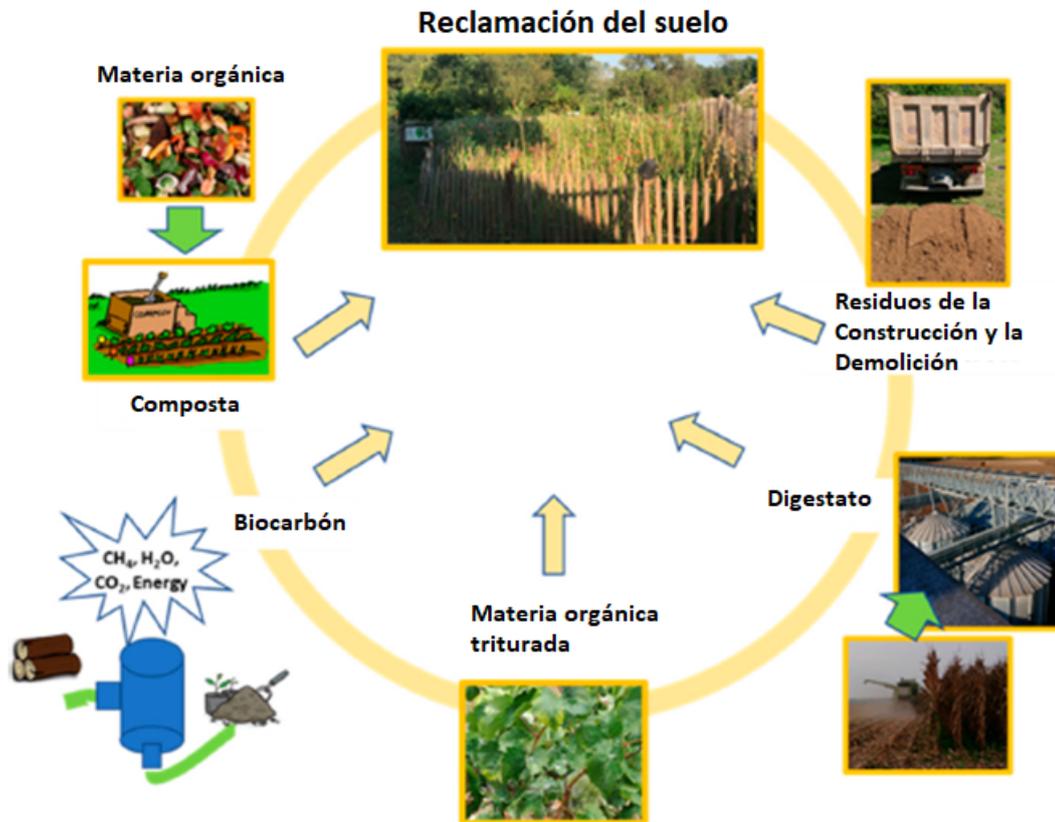


Figura 3.7: Distintos residuos empleados en la construcción de tecnosuelos para la reclamación de espacios abandonados (imagen de [8]).

Distintos residuos y combinaciones de ellos han sido usados en la construcción de tecnosuelos (ver fig. 3.7), a través de la valorización de residuos orgánicos (composta y biocarbón), lodos de depuradora, lodos de fábricas de papel, concreto, ladrillos, suelos de excavación y cenizas de la quema de carbón, se logra la reclamación de espacios abandonados en las ciudades [8, 40].

Durante la selección de materiales se debe realizar una correcta selección de materiales, se debe priorizar aquellos que por su fuente de origen no representen algún problema ambiental a futuro, sumado a esta estrategia, la caracterización de los materiales empleados resulta fundamental y tiene que realizarse *a priori* de la construcción de los tecnosuelos con el objetivo de controlar la viabilidad del sustrato, excluir materiales contaminados, al igual que predecir las propiedades fisicoquímicas del tecnosuelo [8, 39].

El concreto (CR) ha sido usado en la construcción de tecnosuelos con el fin de dar una valorización distinta a la convencional (generalmente se usa como agregado en otras construcciones

[43]), su principal función en los tecnosuelos es brindar de un esqueleto mineral y sólido a las especies vegetales [44].

Para Fabbri et al. (2021) una correcta construcción de tecnosuelos dependerá de variables como: el problema ambiental a atacar (el suelo puede contener contaminantes por actividades humanas anteriores, escombros o altos niveles de compactación del suelo), el objetivo final de la intervención (área urbana o remediación de espacios mineros), disponibilidad de residuos y tiempo de duración del proyecto.

Bajo el criterio de tecnosuelos, los suelos mineros son considerados dentro de esta categoría. Como se vio en la sección anterior, distintas investigaciones se han orientado a la biorremediación de estos suelos con PGPB. Con el objetivo de acelerar el proceso de crecimiento de la cobertura vegetal, los tecnosuelos construidos han sido combinados con otras técnicas de restauración, como lo son el uso de PGPB [45, 46].

Imitar los componentes orgánicos e inorgánicos del suelo resulta fundamental para construir un suelo fértil. El componente orgánico per se ayuda al establecimiento de microorganismos [8], sin embargo, contemplar la adición de PGPB puede ayudar a acelerar las condiciones necesarias para el establecimiento de la vegetación.

3.2. Residuos

3.2.1. Concreto

La mayoría de los residuos, sin importar su fuente de origen, pueden ser susceptibles a ser transformados a nuevos productos, la última opción para los residuos debe de ser las estrategias de disposición final. Por lo que brindar un buen manejo de residuos, trae consigo beneficios ambientales, sociales y económicos, concretamente, es fundamental para lograr asentamientos urbanos alineados al desarrollo sustentable.

El crecimiento de las zonas urbanas depende en gran medida del sector construcción, el cual, es fundamental en la economía de cualquier país, a través de este se logra la infraestructura y viviendas necesarias para el desarrollo pleno de las sociedades [47]. La construcción es uno de

los pilares de la urbanización, los residuos generados en este sector han recibido poca atención en comparación con otro tipo de residuos, como pueden ser los derivados de los plásticos.

A nivel mundial los Residuos del Sector de la Construcción y Demolición (RCD) representan del 45-65 % de lo depositado en sitios de disposición final, por lo que el sector es uno de los mayores productores de residuos [48].

En México, los RCD se componen de distintos materiales, 39 % corresponde a material de excavación, 25 % CR, 24 % escombros y 12 % otros materiales (yeso, madera, cerámica, metales, plástico, etc.) [43]. Cifras oficiales para el 2018, señalan una generación de 10.15 millones de toneladas, es decir 27,800 ton/día, y solamente el 4 % es reciclado [5, 43]. Esta fracción reciclada corresponde exclusivamente a material de excavación y CR, esto con fines de ser incorporados a nuevas obras.

Son pocas las entidades que cuentan con infraestructura para proporcionar un manejo adecuado a los RCD [43]. Actualmente los RCD son depositados en su mayoría en sitios inadecuados, como, por ejemplo, barrancas, predios abandonados y vía pública [43]. Otra parte es depositada en rellenos sanitarios, donde por sus características y volumen, provocan que se acorte la vida útil de estos sitios [43, 49].

El CR es el segundo material de mayor importancia dentro de los RCD, sin embargo, en México, sólo existe una planta para el reciclaje de CR, por lo que alrededor del 80 % de este material termina en sitios de disposición final [43].

La falta de valorización de materiales potencia los posibles impactos ambientales que tengan los materiales en su fin de vida. En general los RCD en su fin de vida, degradan y erosionan los suelos, destruyen la vegetación y contribuyen a la pérdida de servicios ambientales, obstruyen el paso de los arroyos, cañadas y barrancas, son focos de infección por mezclar residuos, afectan la recarga de acuífero, proliferan la fauna nociva y el polvo; repercutiendo en la salud humana [43, 50, 51].

3.2.2. Lodos residuales

Garantizar el acceso al agua en las urbes, conlleva al saneamiento de esta, lo cual repercute en la generación de distintos residuos a lo largo de los procesos empleados. Los Lodos Residuales (LR) son el residuo de mayor volumen generado en los procesos de tratamiento de agua, por lo que su correcta disposición final representa un gran reto ambiental [52, 53]. El proceso de lodos activados es el que aporta en mayor medida a la generación de LR [54]. Este proceso representa el 28.9% de la capacidad instalada en México, tratando el 49.04% del caudal total nacional [55].

Los LR sin importar su fuente de origen (grandes generadores o pequeños) tienen que ser sometidos a procesos de estabilización, esto, con el fin de eliminar patógenos, reducir o eliminar los procesos de putrefacción que pueden emitir olores desagradables y atraer vectores [54]. Los LR pueden sufrir tratamientos alcalinos, aerobios, anaerobios, térmicos y de composteo previo a su disposición final [54]. Tan solo en diez años la generación de LR pasó de 640,000 t/año a 32,467,784 t/año, esta última cifra reportada para el año 2016 [54, 55]. El tratamiento de lodos puede aumentar los costos de operación debido al uso de energía en los distintos procesos de estabilización en las Plantas de Tratamiento de Agua (PTAR), por dicha razón se ha detectado que en las PTAR más grandes de México, aquellas con un caudal de diseño superior a 200 L/s, muchas veces carecen de procesos de estabilización [54].

Cuando los LR ya han sido sujetos a procesos de estabilización, pueden ser usados como mejoradores de suelo; denominados biosólidos. En México, los LR pueden ser catalogados como biosólidos si cumplen con ciertos parámetros establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 [56]), la cual, establece los límites permisibles en metales pesados y organismos patógenos.

3.2.3. Residuos orgánicos

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son aquellos que se generan en el hogar. A nivel nacional se estima una generación de 120,128 t/día [5]. Su composición es variada, alrededor del 46.4% corresponde a materiales orgánicos, es decir 55,739 toneladas de materia orgánica

por día [5]. Tan sólo el 5 % de la generación total de RSU (orgánicos e inorgánicos) se recolecta de manera selectiva [5]. Dado que un poco menos de la mitad corresponde a fracción orgánica, resulta imprescindible generar estrategias para su valorización, ya que los nutrientes contenidos no son aprovechados, por lo tanto, los sitios de disposición final resultan la peor alternativa para el fin de vida de estos residuos [57].

Existen distintos procesos de valorización para la materia orgánica. La valorización de la fracción orgánica sometida a procesos de compostaje resulta una estrategia viable y necesaria en las ciudades [58]. No obstante, con el fin de reducir las emisiones atmosféricas asociadas a la recolección de residuos y reducir las presiones en los rellenos sanitarios, el compostaje en casa resulta una estrategia para la sustentabilidad en los sistemas de recolección [59, 60].

Otra alternativa para la valorización de la fracción orgánica puede ser la conversión termoquímica (pirólisis) [61]. La pirólisis es una tecnología generalmente utilizada para la conversión de materiales orgánicos en combustibles líquidos (bioaceites), gas (compuesto principalmente por CO, CO₂ de carbono, H₂ y CH₄) y biocarbón (BC) [62].

El biocarbón es el subproducto de la pirólisis y su uso ha sido empleado con fines agrónomicos [63]. Generalmente la materia orgánica es sometida a temperaturas de 350-1200 °C en condiciones con bajos niveles de oxígeno [63]. Ambas técnicas de valorización de la materia orgánica pueden ser usadas como mejoradores de suelo. La composta (CO) puede aplicarse de manera directa en el suelo, teniendo efectos positivos en la fertilidad del suelo por su contenido en macronutrientes, así como permitir el desarrollo de actividad biológica [64]. Por otra parte, el BC es un material rico en carbono que ha sido usado como mejorador de suelo, ya que mejora la porosidad y aumenta la capacidad de retención de agua [8, 63].

Capítulo 4

Metodología

4.1. Caracterización de residuos

4.1.1. Coulombimetría

La coulombimetría es una técnica que determina la cantidad de sustancia es directamente determinada por una corriente eléctrica. La titulación coulombimétrica para medir carbono inorgánico total mide el CO₂ generado en la combustión de la muestra y después lo hace reaccionar en una celda electroquímica, midiendo así el carbono total de la muestra.

Mediante la técnica de coulombimetría se midió el CT de los artefactos orgánicos del tecnosuelo. BC, CO y LR fueron secadas y trituradas en un mortero de ágata. Los LR fueron secados a 105 °C en un horno de resistencia por 24 horas, de igual manera CO a una temperatura de 80 °C, para el BC no fue necesario un tratamiento de secado. El equipo utilizado fue un Coulómetro de Dióxido de Carbono marca UIC, Inc. modelo CM5015 del Laboratorio de Biogeoquímica de Suelos del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Unidad Morelia.

4.1.2. Colorimetría

La colorimetría es una técnica que sirve para determinar la concentración de una disolución. La concentración de una muestra se puede calcular a partir de la intensidad de una longitud

de onda específica antes y después de atravesar la muestra.

Mediante la técnica de colorimetría se midió el NT y PT. Los tres componentes orgánicos fueron secados, triturados y colocados en digestión ácida. El equipo utilizado fue un Colorímetro marca Seal Analytical, Inc. modelo AA3 del Laboratorio de Biogeoquímica de Suelos del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Unidad Morelia.

4.1.3. Difracción de rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica basada en la difracción de rayos X por un material. Es útil para conocer la estructura cristalina de un material y es considerada una técnica no destructiva para determinar: estructuras y fases cristalinas. Se hace incidir un haz de rayos X sobre el material, esto genera fenómenos de difracción debido a la simetría en el arreglo de los átomos, el resultado es un patrón de intensidades.

Mediante la técnica de DRX se identificaron las distintas formas cristalinas presentes en en CR reciclado. La muestra fue obtenida del CR Fino, la cual fue tamizada a un tamaño de partícula $<40 \mu\text{m}$, posteriormente se secó por 5 días en un horno de resistencia a 40°C . El equipo utilizado es un Difractómetro Bruker modelo D2 Phaser con radiación $\text{CuK}\alpha$ del Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia.

4.1.4. Microscopía electrónica de barrido

Con el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) es posible conocer la superficie y composición química de los materiales, se considera una técnica no destructiva y es ampliamente usada en la ciencia de materiales.

En SEM se utiliza un haz de electrones para generar una imagen del material a analizar. Estos electrones se obtienen de un filamento de tungsteno y son llamados electrones primarios (PE, por sus siglas en inglés).

Los PE, al interactuar con la muestra, se convierten en electrones retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés), electrones secundarios, electrones Auger y rayos X, estas señales son

recogidas por detectores del equipo.

Los BSE son aquellos electrones incidentes que se acercan al núcleo de un átomo lo suficientemente cerca como para dispersarse en un ángulo mayor a 90° y resurgir de la superficie. Las imágenes tienen un poco menor resolución que las imágenes de SE porque vienen desde un poco más profundo en la muestra, dan información de la composición de elementos de mayor número atómico (mayor brillo).

Los rayos X debidos a la interacción de PE se utiliza para un análisis de composición elemental, son característicos de cada material. Es una técnica no destructiva de rayos X y se conoce como Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS, por sus siglas en inglés).

Mediante EDS se caracterizó la composición química del CR, se analizaron muestras con tamaños de partícula $<40 \mu\text{m}$. Mediante los BSE se analizó la superficie del CR antes y después de su exposición como tecnosuelo, tamaños entre 0.3-0.6 cm fueron analizados seleccionando aquellos concretos cercanos a las raíces de *A. occidentalis*. Ambos tamaños de partícula fueron secados por 5 días en un horno de resistencia a 40°C . Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL-SMT-IT300 del Laboratorio de Microscopía de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia.

4.1.5. Conductividad eléctrica y pH

El pH es una medida del grado de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH de una disolución se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno (ver ecuación 4.1).

$$pH = -\log[H^+] \quad (4.1)$$

Una disolución se identifica como ácida, básica o neutra de acuerdo con:

- ácida cuando $[H^+] > 1.0E - 07 \text{ M}$, $pH < 7$
- básica cuando $[H^+] < 1.0E - 07 \text{ M}$, $pH > 7$
- neutra cuando $[H^+] = 1.0E - 07 \text{ M}$, $pH = 7$

Por otra parte la conductividad eléctrica (σ) es la medida de la capacidad que tiene un material para dejar pasar una corriente eléctrica a través de él. Su inverso es la resistividad ($\sigma = 1/\rho$). Sus unidades son S/m. En el suelo, se usa como una medida de las sales disueltas presentes (salinidad) [22]. Algunos de los iones presentes en el suelo pueden ser: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , y HCO_3^- .

Las mediciones para los artefactos del tecnosuelo se hicieron por duplicado para pH y CE. Se colocaron 10 g de CO, LR y CR (tamaño 3/16") secos en 20 mL de H_2O destilada en agitación durante 10 minutos. El pH se midió con un peachímetro portátil marca Oakton modelo Acorn series pH 6 y la conductividad eléctrica con un medidor portátil de agua de la marca Hanna Instruments modelo HI993310.

4.2. Tecnosuelo

4.2.1. Obtención de residuos

El CR triturado fue obtenido como donación por parte de la empresa CONCRETOS RECICLADOS S.A. DE C.V. ubicada en la alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México. La empresa procesa RCD cuya composición sea exclusivamente concreto, morteros, tabiques, bloques y adocretos, posteriormente son triturados a distintos tamaños de partícula. Se trabajó con tamaños de 1" (2.54 cm), la empresa lo denomina grava, y 3/16" (0.48 cm), se denomina arena, ambos tamaños de partícula se ilustran en la figura 4.1. Ambos tamaños de concreto contienen tamaños inferiores a su especificación; por lo que no presentan uniformidad, en la construcción del tecnosuelo estas diferencias no fueron tomadas en cuenta, el CR fue usado de manera directa.

Los LR fueron obtenidos de la PTAR de la empresa GEA Ambiental ubicada en Morelia, Michoacán de Ocampo. El afluente tratado son aguas negras de la propia empresa y de un negocio vecino de comida, el tratamiento consta de un reactor anaerobio y después pasa a un tanque aerobio (lodos activados). Los LR fueron obtenidos del tratamiento aerobio. Estos fueron colocados en un lecho de secado con una humedad del 94 % en peso, fueron deshidratados hasta aproximadamente un 50 % (ver fig. 4.2), posteriormente fueron utilizados en la construcción del



Figura 4.1: *Tamaños de partícula del concreto usado en la construcción del tecnosuelo 1" (izquierda) y 3/16" (derecha).*

tecnosuelo.



Figura 4.2: *Izquierda: Lodos residuales en lecho de secado. Derecha: Lodos residuales deshidratados.*

Para los materiales con valorización previa (ver fig. 4.3), la CO fue obtenida de un sistema casero de compostaje en la localidad de Morelia, Michoacán de Ocampo (ver fig. 4.3a). El BC usado fue de grado comercial de la marca Grow Depot (ver fig. 4.3b), se usó de manera directa sin importar el tamaño de partícula. Cabe señalar que el productor no especifica fuente de biomasa, ni temperaturas de operación del proceso de pirólisis.

4.2.2. Construcción del tecnosuelo

Se diseñaron mezclas combinando materiales orgánicos e inorgánicos. Las ocho combinaciones se muestran en la tabla 4.1 en cada combinación los artefactos del tecnosuelo tuvieron distintos porcentajes en volumen (v/v %). Aquellas combinaciones en las que el concreto fue



(a) Obtención de la composta (CO) de un sistema casero.



(b) Biocarbón de grado comercial marca Growth Depot.

Figura 4.3: Residuos orgánicos sometidos a valorización.

exclusivamente de 3/16” se denominó con la letra F (fino) y aquellas combinaciones en las que se combinó concreto de 1” y 3/16” se denominó G (grueso).

Artefacto inorgánico		Artefacto orgánico	
F (70)		CO (30)	
F (70)		CO (25)	BC (5)
F (85)		LR (15)	
F (85)		CO (10)	BC (5)
G (50)	F (20)	CO (30)	
G (50)	F (20)	CO (25)	BC (5)
G (50)	F (35)	LR (15)	
G (50)	F (35)	LR (10)	BC (5)

Tabla 4.1: Combinaciones de tecnosuelo y su porcentaje en volumen (v/v %) de cada artefacto.

El número de réplicas fue de cinco por cada combinación de tecnosuelo con y sin PGPB para cada especie vegetal, teniendo ochenta unidades experimentales por especie (cuarenta con PGPB y cuarenta sin PGPB). Acorde al v/v % los materiales fueron mezclados de manera uniforme de forma manual y colocados en macetas de 1 L (ver fig. 4.4).

Así mismo se tuvieron dos tratamientos de control con sustrato *peat moss* con y sin PGPB, teniendo un total de ciento ochenta unidades experimentales (noventa para *Z. mays* y noventa para *A. occidentalis*).

Los artefactos orgánicos e inorgánicos del tecnosuelo fueron esterilizados para evitar la presencia de microorganismos externos.

El CR de 1" y 3/16" se colocó por separado en un esterilizador de suelo marca PRO-GROW MODELO SS-30 a una temperatura de 170°C durante 48 horas.

Los componentes orgánicos (LR y CO) se esterilizaron en autoclave durante 1 hora a temperatura de 120 °C y presión 1.2 psi. El BC no fue esterilizado.



Figura 4.4: Combinaciones de tecnosuelo en macetas de 1 L.

4.2.3. Tecnosuelo con consorcio bacteriano

Los consorcios bacterianos usados en este experimento son los aislados 49 y 54 del proyecto de bacterias promotoras de crecimiento vegetal del Laboratorio de Restauración Ambiental del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES). Acorde a un estudio de perfil de ácidos grasos el aislado 49 se identifican como *Klebsiella oxytoca* y el aislado 54 como *Rhodococcus wratislaviensis*.

K. oxytoca y *R. wratislaviensis* se crecieron rutinariamente en cajas petri con agar nutritivo a 30°C y posteriormente fueron almacenadas a 4°C de manera semanal.

Las bacterias fueron crecidas en caldo nutritivo y colocadas en agitación a 150 rpm hasta

alcanzar una concentración de 10^6 UFC/ml, después se mezcló *K. oxytoca* y *R. wratislaviensis* en una relación 1:1 en volumen.

Con una pipeta se inocularon 3 mL de la suspensión combinada en los distintos tecnosuelos con las plantas *Z. mays* y *A. occidentalis*. Las inoculaciones fueron realizadas de forma semanal por dos meses y medio para los cultivos de *Zea mays* y por cuatro meses para *Albizia occidentalis*.

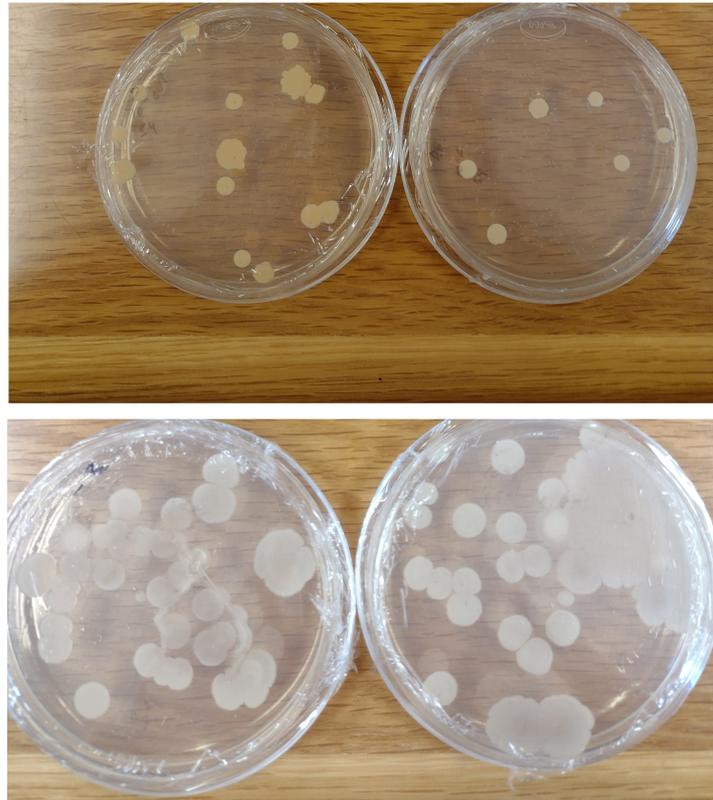


Figura 4.5: Bacterias utilizadas en el experimento *R. wratislaviensis* (aislado 54, arriba) *K. oxytoca* (aislado 49, abajo).

Dado a que los aislados bacterianos fueron usados de manera simultánea, se realizó un experimento de antagonismo. *K. oxytoca* 100 μ L de *R. wratislaviensis* fueron colocadas en 5 mL de caldo nutritivo en tubos de polietileno de manera aislada. Los tubos fueron colocados en agitación a 150 rpm a temperatura ambiente hasta tener una concentración 10^6 UFC/ml, posteriormente se colocaron 100 μ L de *K. oxytoca* y 100 μ L de *R. wratislaviensis* en cajas petri con agar, se dejó en interacción por otras 24 horas. Después se realizó un conteo de las colonias crecidas en las cajas de agar. El experimento se realizó por triplicado.

4.2.4. Selección y germinación de semillas

Se seleccionaron dos especies para evaluar su crecimiento en las combinaciones de tecnosuelo. Una de ellas fue *Z. mays* debido a que esta especie es un bioindicador frecuente para evaluar el desempeño de plantas bajo diferentes condiciones de crecimiento, además las PGPB usadas en este experimento ya han sido evaluadas con esta especie vegetal en el Laboratorio de Restauración Ecológica del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES). Los tecnosuelos tienen un uso potencial como sustrato en el reverdecimiento de zonas urbanas, por lo que pueden ser usados como sustratos en huertos urbanos y pueden ser una alternativa para asegurar la seguridad alimentaria en las ciudades [38].

A. occidentalis es la otra especie usada en este experimento. Las especies de este género son de gran importancia en México y América Central; son de rápido crecimiento, tienen la capacidad de fijar nitrógeno, estabilizan la erosión del suelo y poseen la capacidad de soportar condiciones desfavorables del suelo (como suelos anegados o con pH ácidos) por lo que han sido ampliamente estudiadas en el ámbito de la restauración ecológica [65, 66].

Las semillas de *Z. mays* y *A. occidentalis* fueron colocadas en cajas Petri con papel filtro húmedo y un antimicótico, se germinaron en cámaras de crecimiento para plantas marca Lumistell modelo ICP-18 a una temperatura de 25°C y períodos de 12 horas de luz y 12 de oscuridad. Una vez germinadas las semillas se trasplantaron a los tecnosuelos.

En el caso de tecnosuelo con PGPB se dio un tratamiento pregerminativo de desinfección a ambas semillas, con base en la siguiente metodología:

- Lavado de semillas con agua destilada estéril dos veces;
- agitación con etanol al 95 % durante dos a tres minutos;
- enjuagado con agua destilada estéril dos veces;
- agitación con cloro al 10 % durante dos a tres minutos;
- lavado de semillas con agua destilada estéril de dos a cuatro veces.

Posteriormente se colocaron en una suspensión bacteriana 1:1 de *K. oxytoca* y *R. wratislaviensis*, con una concentración de 10^6 UFC/ml, en agitación a 150 rpm por 24 horas. Después se siguió la metodología ya descrita para su germinación.

4.2.5. Seguimiento del experimento

El experimento se llevó a cabo en una casa sombra del IIES en el mes de junio. Se midió la precipitación semanal y se complementó con riegos en semanas con poca lluvia.

Se realizaron mediciones de las alturas de todos los individuos de *Z. mays* y *A. occidentalis* de manera quincenal.

Así mismo se midió el valor de la clorofila de cada individuo en la última semana de los experimentos con un medidor de clorofila marca Apogee modelo MC-100.

Al término del experimento se midió la longitud de las raíces.

De igual forma se midió la biomasa de la raíz y de la parte aérea, tanto su masa húmeda como seca. En el caso de la biomasa seca se secó en un horno de resistencia a una temperatura de 60°C.

4.2.6. Propiedades químicas

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de los distintos artefactos, se midió de manera semanal el pH y la CE de los lixiviados de todos los tecnosuelos en el período ya descrito. El pH se midió con un peachimetro portátil marca Oakton modelo Acorn series pH 6. Para la CE en lixiviados se usó un medidor portátil de agua de la marca Hanna Instruments modelo HI993310.

De igual manera se midió la CE del tecnosuelo de forma directa con un medidor portátil de actividad de suelo de la marca Hanna Instruments modelo HI993310.

Capítulo 5

Resultados y discusión

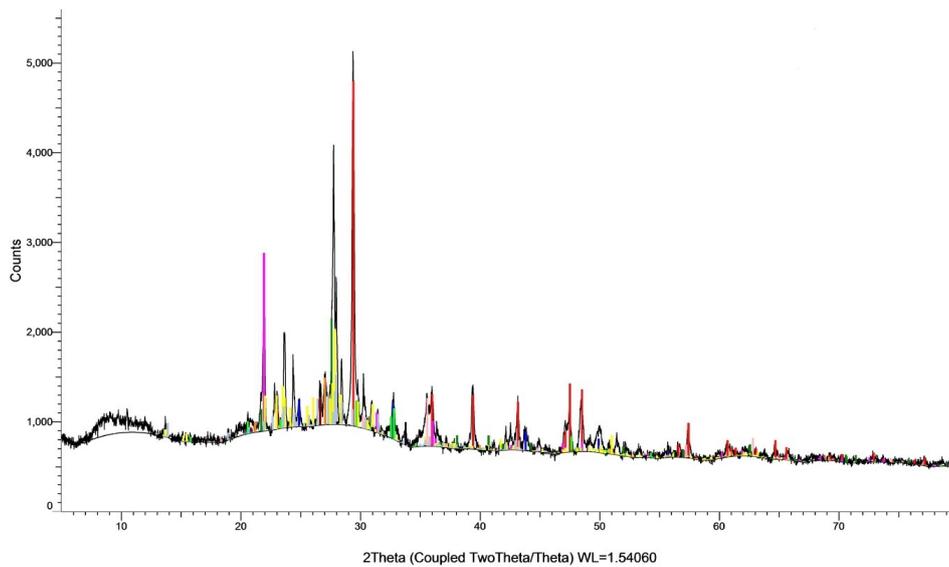
5.1. Componentes del tecnosuelo

5.1.1. Análisis químico Concreto

Diferentes estructuras cristalinas fueron encontradas en el CR reciclado de la empresa CONCRETOS RECICLADOS S.A. DE C.V. Los resultados obtenidos por DRX se muestran en la figura 5.1a, las fases cristalinas y sus tarjetas cristalográficas fueron obtenidas con la base de datos Crystallography Open Database.

Los resultados contrastan con lo encontrado por Moreno-Pérez et al. (2018), quienes encontraron calcita, feldespatos, piroxenos, cristobalita, tobermorita, hemicarboaluminato de calcio y rosenhahnita, en tamaños de CR $<75 \mu\text{m}$. La diferencia en las fases cristalinas encontradas se puede atribuir a la heterogeneidad de los materiales que alimentan el proceso de reciclaje y que claramente no son del mismo origen.

No obstante, se pudo encontrar estructuras cristalinas características del proceso como cementantes, en particular el CaCO_3 , el cual se encontró con polimorfismo. Las fases encontradas fueron calcita y vaterita, siendo la primera fase la más estable. Si bien el CaCO_3 no es un producto final de las reacciones de hidratación del cemento, si es el resultado de la carbonatación de algunos componentes finales de esas reacciones, especialmente del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y de los silicatos de calcio hidratados (C-S-H) [67]. El proceso de carbonatación ocurre cuando estos compuestos



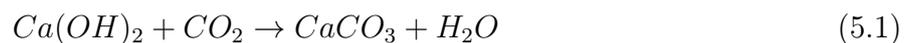
(a) Patrón de difracción del concreto con tamaño de partícula <math>< 40 \mu\text{m}</math>.

■	COD 2100189 CCaO3
■	COD 9007475 CCaO3 Vaterite
■	COD 9012681 Ca2O4Si Calcio-olivine
■	COD 9008110 O2Si Cristobalite
■	COD 9000775 O2Si Quartz
■	COD 9000776 O2Si Quartz
■	COD 9000779 O2Si Quartz
■	COD 9005022 O2Si Quartz
■	COD 9000681 AlK0.2Na0.8O8Si3 Albite
■	COD 9000361 Al2CaO8Si2 Anorthite
■	COD 7228110 Fe3O4 Magnetite
■	COD 9002507 Al1.942Fe0.49Mg2.658O12Si2.91

(b) Fases cristalinas encontradas en el concreto con tamaño de partícula <math>< 40 \mu\text{m}</math>.

Figura 5.1: Caracterización del concreto por técnica de difracción de rayos X.

son expuestos al CO_2 atmosférico (ver ecuación 5.1), si bien es un ciclo natural de la cal, en la ingeniería civil se busca evitar a toda costa, ya que conlleva a situaciones críticas y afecta directamente las propiedades del concreto [67].



Si bien, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ posee estructura cristalina definida (portlandita) no fue detectada en ninguna muestra, como lo reportado por Moreno-Pérez et al. (2018), probablemente se debe a las cantidades pequeñas en las que se pueda encontrar debido al proceso de carbonatación. Debe enfatizarse que las cantidades generadas de CaCO_3 por la carbonatación durante su vida

Composición	Estructura cristalina	MA1 %	MB1 %	MC1 %
SiO_2	Cuarzo	12.2	13.2	14.2
SiO_2	Cristobalita	4.8	6.8	6.6
Ca_2SiO_4	Calcio-olivino	6.4	5.7	8
$K_{0.2}Na_{0.8}AlSi_3O_8$	Albita	33	26.2	20.3
$CaCO_3$	Vaterita	8.3	7.4	8.4
$CaCO_3$	Calcita	15.1	19.4	18.6
$CaAl_2Si_2O_8$	Anortita	17.5	17.4	20.6
Fe_3O_4	Magnetita	1.4	1.6	1.5
$Mg_{2.658}Al_{1.942}Fe_{0.49}Si_{2.91}O_{12}$		1.3	2.3	1.8

Tabla 5.1: Porcentaje en peso de las distintas fases cristalinas presentes en el concreto $<40 \mu m$ de distintas muestras.

útil y el tiempo de almacenado como concreto reciclado se desconocen [68].

En la tabla 5.1 se presentan las fases cristalinas con sus porcentajes en peso. Se observan las mismas fases en las tres muestras con ligeras variaciones en sus porcentajes. En el caso del SiO_2 se encontraron polimorfos: cuarzo y cristobalita. Para la fase de cuarzo se reporta un porcentaje total de la fase, sin embargo, es la suma de las diferentes tarjetas encontradas para diferentes celdas cristalinas de cuarzo.

Se detectó la presencia de minerales como feldespatos (albita y anortita) y neso silicatos (calcio-olivino) que son constituyentes comunes de ciertas rocas usadas como aditivos, de igual manera el SiO_2 proviene de los aditivos del concreto. Dado que los agregados en el concreto representan del 70-80 % en volumen [69], es de esperar altas concentraciones en la composición del concreto reciclado. La albita y la cristobalita reflejan el contexto geológico de la procedencia de las rocas de zonas mineras cercanas a la CDMX [68]. La presencia de magnetita en el concreto se puede atribuir a la oxidación de las barras de acero, los óxidos de hierro se acumulan en la interfase del agregado y del concreto [70].

La caracterización química por EDS se realizó para cuantificar elementos presentes en el CR que posiblemente no fueron detectados en DRX por no poseer una estructura cristalina o que por su poca concentración fuera difícil su cuantificación. Las discusiones de la superficie por BSE se realizarán en la sección de morfología del concreto.

La portlandita fue una fase cristalina que no se detectó en DRX. La portlandita posee

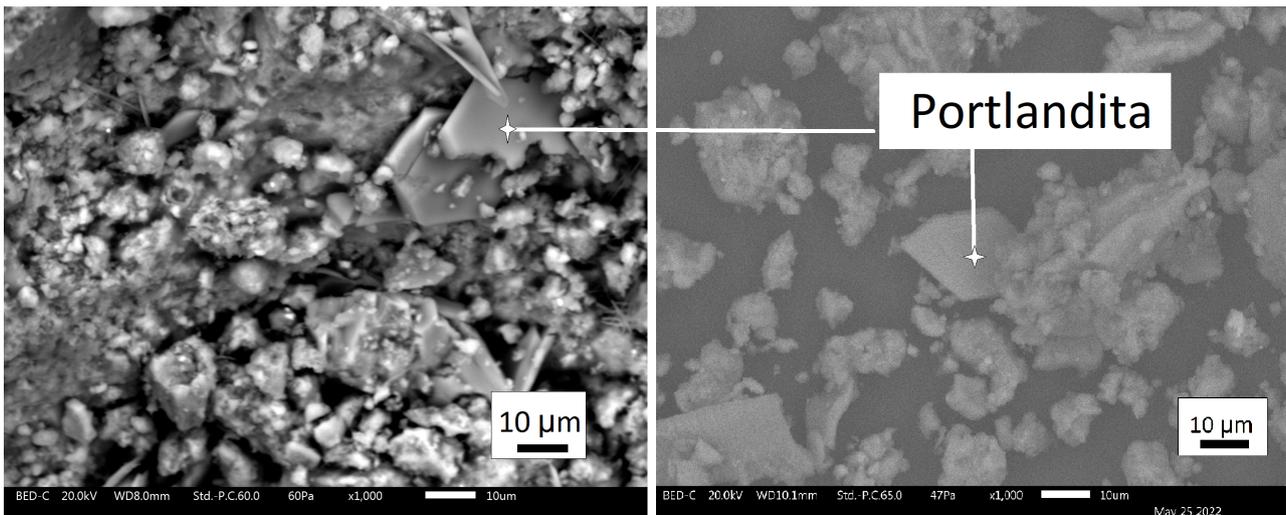


Figura 5.2: Detección de portlandita por BSE en distintos tamaños de partícula. Izquierda: Concreto reciclado 0.5 cm. Derecha: Concreto reciclado <math><44 \mu\text{m}</math>.

un sistema cristalino hexagonal y se logró su observación por BSE (ver fig. 5.2). En la figura se observan dos hexágonos (uno encima del otro) con evidentes fracturas y que por su alto contenido en calcio y oxígeno se pueden asociar a la portlandita. Las fracturas se pueden atribuir a los esfuerzos sometidos en el proceso de trituración.

El mapeo químico por la técnica EDS muestran la presencia de elementos con variaciones en sus concentraciones en muestras de CR 0.4-0.6 cm (ver fig. 5.3) y de <math><44 \mu\text{m}</math> (ver fig. 5.4). De los mapeos químicos se observa que el calcio y silicio son los elementos que más abundan, acompañados de concentraciones pequeñas de distintos elementos. De los elementos presentes, el Ca, Cl, Mo, Mn y Fe son micronutrientes para el desarrollo óptimo de las plantas [71].

Con los resultados obtenidos se puede predecir ciertas reacciones químicas que pueden ocurrir en el tecnosuelo. Un posible proceso es la solubilización del calcio presente en el CaCO_3 debido CO_2 disuelto en agua (ácido carbónico), lo que eventualmente conlleva a una precipitación del bicarbonato de calcio (ver ecuaciones 5.2 y 5.3), gracias a este proceso en la naturaleza se forman las estalagmitas y estalactitas.



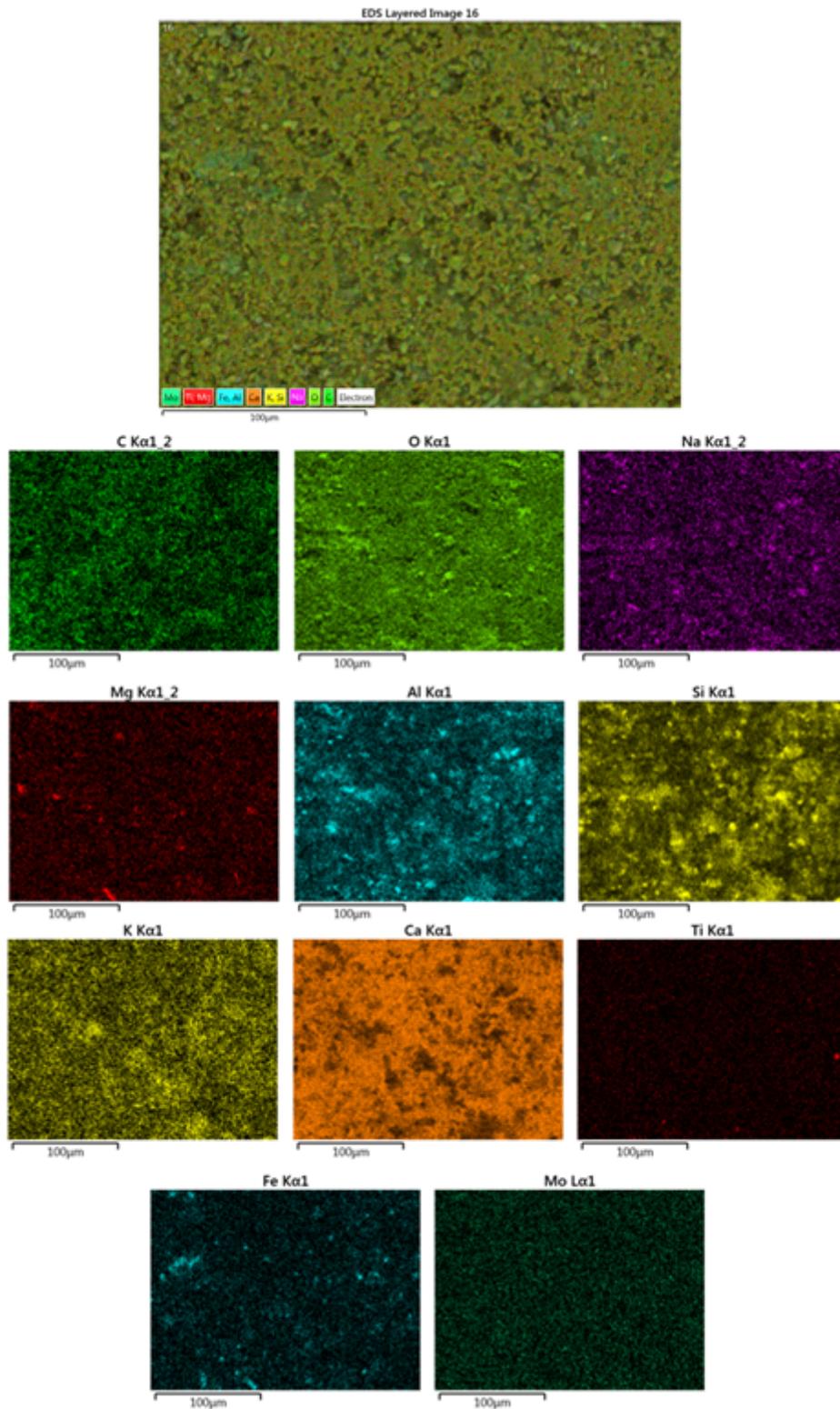


Figura 5.3: Mapeo químico elemental por EDS de un concreto con tamaño 0.4 cm.

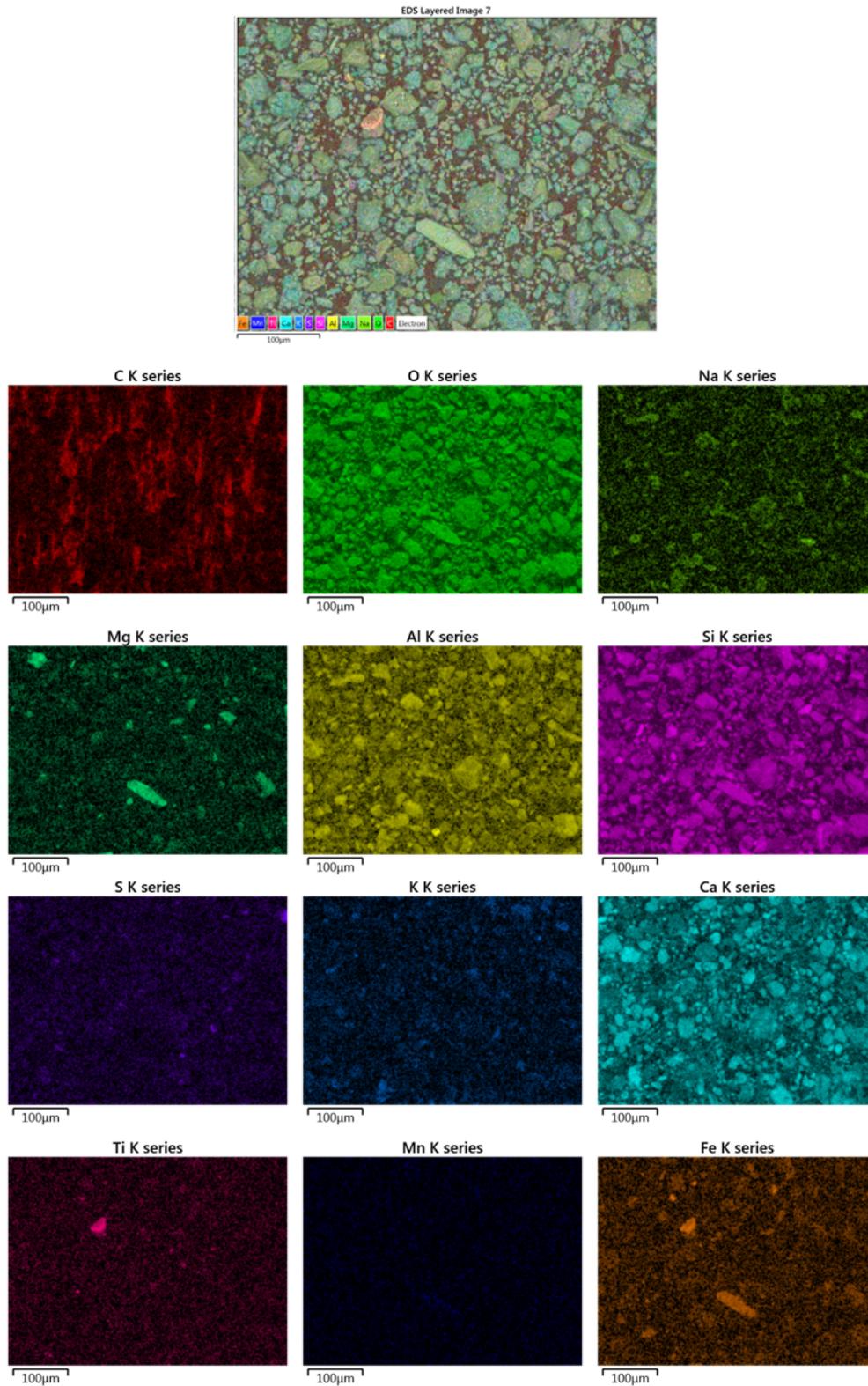


Figura 5.4: Mapeo químico elemental por EDS de concreto con tamaño de partícula $<44 \mu\text{m}$.

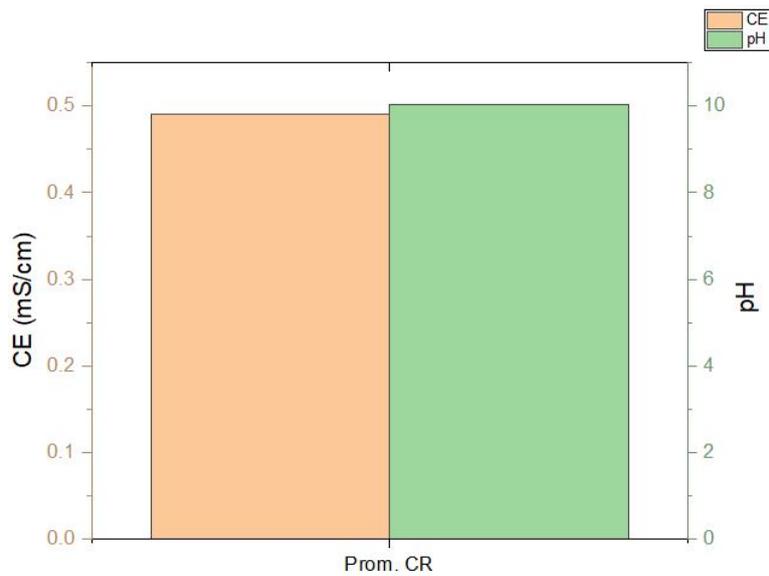


Figura 5.5: Valores promedio de pH y conductividad eléctrica del concreto fino.



Otro posible interacción química es que en los suelos naturales con altas concentraciones de Ca^{2+} puede reaccionar con fósforo formando fosfato cálcico, el cual, no es disponible para la plantas (ver ecuación 5.4) [72].



Por último, las mediciones de pH y CE se realizaron por duplicado, los resultados promedio se presentan en la figura (ver fig. 5.5). El CR presenta un pH alcalino (10.04 y 9.94). Los altos niveles de pH en el CR se pueden atribuir a álcalis solubles (Na y K), también a la presencia de $Ca(OH)_2$, los altos niveles de pH se pueden atribuir a su presencia, esto debido a la disociación de iones Ca^{2+} y OH^- en medio acuoso [68]. Los valores de la CE fueron bajos (0.93 dS/m y 0.78 dS/m) en comparación con la MO, esto, se puede atribuir a la lenta solubilidad de los iones presentes en el CR.

5.1.2. Análisis químico materia orgánica

Las especies vegetales responden directamente a factores del suelo como pH, CE y los macronutrientes presentes, como carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P) que pueden ser limitantes para su desarrollo. Los valores de los macronutrientes de la MO se presentan en la figura 5.6. Los valores promedio del pH y CE se presentan en la figura 5.7.

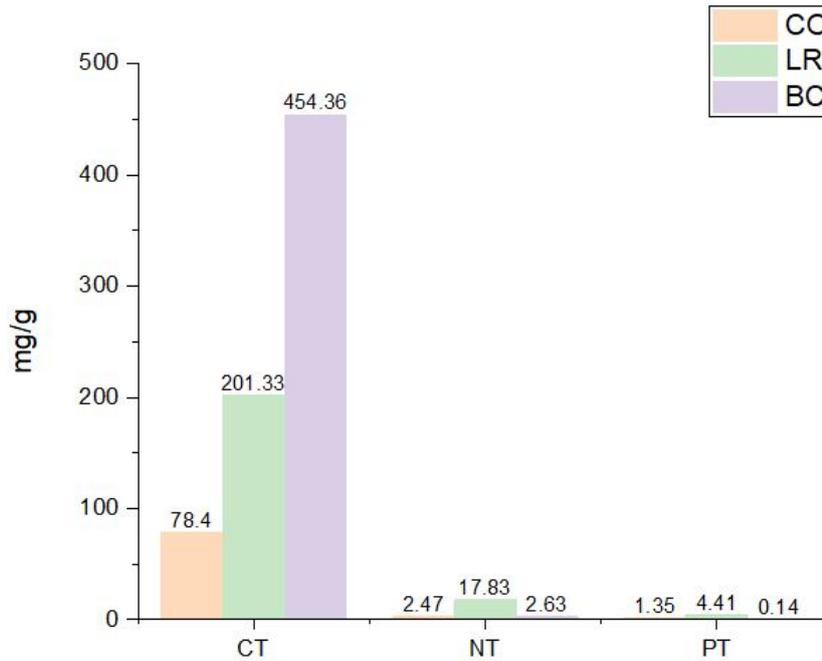


Figura 5.6: Cuantificación de nutrientes esenciales en los distintos artefactos orgánicos.

La CO presenta valores altos en su relación C:N (28.1 y 38.8), se encuentran por arriba de los valores establecidos en la NMX-AA-180-SCFI-2018 [73], la relación óptima debe de ser <25 , valores de pH (7.65 y 7.63) y CE (4.08 y 4.47 dS/m) si cumplen con los parámetros de calidad de composta. La alta relación C:N puede ser por la falta de control de los materiales que alimentan al proceso de compostaje casero.

El pH de los LR es ligeramente ácido (6.19 y 6.20) con altos valores de CE (10.30 y 9.08 dS/m), probablemente por la alta presencia de microorganismos y la segregación de ácidos orgánicos. Los valores de nutrientes (N y P) más altos fueron detectados en los LR, probablemente se debe a los múltiples microorganismos presentes en él y su contacto con descargas de aguas residuales, coincidente con los altos valores de CE, por lo que es un residuo sumamente

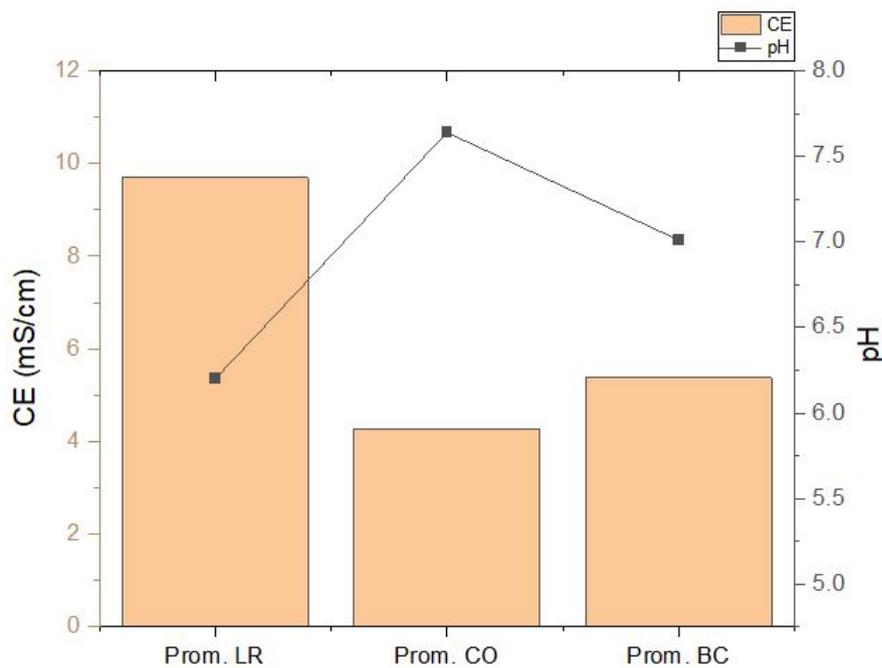


Figura 5.7: *Propiedades químicas medidas en los artefactos orgánicos.*

útil para uso agrícola o forestal, o bien para la construcción de tecnosuelos. Su relación C:N fue de 11.5 y 11.1 debido a su alto contenido en N. Si bien, su uso en la aplicación como biosólidos se encuentra regulada por la legislación ambiental NOM-004-SEMARNAT-2002 [56], esta, solo se orienta en la cantidad de patógenos y metales pesados. Dada la cantidad significativa de P que contiene, su aplicación en suelo debe ser tomada en cuenta con los requerimientos por las plantas, esto con el fin de prevenir la lixiviación de P, su aplicación de forma excesiva en el suelo podría ser fuente de eutrofización en aguas subterráneas [74].

Como es de esperar el BC, debido a su naturaleza de biomasa sometida a pirólisis, es el que valores más altos de C y bajos de N su relación fue de 233.4 y 139.1, presentando valores altos de CE (5.74 y 5.01 dS/m) y un pH ligeramente básico (7.15 y 6.87). Por su alto contenido en carbono y su porosidad, este material puede funcionar como un microhábitat para microorganismos como los PGPB [75].

Los artefactos orgánicos presentan altos valores de CE debido a la gran cantidad de iones disponibles para el desarrollo de la vegetación, en comparación con el aporte inorgánico. Todos los artefactos orgánicos presentaron un pH neutro.

5.1.3. Ensayo de antagonismo de *Klebsiella oxytoca* y *Rhodococcus wroatislaviensis*

Los resultados del ensayo de antagonismo entre ambos aislados bacterianos se presentan en la tabla 5.2. De los promedios de las tres repeticiones del ensayo, se observa que de ambas bacterias, *K. oxytoca* fue la que mejor crecimiento tuvo (aproximadamente un 87% de las UFC corresponden a este aislado). En la sección de crecimiento de las especies vegetales se analizan los resultados de la interacción consorcio-planta, los cuales presentaron buen crecimiento en la presencia del consorcio en tecnosuelo y peat moss, por lo que las diferencias significativas por discutir se pueden atribuir a *K. oxytoca*.

Experimento	UFC <i>K. oxytoca</i>	Error estándar	UFC <i>R. wroatislaviensis</i>	Error estándar
Repetición 1	1.60×10^9		2.30×10^8	
Repetición 2	6.86×10^9		9.50×10^8	
Repetición 3	4.20×10^9		4.80×10^8	
Promedio	4.22×10^9	$\pm 1.52 \times 10^9$	5.53×10^8	$\pm 2.11 \times 10^8$

Tabla 5.2: Crecimiento de *K. oxytoca* y *R. wroatislaviensis* en ensayo de antagonismo en concentración 10^{-4} .

5.2. Crecimiento de especies vegetales en el tecnosuelo

Los datos recopilados de 2.5 meses para *Z. mays* y 4 meses para *A. occidentalis*, se analizaron con el software R (R Core Team 2021) mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) para conocer las diferencias significativas (*P \leq 0.05 **P < 0.01 ***P < 0.001) de los distintos tratamientos. Los datos analizados corresponden a las mediciones de la biomasa del follaje y raíz seca, alturas, contenido en clorofila final y longitud de la raíz.

Para realizar el análisis estadístico se definió como textura al aporte inorgánico; ya sea Concreto Grueso (G) o Fino (F). CO y LR se definieron como MO (materia orgánica). Cuando el BC estuvo presente en el tecnosuelo se definió como: con y sin. Si hubo presencia del consorcio bacteriano se representó con un *si* y cuando no se inoculó consorcio se representó con *no*, el

Código	Textura	Materia orgánica	Biocarbón	Consortio
A	F	CO	Sin	No
B	F	CO	Sin	Si
C	F	CO	Con	No
D	F	CO	Con	Si
E	F	LR	Sin	No
F	F	LR	Sin	Si
G	F	LR	Con	No
H	F	LR	Con	Si
I	G	CO	Sin	No
J	G	CO	Sin	Si
K	G	CO	Con	No
L	G	CO	Con	Si
M	G	LR	Sin	No
N	G	LR	Sin	Si
O	G	LR	Con	No
P	G	LR	Con	Si

Tabla 5.3: Código de letras asociados a cada combinación de tecnosuelo.

consorcio se abrevió como *BAC*.

Distintos códigos de letras fueron empleados para las distintas combinaciones de tecnosuelo, los códigos van de la letra A a la letra P. Los códigos asociados a cada combinación se presentan en la tabla 5.3.

5.2.1. Crecimiento de *Zea mays*

La supervivencia de *Z. mays* fue alta en los tecnosuelos (95.5 – 100 %). Hubo un individuo muerto en el tecnosuelo C, dos muertos en D y uno en H. Es de señalar que donde hubo más individuos muertos fue en donde había tratamiento con BAC, esto, probablemente se deba a algún tipo de estrés en la planta, ya que estuvo sometida a un estrés por las condiciones químicas del tecnosuelo; estuvieron muy por encima de lo normal, como se explicará en la siguiente sección, sumado a la presencia de un agente externo, la planta pudo detectarlo como un agente perjudicial.

En la tabla 5.4 se presentan los factores (BAC, BC, MO y textura) que tuvieron diferencias significativas en las variables explicativas (biomasa de follaje y raíz, altura final y contenido

Factor	Altura final		Clorofila		Biomasa follaje		Biomasa raíz	
	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P
Textura	989.65	1.58E-09	23.87	1.36E-06	88.67	7.90E-15	286.81	9.5E-08
BAC	547.19	1.96E-06	—	—	5.85	1.20E-02	96.97	8.58E-04
BC	761.22	5.01E-08	—	—	20.03	1.04E-05	124.19	1.91E-04
MO	874.01	8.74E-09	51.95	5.56E-11	46.86	5.04E-10	205.68	3.31E-06

Tabla 5.4: Valores del análisis ANOVA para altura final, contenido de clorofila, biomasa del follaje y raíz en la especie vegetal *Z.mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

Factor	Longitud de la raíz	
	Sum Sq	P
Textura	1564.46	4.86E-10
BAC	215.41	8.38E-03
BC	625.94	1.79E-05
MO	1603.17	3.37E-10

Tabla 5.5: Valores del análisis ANOVA para la longitud de la raíz en la especie vegetal *Z. mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

de clorofila). Todos los factores del tecnosuelo tuvieron diferencias significativas en las distintas variables explicativas, la excepción fue BC y BAC en el contenido de clorofila. A continuación, se explican los resultados que cada factor influenció en las variables.

La textura fue el factor más significativo en la altura final ($P = 1.58E - 09$), los valores de las medias en la semana 10 de aquellos tecnosuelos con Textura G fue de 41.67 cm, los cuales, estuvieron por encima de los valores de las Texturas F, estos presentaron valores promedio de 34.64 cm. Así mismo, la textura resultó significativa en la biomasa del follaje ($P = 7.90E - 15$),

los valores de las medias con Textura G fueron de 3.97 g y con Textura F de 1.87 g, en el caso de la raíz, el valor de P fue menos significativo ($P= 9.5E - 08$) que para la biomasa de follaje, los valores de las medias en las raíces con Textura G fueron de 5.87 g y 2.08 g con Textura F. La textura tuvo diferencia significativa en la clorofila, teniendo mejores valores los de la Textura F ($5.56 \mu\text{mol}/\text{m}^2$) que con G ($4.46 \mu\text{mol}/\text{m}^2$).

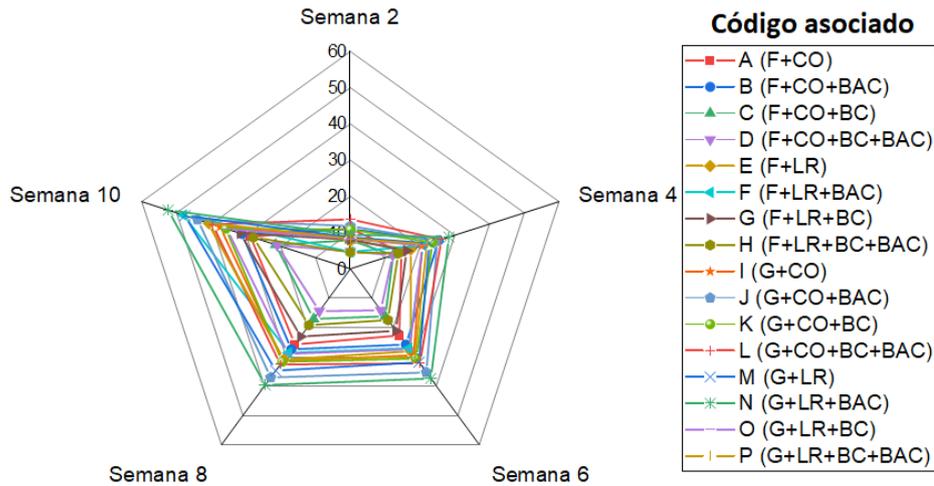
BAC influyó en la altura final ($P= 1.957E - 06$) teniendo valores más altos en su presencia (40.77 cm) que cuando no se inoculó (35.54 cm). En el caso de las biomásas BAC presentó un valor más significativo en la raíz ($P= 8.58E - 04$) que en el follaje ($P= 1.20E - 02$), en ambas biomásas promedio los valores fueron más altos con la inoculación de BAC. Los valores fueron de 5.08 g para la raíz y 3.19 g para el follaje, a diferencia de los valores sin BAC, 2.88 g y 2.65 g respectivamente.

El BC tuvo valores de mayor significancia en las mismas variables que BAC; altura final ($P= 5.01E - 08$), biomasa de follaje ($P= 1.04E - 05$) y raíz ($P= 1.91E - 04$). En *Z. mays* la presencia del BC fue negativa en todos los aspectos. Para la altura final sin BC las medias fueron de 41.24 cm, con BC los valores fueron de 35.07 cm. En la biomasa del follaje con BC la media fue de 2.42 g y sin BC de 3.42 g. Por último, los valores de la biomasa de la raíz, sin BC fueron de 5.22 g y con BC de 2.73 g.

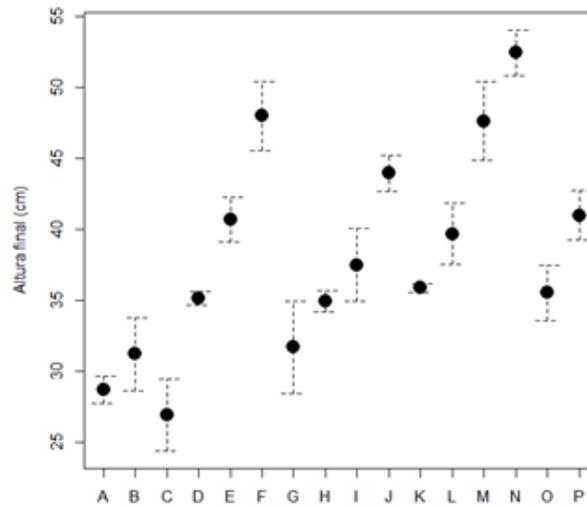
La MO tuvo diferencias significativas en todos los tratamientos, al igual que la textura, pero con valores ligeramente mayores de P. Los mejores valores se obtuvieron cuando la materia orgánica fue LR. En el crecimiento ($P= 8.742E - 09$) los valores más altos fueron con LR (41.46 cm) que con CO (34.85 cm). De la misma forma LR mejoró los valores de la clorofila ($5.82 \mu\text{mol}/\text{m}^2$) comparados con la CO ($4.20 \mu\text{mol}/\text{m}^2$). La biomasa de follaje y de raíz con LR (3.68 g y 5.58 g, respectivamente) estuvieron por encima de los de CO (2.15 g y 2.37 g, respectivamente).

A continuación, se muestran las gráficas de las medias de las variables explicativas por combinación de tecnosuelo.

En la figura 5.8a se observa el crecimiento durante el tiempo que duró el experimento. Para el caso de la altura final los tecnosuelos M (G + LR) y N (G + LR + BAC) presentaron las



(a) Crecimiento semanal en las distintas combinaciones de tecnosuelo.



(b) Valores promedio de la altura final en las distintas combinaciones de tecnosuelo.

Figura 5.8: Crecimiento de *Z. mays* en tecnosuelo.

alturas más grandes, con un promedio de 47.58 cm y 52.42 cm (ver fig. 5.8), lo cual concuerda con los datos ANOVA. Los tecnosuelos con Textura F se mantuvieron por debajo de la media de aquellos con Textura G, con excepción del tecnosuelo F (F + LR + BAC); probablemente por su contenido de LR y la adición de BAC. La altura promedio más baja es de aquellos tecnosuelos con Textura F y CO (ver fig. 5.8b). En la figura 5.8b se observa que en todos los tratamientos hay una tendencia en la disminución de la altura cada que el BC es agregado, cuando se adiciona BAC al tratamiento con BC, sin importar la textura y la MO, la altura aumenta ligeramente.

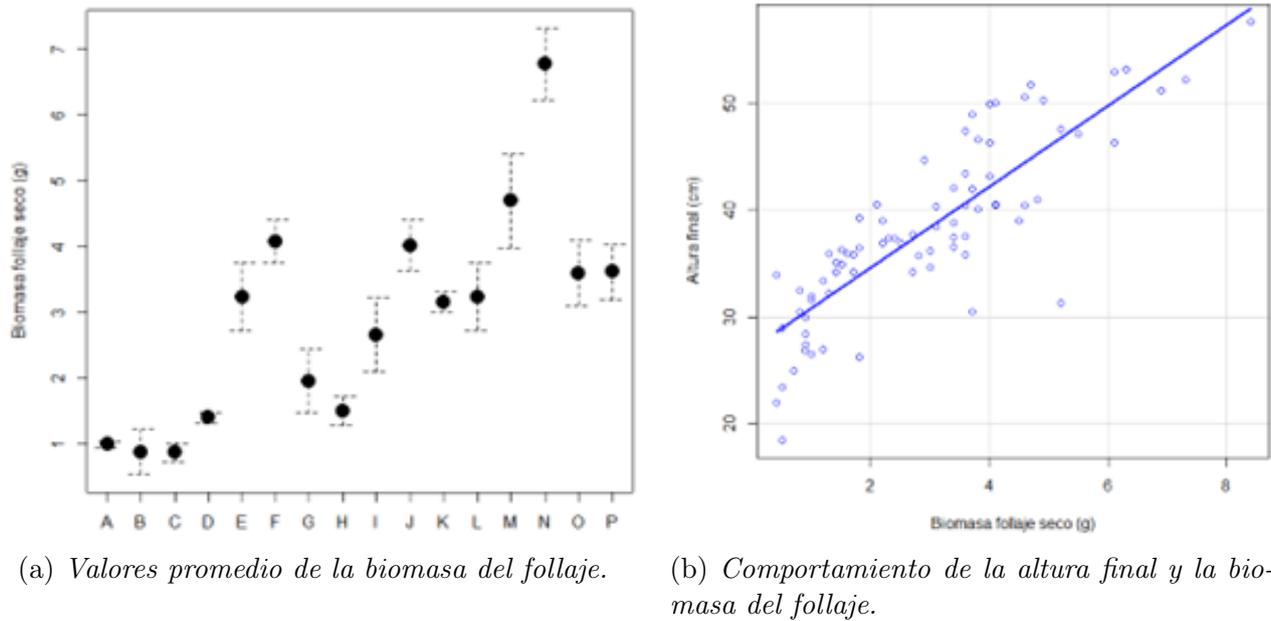
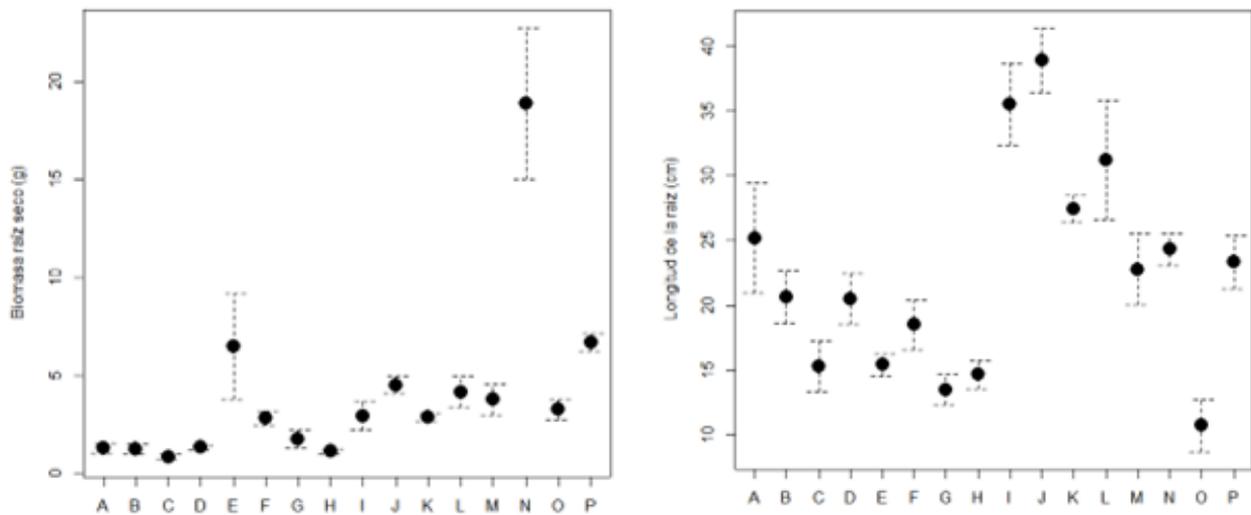


Figura 5.9: Comportamiento de la biomasa del follaje de *Z. mays* en las distintas combinaciones de tecnosuelo.

Para la biomasa del follaje se observa un comportamiento similar a la altura final (ver fig. 5.9), así mismo, estas dos variables presentan un comportamiento lineal positivo, como se observa en la figura 5.9b. En la figura 5.9a se observa que los tecnosuelos de la derecha (I-P) presentan mejores valores por su Textura G. Los valores de la biomasa del follaje más altos fueron en los tecnosuelos M (4.70 g) y N (6.78 g). Los valores más bajos fueron los de la Textura F con CO, se observa que la adición de BC o BAC no tuvo gran influencia en este grupo de tecnosuelos (A-D). Por otra parte, se observa que los tecnosuelos E (3.24 g) y F (4.08 g) son los más altos del grupo Textura F, probablemente por el contenido de macronutrientes de los LR y la adición de BAC (para el tecnosuelo F), en las mismas combinaciones al adicionar BC (tecnosuelos G y H) las alturas decaen.

Hablando de la altura y la biomasa del follaje los mejores factores fueron la Textura G, LR y BAC.

Con el fin de entender el comportamiento de las raíces se presentan en la tabla 5.5 los datos de ANOVA para esta variable acorde a cada factor. La longitud se influenció principalmente por la MO, presentando los valores más altos con CO (26.86 cm) que con LR (17.90 cm). La textura fue el segundo factor más significativo, los valores con Textura G (26.80 cm) estuvieron



(a) Valores de la media de la biomasa de la raíz. (b) Valores de la media de la longitud de la raíz.

Figura 5.10: Comportamiento de la raíz de *Z. mays* en las distintas combinaciones de tecnosuelo.

por encima de las Texturas F (17.95 cm). Seguido fue el BC, sin BC la longitud fue de 25.18 cm y con BC de 19.58 cm. Por último, las longitudes en tecnosuelos con BAC aumentaron, con valores de 24.02 cm, comparado con 20.74 cm cuando no hubo inoculación.

En la figura 5.10 se muestran las medias de la biomasa de la raíz y la longitud. Se observa que los tecnosuelos con Textura G (I-P) tuvieron las longitudes más grandes (ver fig. 5.10b), debido al aumento en la porosidad del suelo, también se observa que los grupos con LR (tecnosuelos E-H y M-P) son los más cortos como lo descrito anteriormente. Algo relevante es que en los tecnosuelos con BC, sin importar la textura, disminuyó la longitud, contrario a lo esperado. En la figura 5.10a se observa el comportamiento de la biomasa de la raíz. Se observa que no necesariamente las raíces más grandes poseen la mayor biomasa, por ejemplo, el tecnosuelo N, posee el valor más grande de biomasa de raíz 18.90 g y una longitud de 24.34 cm, y el tecnosuelo con la longitud más alta 38.98 cm (tecnosuelo J, G + CO + BAC) posee una biomasa de 4.50 g. Esta diferencia entre longitud y biomasa se aprecia en los gráficos de dispersión de la figura 5.11, en ellos se relacionó la longitud y biomasa de la raíz con los factores que mayor significancia tuvieron en esta variable (textura y MO). La tendencia es más observable en el diagrama según la MO.

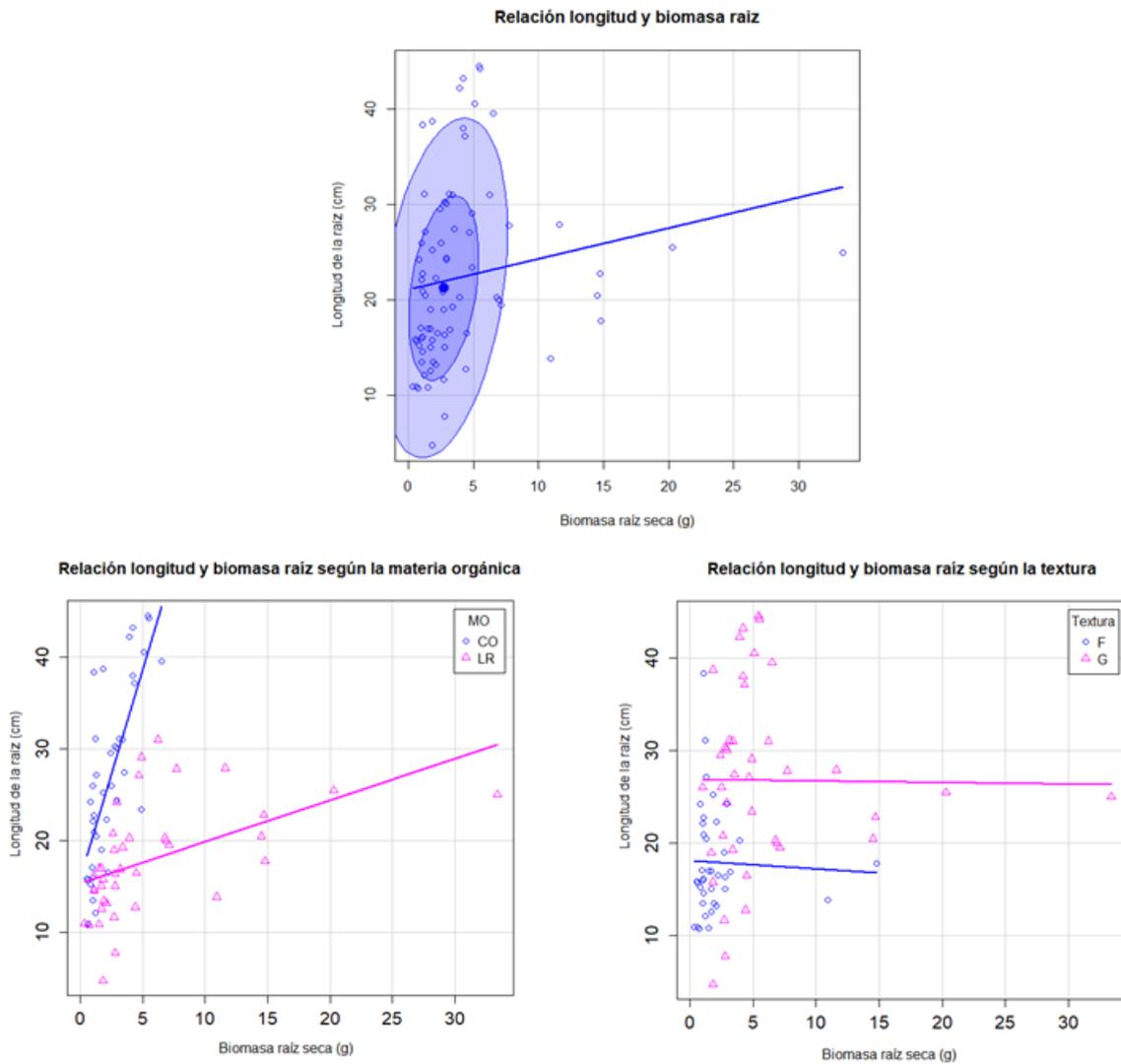


Figura 5.11: Relación entre la longitud de la raíz y contenido de biomasa de *Z. mays* en tecnosuelo.

En la figura 5.12 se observa el comportamiento de la clorofila, el cual, se vio afectado principalmente por la MO. Es de resaltar que los tecnosuelos con mayores alturas y mejores contenidos en biomasa como el tecnosuelo N, no presenta los valores más altos de clorofila ($5.02 \mu\text{mol}/\text{m}^2$). El valor más alto fue en el tecnosuelo G (F + LR + BC) con $6.69 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ y F (F + LR + BAC) con $6.60 \mu\text{mol}/\text{m}^2$. Esto se puede deber a que el contenido en clorofila se afecta directamente por el nitrógeno presente en el suelo [76]; por lo que los LR presentaron mejores valores en el contenido de clorofila. Los valores más bajos fueron en K (G + CO + BC) y L (G + CO + BC + BAC) con $3.24 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ y $3.22 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, respectivamente. Se observa un

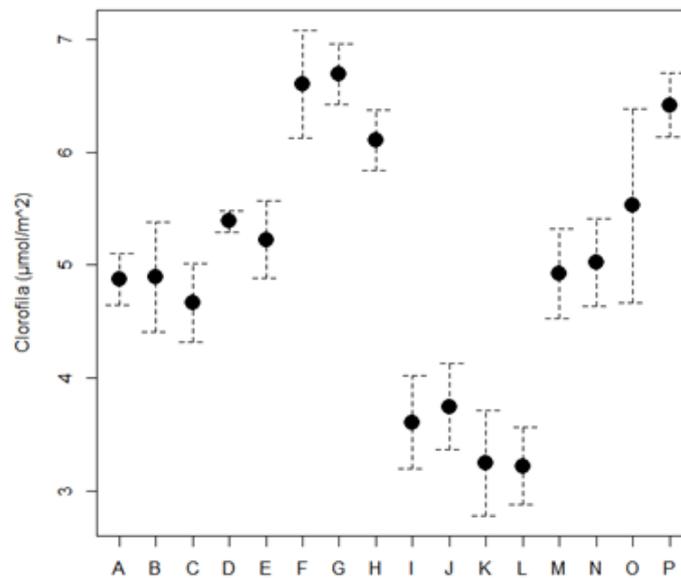


Figura 5.12: Valores promedio del contenido de clorofila ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) de *Z. mays* en las distintas combinaciones de tecnosuelo.

agrupamiento de los valores por textura y su MO, lo cual, concuerda con los datos del ANOVA. Por otra parte, se había visto que los tratamientos con Textura F no figuraron en las biomásas ni en su altura final, pero si lo hicieron en los valores de clorofila. Una posible explicación es que la salinidad aumenta el estrés hídrico en las plantas [77], a su vez se ha descrito que el estrés hídrico aumenta el contenido de clorofila [78]. Otra posible explicación es el exceso de Ca^{2+} en los tecnosuelos con Textura F, se ha estudiado la relación positiva entre el calcio y el aumento de la producción de clorofila [79, 80], por lo que probablemente la solubilización del calcio debido al aumento del área superficial en la Textura F pueda estar ayudando al contenido de clorofila.

En cuanto al sustrato control, se presentan los cinco gráficos de las variables explicativas y su factor BAC. Aunque los valores promedio del Control *Z. mays* con BAC estuvieron ligeramente por encima (para la clorofila: $8.61 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, longitud de raíz: 63.34 cm y biomasa del follaje: 26.62 g) en ninguna variable hubo diferencias significativas, comparado con las medias del Control sin inoculación de BAC (para la clorofila $8.07 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, longitud de raíz: 52.38 cm y biomasa del follaje: 25.18 g). Para la biomasa de la raíz las medias de Control + BAC (27.56 g) se encuentran por debajo del Control (28.98 g), pero tampoco fue significativo. Los valores de

Factor	Altura final		Clorofila		Biomasa follaje		Biomasa raíz	
	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P
Textura	34.72	1.24E-05	—	—	0.21	6.08E-04	0.04	5.18E-03
BAC	6.11	5.11E-02	—	—	0.11	1.04E-02	0.02	5.34E-02
BC	7.50	3.11E-02	—	—	—	—	—	—
MO	—	—	93.60	1.20E-04	—	—	0.02	4.98E-02

Tabla 5.6: Valores del análisis ANOVA para altura final, contenido de clorofila, biomasa del follaje y raíz en la especie vegetal *A. occidentalis*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

las alturas variaron mucho en la inoculación de BAC, el intervalo de crecimiento del Control + BAC fue [91.9 cm, 81 cm], por otra parte, el rango de crecimiento del Control sin BAC fue [88 cm, 79.7 cm], si bien el intervalo de las alturas aumentó con BAC, esto no representó diferencias significativas en el valor de sus medias, para BAC fueron de 85.84 cm y sin BAC de 86.08 cm.

Comparando las alturas y biomasa del follaje del sustrato control de *Z. mays* con el tecnosuelo de mejor valor (tecnosuelo L), *Z. mays* creció el 61% y tuvo el 27% de la biomasa del sustrato control.

5.2.2. Crecimiento de *Albizia occidentalis*

La supervivencia de *A. Occidentalis* fue alta en los tecnosuelo (98.5-100%). El único tecnosuelo donde murió un individuo fue en N. En la tabla 5.6 se presentan los valores de ANOVA para los factores con diferencias significativas en las variables explicativas.

El factor más significativo en el crecimiento fue la textura ($P = 1.04E - 04$), los valores de las medias fueron de 7.33 cm en tecnosuelos con Textura G a diferencia de la Textura F cuyos valores fueron de 6.01 cm. De igual manera, la textura resultó significativa en la biomasa de follaje ($P = 6.80E - 04$), los valores de las medias con Textura G fueron de 0.41 g y con Textura F de 0.31 g. Igualmente influyó en la biomasa de la raíz ($P = 5.18E - 03$), con Textura G la

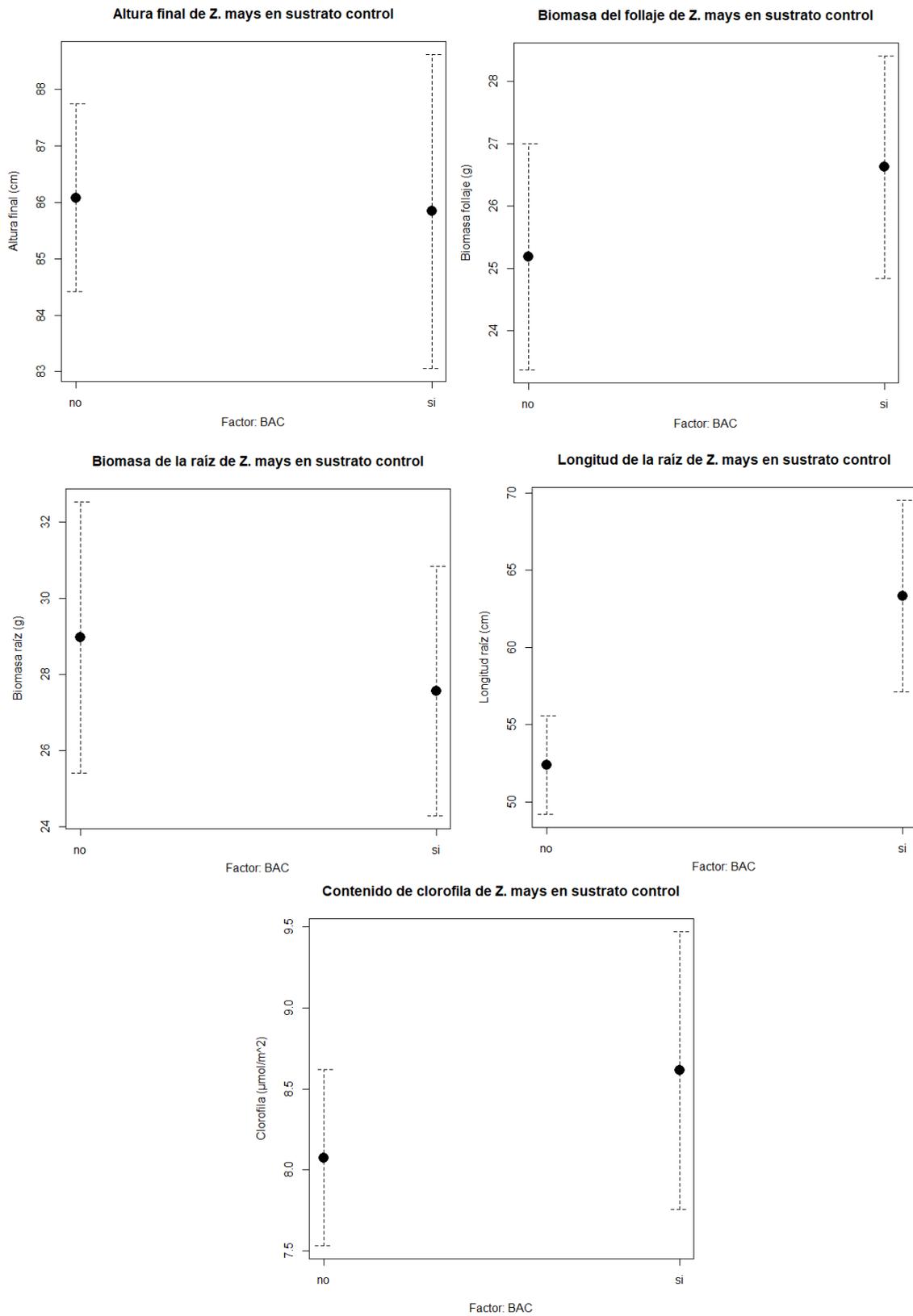


Figura 5.13: Crecimiento de *Z. mays* en sustrato control según el factor BAC

media fue de 0.19 g y con Textura F de 0.15 g.

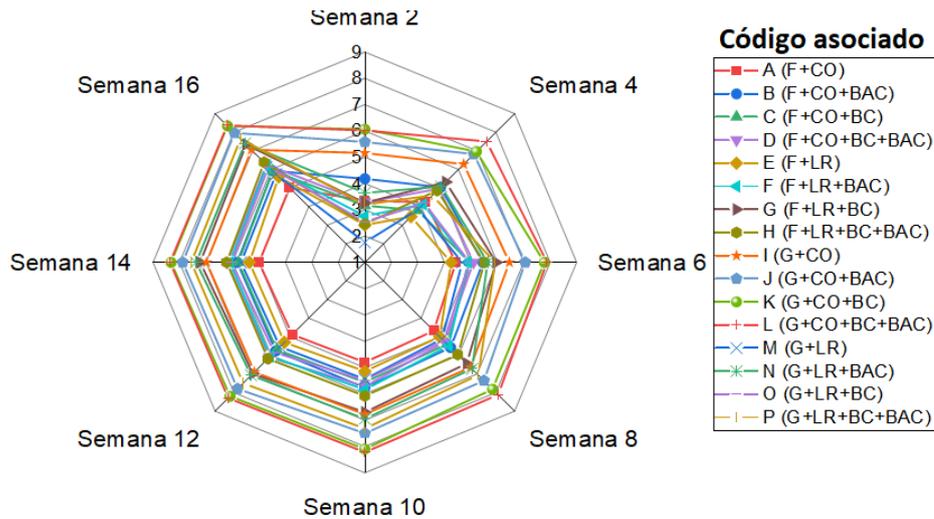
Al igual que la textura, la inoculación de BAC presentó valores significativos en la altura final ($P = 5.11E - 02$) y ambas biomásas ($P_{\text{follaje}} = 1.04E - 02$ y $P_{\text{raíz}} = 5.34E - 02$). Los valores de las medias de la altura final en presencia de BAC (6.95 cm) se encuentran por encima de aquellos individuos en lo que no se inoculó BAC (6.40 cm). De igual forma, las medias de los valores de ambas biomásas resultaron mejor con la inoculación de BAC. Las biomásas promedio con BAC fueron de 0.39 g para el follaje y 0.18 g para la raíz, a diferencia de los valores sin BAC, para el follaje fue de 0.32 g y 0.15 g para raíz.

La presencia de BC resultó significativa ($P = 3.11E - 02$) para la altura final. Los valores promedio fueron de 6.97 cm con la presencia de BC y en su ausencia fue de 6.36 cm. El BC también resultó significativo en la longitud de la raíz ($P = 1.60E - 03$) siendo mayores los valores con BC (9.32 cm) comparado con la ausencia de BC (7.38 cm). Cabe señalar que en la longitud de la raíz solo el BC fue significativo probablemente por el aumento de la porosidad en los tecnosuelos.

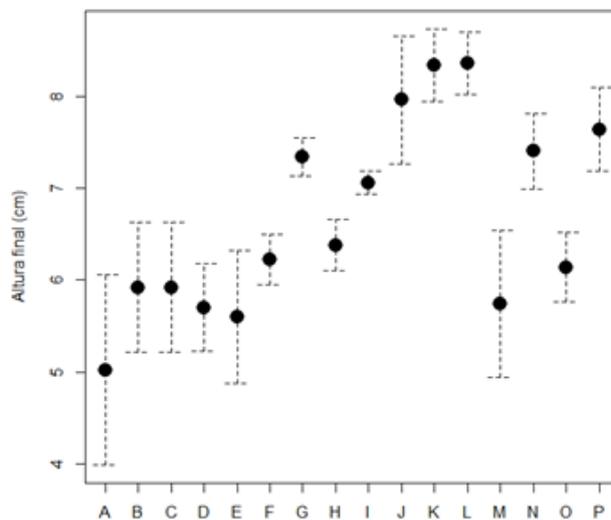
Por otra parte, la MO solo influyó en la clorofila ($P = 1.20E - 04$) y la biomasa de la raíz ($P = 4.98E - 02$). Los valores de clorofila mejoraron cuando el aporte orgánico fue LR, el valor fue de $6.48 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, comparado con el valor de CO que fue de $4.32 \mu\text{mol}/\text{m}^2$. Para la biomasa de la raíz, los mejores valores fueron en la presencia de CO. Los valores de CO fueron de 0.18 g y de 0.15 g para los LR.

A continuación se muestran las gráficas de las medias de las variables explicativas por combinación de tecnosuelo.

En la figura 5.14a se observa el crecimiento durante el tiempo experimento. En la figura 5.14b se observa que el mejor crecimiento fue en el tecnosuelo K (G + CO + BC) con una altura final promedio de 8.34 cm y L (G + CO + BC + BAC) con altura final de 8.36 cm, lo cual, concuerda con los datos de ANOVA, ya que tienen la presencia de aquellos factores que presentaron diferencias significativas. El tecnosuelo con la menor altura promedio fue A (F + CO) con 5.02 cm. No obstante, se observa una mejora en el crecimiento al adicionar BAC (tecnosuelo B).



(a) Crecimiento semanal en las distintas combinaciones de tecnosuelo.



(b) Valores promedio de la altura final en las distintas combinaciones de tecnosuelo.

Figura 5.14: Crecimiento de *A. Occidentalis* en tecnosuelo.

Para la biomasa del follaje se observa un comportamiento similar al de la altura final (ver fig. 5.15). En el diagrama de dispersión (ver fig. 5.15b) se observa una relación lineal positiva entre altura y biomasa del follaje, al igual que con *Z. mays*. Como era de esperar, los tecnosuelos K y L tuvieron los valores más altos en cuanto a biomasa de follaje (ver fig. 5.15a), los valores fueron de 0.51 g y 0.49 g, respectivamente. El tecnosuelo con menor contenido de follaje fue A con 0.21 g. Se observa que los datos de alturas coinciden en el comportamiento con los de follaje.

Hablando de alturas y biomasa del follaje los mejores factores fueron Textura G y CO, en

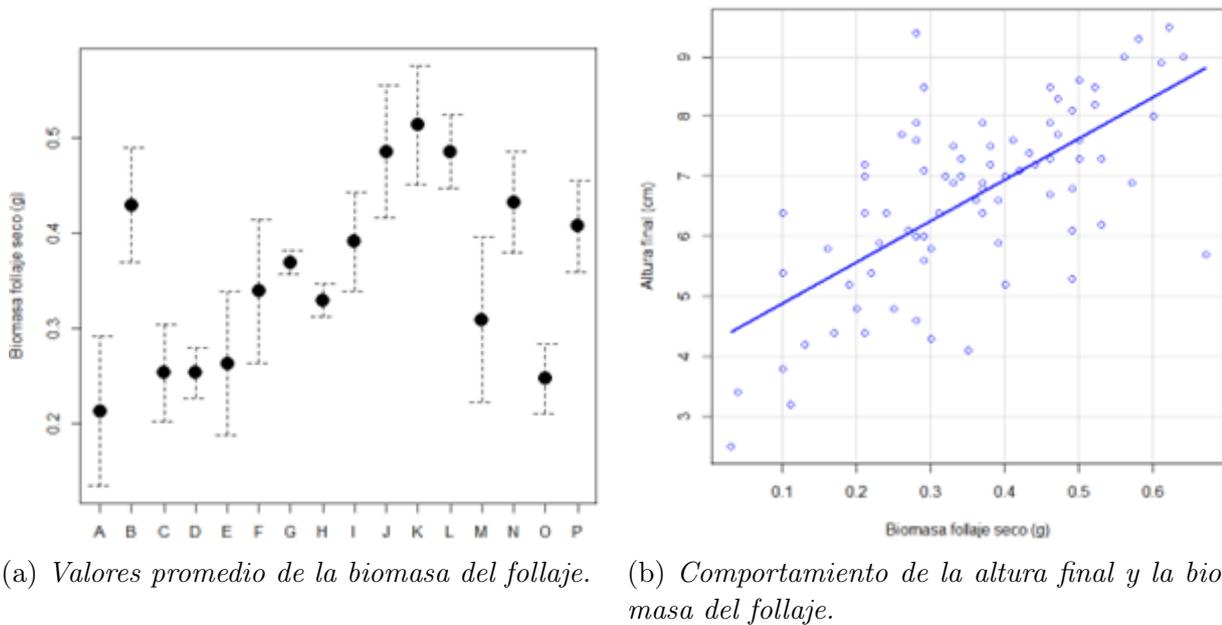
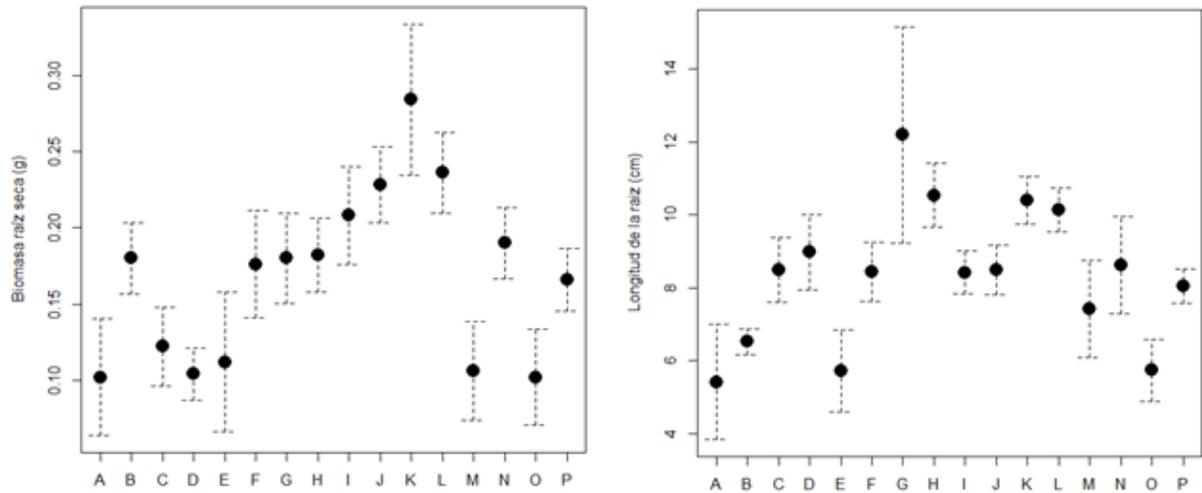


Figura 5.15: Comportamiento de la biomasa del follaje de *A. occidentalis* en las distintas combinaciones de tecnosuelo.

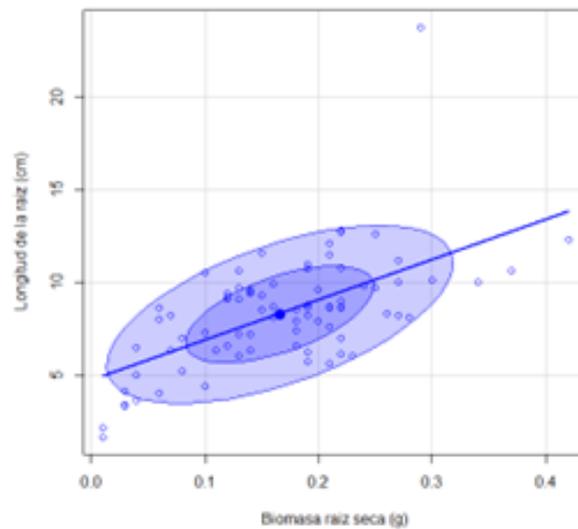
el caso de BC o BAC pueden ser opcionales para el desarrollo de *A. occidentalis*.

En el caso de la biomasa de la raíz, nuevamente el tecnosuelo K presentó el valor más alto (0.28 g) en comparación a los demás tecnosuelos, como se observa en la figura 5.16a. Los valores más bajos se obtuvieron en el grupo de tecnosuelos con Textura F y aporte de CO; A (0.102 g), C (0.12 g) y D (0.10 g), con excepción del tecnosuelo B (0.18 g) que tuvo inoculación de BAC. En todas las gráficas: altura final (ver. fig. 5.14b), longitud (ver fig. 5.16b) y biomazas (ver fig. 5.15a y 5.16a) se observa que en el grupo de tecnosuelos M-P decae, este grupo contiene Textura G y LR, su símil con Textura F aumenta en comparación con los tecnosuelos de Textura F y CO, por lo que probablemente esté ocurriendo una interacción entre Textura G y LR. A diferencia de *Z. mays* el comportamiento de la raíz tuvo una similitud con su longitud (ver fig. 5.10b) y su contenido en biomasa como se observa en el diagrama de dispersión (ver fig. 5.16c), este diagrama de dispersión no se presenta agrupado por grupos, ya que la significancia de cada factor fue diferente; el BC fue significativo para la longitud de la raíz, pero no así para la biomasa.

Se observa que los tecnosuelos con mejores crecimientos y mejor contenido en biomazas tuvieron como aporte orgánico CO (aunque MO no fue significativo para estas variables), sin



(a) Valores de la media de la biomasa de la raíz. (b) Valores de la media de la longitud de la raíz.



(c) Relación lineal entre longitud y biomasa de la raíz

Figura 5.16: Comportamiento de la raíz de *A. occidentalis* en los distintas combinaciones de tecnosuelo.

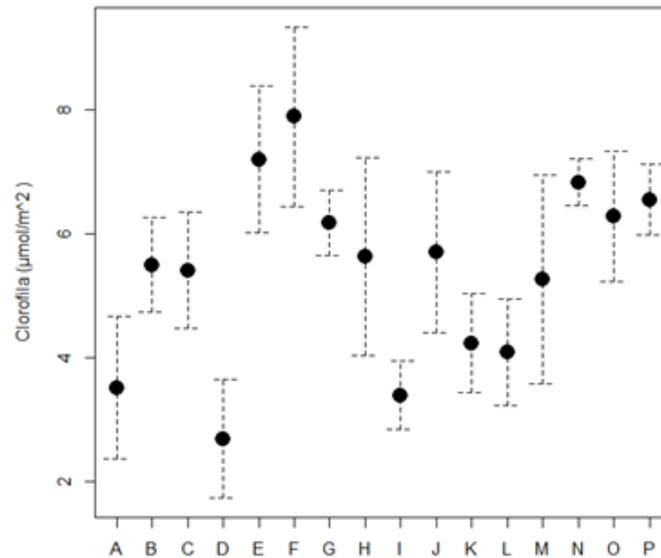
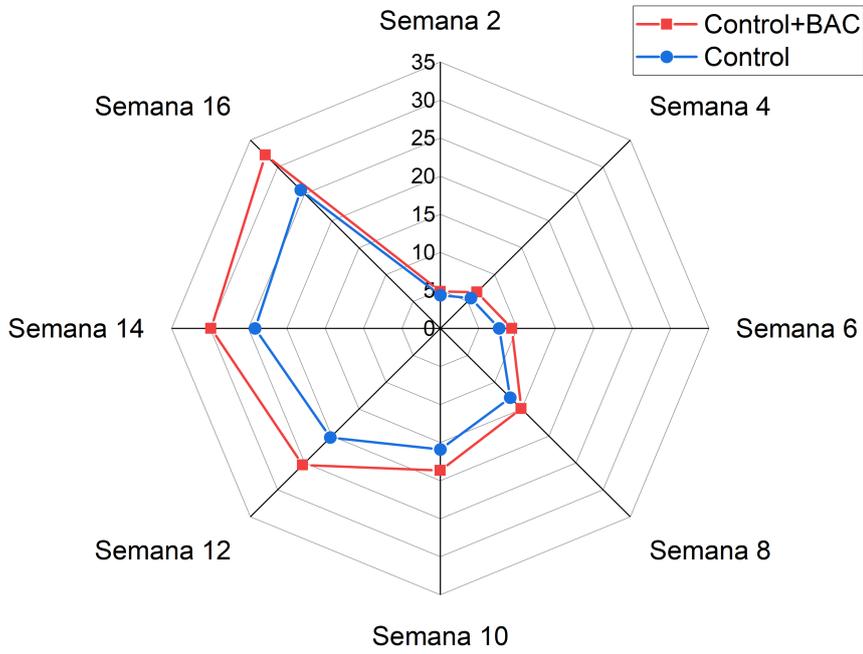


Figura 5.17: Valores promedio del contenido de clorofila ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) de *A. occidentalis* en las distintas combinaciones de tecnosuelo.

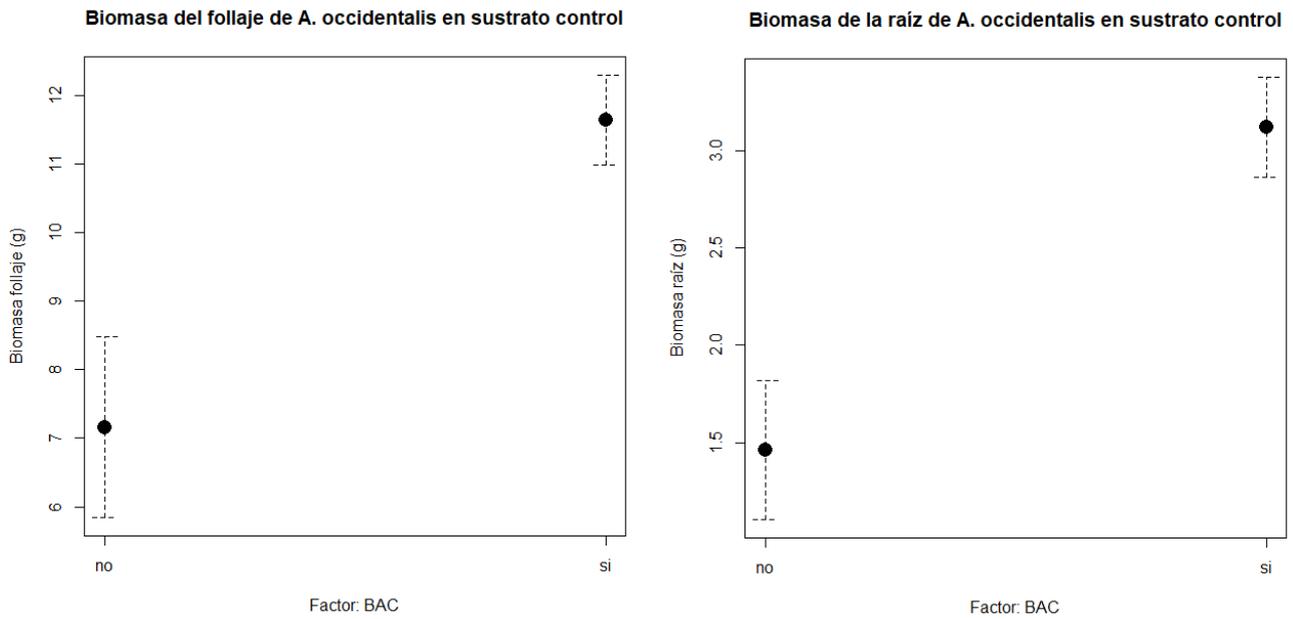
embargo, en el caso del contenido de clorofila, como se señaló en el análisis ANOVA, los mejores valores fueron aquellos con presencia de LR, esta diferencia se puede observar en la figura 5.17, lo cual, se puede deber al nitrógeno de los LR, como se explicó en la sección de *Z. mays*. Los mejores valores fueron para el tratamiento E (F + LR) y F (F + LR + BAC), $7.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ y $7.89 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, respectivamente. El valor más bajo lo obtuvo D (F + CO + BC) con $2.68 \mu\text{mol}/\text{m}^2$.

En cuanto al sustrato control, en la presencia del factor BAC resultó significativo para todas las variables menos para la longitud de la raíz y contenido de clorofila (ver tabla 5.7. La presencia de BAC mejoró notablemente el crecimiento de los individuos (ver fig. 5.18a). El Control tuvo una altura final promedio de 25.72 cm, y el Control + BAC de 32.24 cm. En el caso de ambas biomásas sus valores incrementaron con la presencia de BAC, los valores para el follaje fueron de 11.64 g comparado con 7.16 g en la ausencia de BAC, y en la biomasa de la raíz el valor con BAC fue de 3.12 g y de 1.46 g sin BAC (ver fig. 5.18b).

Comparando las alturas y biomasa del follaje del sustrato control de *A. occidentalis* con el tecnosuelo de mejor valor (tecnosuelo L), *A. occidentalis* creció el 32% y tuvo el 7% de la biomasa del sustrato control.



(a) Crecimiento semanal de *A. occidentalis* en sustrato control según el factor BAC.



(b) Comportamiento de las biomásas de *A. occidentalis* en sustrato contro según el factor BAC.l

Figura 5.18: Crecimiento de *A. occidentalis* en sustrato control.

Factor	Altura final		Biomasa follaje		Biomasa raíz	
	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P
BAC	106.28	2.56E-02	50.18	1.61E-02	6.90	5.40E-03

Tabla 5.7: Valores del análisis ANOVA para altura final, biomasa del follaje y raíz en la especie vegetal *A. occidentalis* en sustrato control. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

5.3. Tecnosuelos

5.3.1. pH

Las propiedades químicas medidas en los tecnosuelos variaron según la especie vegetal y los factores de cada tecnosuelo.

En la tabla 5.8 se presentan los factores del tecnosuelo que tuvieron diferencias significativas en el pH promedio, inicial y final para los tecnosuelos con *Z. mays*.

Factor	pH inicial		pH final		pH promedio	
	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P
Textura	8.72	1.27E-10	35.01	<2.2E-16	15.08	<2.2E-16
MO	23.60	<2.2E-16	19.900	<2.2E-16	29.412	<2.2E-16
BC	1.26	4.97E-03	—	—	0.95	2.89E-06

Tabla 5.8: Valores del análisis ANOVA para las mediciones de pH del tecnosuelo de la especie vegetal *Z. mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

Los valores promedio de pH por factor se presentan en la tabla 5.9, así como el pH promedio del sustrato control, cabe señalar que la inoculación de BAC no influyó en el pH de tecnosuelo ni en el sustrato control.

El pH promedio de los tecnosuelos fue de 10.21. La textura, la MO y el contenido de BC

tuvieron diferencias significativas para el pH promedio, los más significativos fueron MO y textura. Los LR y la Textura F aumentaron el pH. En el caso del BC su presencia disminuyó el pH. Se observa que el pH varió ligeramente según el contenido de los artefactos del tecnosuelo, pero su pH se mantuvo entre valores básicos de 9 y 10.

En el caso del pH inicial (semana 1) en tecnosuelos con *Z. mays* el valor promedio fue de 10.88. Cuando la materia orgánica fue LR el pH tendió a una basicidad, con una media de 10.92, con CO fue igualmente básico, pero menor (9.84), esto contrario a los valores individuales de los artefactos orgánicos, recordando que los LR fueron más ácidos que la CO. Con la Textura G el pH fue de 10.05 y con Textura F fue de 10.71. Con BC el pH aumentó (10.50) y sin BC disminuyó (10.25).

En el caso de las mediciones de pH final el promedio fue de 9.75. Se observó que el BC dejó de tener diferencias significativas, por otra parte, la MO y Textura siguieron teniendo influencia. Con LR siguió habiendo pH más básicos que con CO, los valores fueron de 10.92 y 9.34, respectivamente. De manera similar con las texturas, F continuó siendo más básico con un valor de 10.75 y 10.05 con Textura G.

En la tabla 5.9 se presentan los valores promedio de pH de cada tecnosuelo. Se observa una consistencia con el análisis anterior, teniendo las combinaciones con los valores más altos son aquellas que tienen materiales que aumentaron el pH; los LR y la Textura F. Los valores más bajos son aquellos que contienen Textura G, BC y CO, como el tecnosuelo K y L que presentaron los que presentaron un pH cercano a 7 al final del experimento.

En la figura 5.19 se presentan los valores de pH de *Z. mays* en el tiempo de duración del experimento. Se observa que las condiciones de pH del tecnosuelo están muy por encima del sustrato control. No obstante, se observa el decaimiento del pH en ciertos tecnosuelos (K y L), por lo que se realizó un ANOVA para el ΔpH (pH final – pH inicial).

Los resultados de ANOVA para el ΔpH se presentan en la tabla 5.11. Con ambas texturas se observó una disminución en el pH final, en la Textura G se observó una mayor disminución con una media del ΔpH de -0.96, comparado con el ΔpH de la Textura F de -0.29, esto probablemente por la rápida solubilización del CaCO_3 y la mayor área superficial de la Textura F.

Factor	pH inicial	pH final	pH promedio
Control	6.43	6.25	6.29
Control + BAC	6.78	6.17	6.43
Textura F	10.71***	10.41***	10.64***
Textura G	10.05***	9.09***	9.77***
Materia orgánica LR	10.92***	10.24***	10.81***
Materia orgánica CO	9.84***	9.25***	9.60***
Con BC	10.50**	9.69	10.10***
Sin BC	10.25**	9.81	10.31***

Tabla 5.9: Valores de las medias del pH según el factor del tecnosuelo (textura, materia orgánica y biocarbón) en la especie vegetal *Z. mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

De igual manera, el BC influyó en la disminución del pH, aunque sus valores fueron de menor significancia que los de la textura, con BC hubo una mayor disminución (-0.82) que sin BC (-0.44), se ha demostrado que la síntesis del biocarbón a bajas temperaturas puede ayudar a disminuir el pH del suelo, especialmente ha sido usado para disminuir el pH en suelos calcáreos [81], por lo que esto nos podría dar una idea del proceso al que se sometió la biomasa inicial. En la figura 5.19 se observa que los valores de pH que más decayeron fueron aquellos que tienen Textura G, BC y como componente orgánico CO (tecnosuelos K y L).

Se relacionó las alturas finales y el contenido de clorofila de *Z. mays* acorde a los factores que tuvieron significancia en el ΔpH , en la figura 5.20 se presentan los diagramas de dispersión.

En el caso de las alturas finales de *Z. mays* con textura (ver fig. 5.20a) y biocarbón (ver fig. 5.20b) se observa una concentración de los grupos el lado negativo del ΔpH , es decir cuando hubo una disminución. En el caso de la Textura G se observa una mayor disminución del ΔpH , conforme el análisis ANOVA, sin embargo, no necesariamente estas alturas estuvieron

Tecnosuelo	pH inicial	pH final	pH promedio
A	9.82	9.77	10.27
B	9.83	10.13	10.18
C	10.75	10.44	10.28
D	10.16	9.91	9.95
E	11.15	10.39	11.14
F	11.63	10.84	11.13
G	11.08	11.04	11.10
H	11.24	10.76	11.08
I	9.44	9.00	9.44
J	9.68	8.99	9.42
K	9.53	7.83	8.67
L	9.48	7.93	8.60
M	10.15	9.77	10.52
N	10.32	9.60	10.43
O	11.05	9.57	10.45
P	10.74	10.01	10.65

Tabla 5.10: Valores de las medias del pH acorde a cada tecnosuelo en la especie vegetal *Z. mays*. Ver tabla 5.3 para el código de letras asociado a cada tecnosuelo.

acentuadas conforme hubo una gran disminución en el pH, se observa una tendencia creciente conforme el $\Delta\text{pH} = 0$, sin embargo, cuando se pasa este valor se observan tres individuos decaen en altura conforme la tendencia. En el caso de Textura F la tendencia de crecimiento se acentuó conforme el ΔpH disminuyó aunque no hubo grandes cambios en el ΔpH . En el caso del BC si hubo una mayor disminución del ΔpH cuando este estuvo presente, pero esto no aumentó las alturas, como se vió en la sección anterior el BC disminuyó el crecimiento en *Z. mays*.

En cuanto a la clorofila y pH, para el caso de la textura (ver fig. 5.20c), en la sección anterior se presentó que la Textura F tuvo los valores más altos en el contenido de clorofila, estos valores se concentraron a medida que el ΔpH fue cercano a cero y sus valores incrementaron conforme el pH disminuía. Para la Textura G disminuyó más el pH, se observa, al igual que en el crecimiento, que el contenido de clorofila no aumenta conforme el pH disminuye, se observa una tendencia creciente conforme el $\Delta\text{pH} = 0$. Cabe señalar que si bien el BC aumentó los valores del contenido de clorofila ($5.16 \mu\text{mol}/\text{m}^2$) que sin BC ($4.86 \mu\text{mol}/\text{m}^2$), estas diferencias no fueron significativas para el contenido de clorofila en la sección anterior. En el caso de la presencia del BC (ver fig.

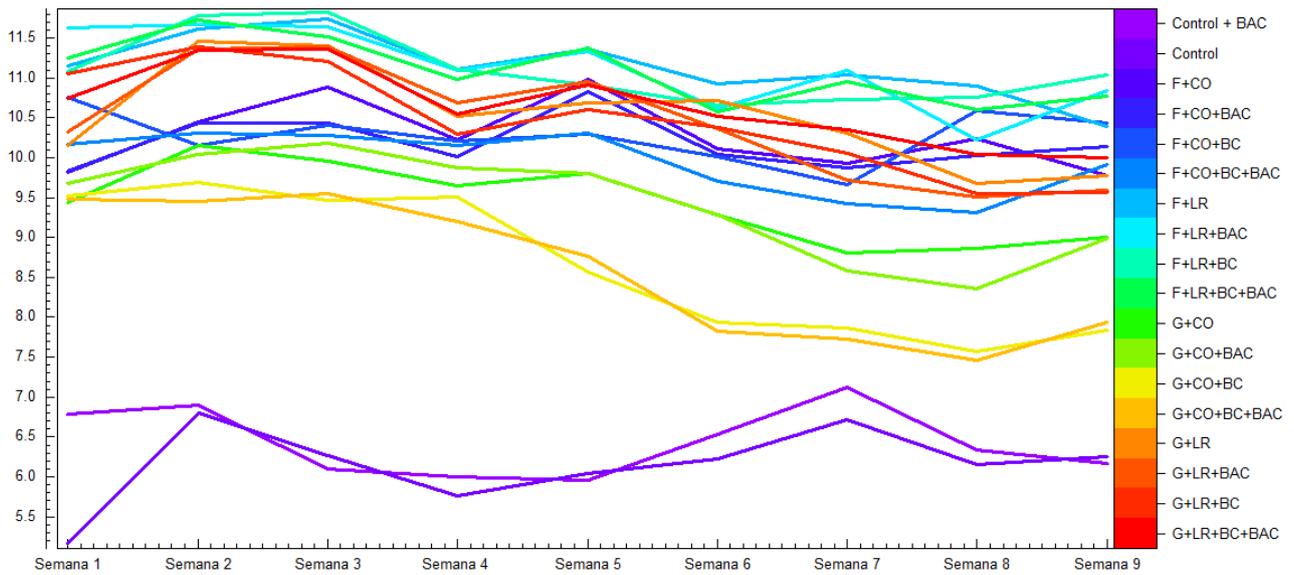


Figura 5.19: Mediciones semanales de pH en *Z.mays*.

Factor	ΔpH	
	Sum Sq	P
Textura	8.79	2.24E-09
BC	2.80	2.13E-04

Tabla 5.11: Valores del análisis ANOVA para el ΔpH del tecnosuelo de la especie vegetal *Z. mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

5.20d) los valores se encuentran dispersados con una tendencia ascendente conforme el pH final aumentó, por otra parte, los valores sin BC se encuentran focalizados cuando el ΔpH fue pequeño, con una ligera tendencia ascendente conforme el pH disminuyó.

En resumen, en la especie vegetal *Z. mays* los materiales que influenciaron una disminución en el pH del tecnosuelo fueron el concreto (Textura G) y el biocarbón. Para el crecimiento y la clorofila no necesariamente los individuos que sufrieron una mayor disminución del pH se reflejó en una mejoría en sus valores.

Por otra parte, en el caso de las *A. occidentalis* el pH promedio de los tecnosuelos fue de 10.35. En la tabla 5.12 se presentan los factores del tecnosuelo que tuvieron diferencias significativas en el pH promedio, inicial y final para esta especie.

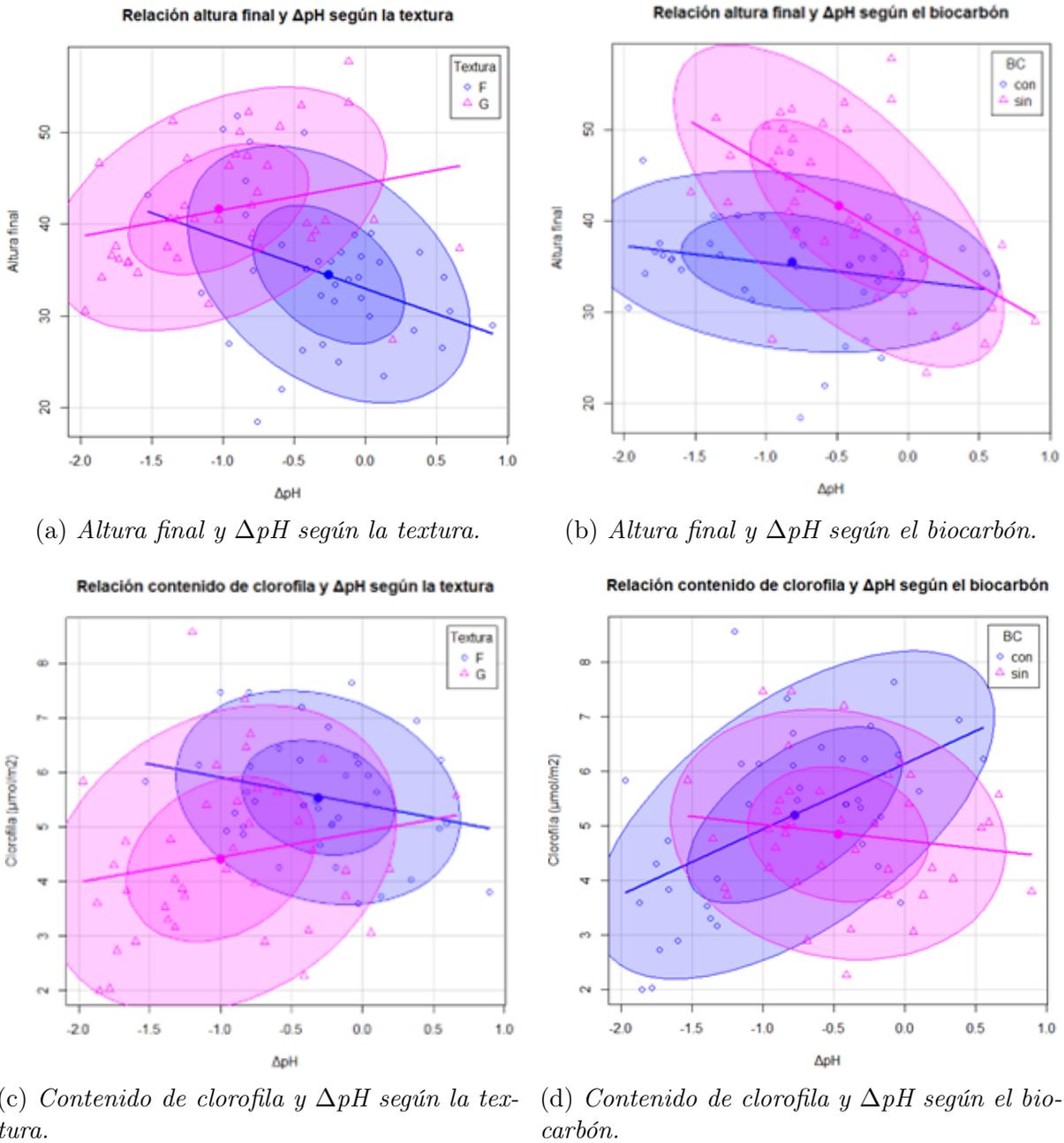


Figura 5.20: Comportamiento de la altura final y la clorofila según el ΔpH en la especie vegetal *Z. mays*.

Factor	pH inicial		pH final		pH promedio	
	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P
Textura	4.50	6.79E-08	4.97	3.731E-07	1.58	1.962E-08
MO	20.11	<2.2E-16	14.45	4.010E-14	2.92	1.676E-12
BC	3.31	1.97E-06	21.03	<2.2e-16	6.75	<2.2e-16

Tabla 5.12: Valores del análisis ANOVA para las mediciones de pH del tecnosuelo de la especie vegetal *A. occidentalis*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

Los valores promedio de pH por factor se presentan en la tabla 5.13, así como el pH promedio del sustrato control, cabe señalar que, al igual que en *Z. mays*, la inoculación de BAC no influyó en el pH de tecnosuelo ni en el sustrato control.

La textura, la MO y el contenido de BC tuvieron diferencias significativas para el pH promedio. El material más significativo para el pH promedio resultó el BC, teniendo valores más bajos con su presencia, seguido de la MO y la textura. En el caso de MO los LR aumentaron el pH (ver tabla 5.13) al igual que en *Z. mays*. Para la textura el pH se incrementa con la textura F. Se observa que el pH varió ligeramente según el contenido de los artefactos del tecnosuelo, pero su pH se mantuvo entre valores básicos de 10 y 11.

En el caso del pH inicial (semana 1) cuando la materia orgánica fue LR el pH tendió a una basicidad, con una media de 11.01, con CO fue igualmente básico, pero menor (10.00). Con textura G el pH fue más básico que con la textura F, de 10.74 y con textura F fue de 10.27, probablemente se deba a la variación de tamaños en la textura G. A diferencia de *Z. mays*, la primera medición con BC el pH disminuyó (10.30) y sin BC aumentó (10.71), se puede atribuir que el BC posee distintos tamaños de partícula.

En el caso de las mediciones de pH final se observó que todos los componentes del tecnosuelo siguieron teniendo diferencias significativas. En todos los casos el pH tendió a aumentar con relación al pH inicial. Con LR siguió habiendo pH más básicos que con CO, los valores fueron de 11.80 y 10.95, respectivamente. En el caso de las texturas, la textura F superó los valores

Factor	pH inicial	pH final	pH promedio
Control	6.57	6.84	6.84
Control + BAC	6.59	6.04	6.04
Textura F	10.27***	11.62***	10.49***
Textura G	10.74***	11.13***	10.21***
Materia orgánica LR	11.01***	10.80***	10.16***
Materia orgánica CO	10.00***	10.95***	10.54***
Con BC	10.30***	10.86***	10.06***
Sin BC	10.71***	11.88***	10.64***

Tabla 5.13: Valores de las medias del pH según el factor del tecnosuelo (textura, materia orgánica y biocarbón) en la especie vegetal *A. occidentalis*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

de la textura G con valores de 11.62 y 11.13.

En la tabla 5.14 se presentan los valores promedio de pH de cada tecnosuelo para *A. occidentalis*. Se observa una consistencia con el análisis anterior; pH más básico en la presencia de textura F, LR y sin BC. En la figura 5.21 se presentan los valores de pH de *A. occidentalis* en el tiempo de duración del experimento. Al igual que en *Z. mays* se observan condiciones muy por encima de las ideales. No obstante, se observa en todos los casos una tendencia de aumento en el pH, contrariamente a lo observado en *Z. mays*. Debido al aumento del pH se realizó un ANOVA para el Δ pH.

Los resultados de ANOVA para el Δ pH se presentan en la tabla 5.15. La textura resultó más significativa que el BC, con ambos factores se observa un cambio en el Δ pH. Ambas texturas presentaron un aumento en el pH. La textura G presentó una menor disminución con una media del Δ pH de 0.38, por otra parte la Textura F aumento en mayor medida con un Δ pH= 1.36. En el caso con BC disminuyó menos con un Δ pH de 0.56, sin BC el valor fue de 1.18. En la

Tecnosuelo	pH inicial	pH final	pH promedio
A	10.22	11.82	10.57
B	9.56	11.44	10.50
C	10.02	10.80	10.11
D	9.43	10.88	10.04
E	10.80	13.08	11.41
F	10.65	12.58	10.86
G	11.11	11.38	10.45
H	10.36	11.01	10.00
I	10.40	11.09	10.12
J	10.73	10.95	10.19
K	9.76	10.21	9.85
L	9.90	10.40	9.90
M	11.63	12.03	10.76
N	11.67	12.10	10.72
O	10.32	10.61	9.75
P	11.52	11.61	10.39

Tabla 5.14: Valores de las medias del pH acorde a cada tecnosuelo en la especie vegetal *A. occidentalis*. Ver tabla 5.3 para el código de letras asociado a cada tecnosuelo.

figura 5.21 se observa que los valores de pH que más aumentaron fueron aquellos que tienen Textura F, ausencia de BC y LR como componente orgánico (tecnosuelos E y F).

Una de las explicaciones del porqué el pH en *A. occidentalis* fue mayor se puede atribuir a los distintos tamaños de partícula en los que se encuentra el concreto reciclado y el BC comercial; probablemente en esta especie había tamaños inferiores a los tecnosuelos de *Z. mays*. Otra posible explicación puede deberse a la actividad biológica. Si bien, el factor BAC no resultó

Factor	Δ pH	
	Sum Sq	P
Textura	18.93	4.824E-15
BC	7.66	1.462E-08

Tabla 5.15: Valores del análisis ANOVA para el Δ pH del tecnosuelo de la especie vegetal *A. occidentalis*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

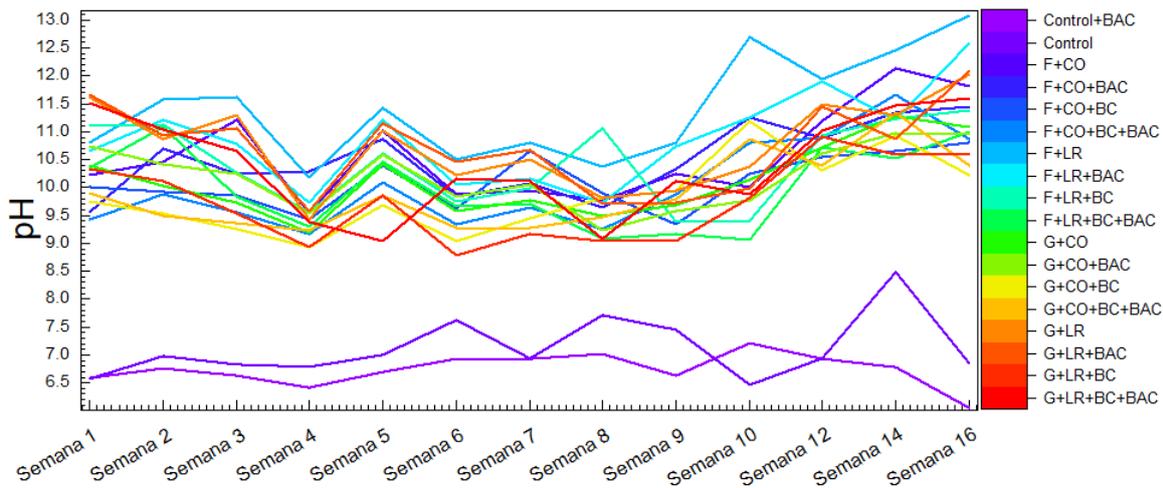


Figura 5.21: Mediciones semanales de pH en *A. occidentalis*

significativo en el ΔpH posiblemente el aumento del pH se deba a que las leguminososas, como *A. occidentalis*, tienen la capacidad de desarrollar de mejor manera asociaciones simbióticas con bacterias fijadoras de N_2 [82], como *Klebsiella spp.*, en las cuales, se ha demostrado su capacidad de fijar N_2 [83], por lo que probablemente la disociación del NH_3 (ver ecuación 5.5) este causando este aumento del pH.



Se relacionó el crecimiento y el contenido de clorofila de *A. occidentalis* acorde a los tratamientos que tuvieron significancia en el ΔpH , en las figuras 5.22 se presentan los diagramas de dispersión.

En el caso de las alturas finales de *A. occidentalis* en cada tratamiento (textura y contenido de BC) se observa una concentración de los grupos conforme hubo un aumento del pH (entre 0-1.5). En el caso de ambas texturas (ver fig. 5.22a) se observa que las alturas estuvieron acentuadas conforme el pH final no se acrecentó, las alturas de la Textura G son mayores conforme el análisis de la sección anterior. En el caso del BC (ver fig. 5.22b) en su presencia se observa como los valores se focalizan más en un rango de valor cercano al $\Delta\text{pH} = 0$, (en la misma zona que Textura G) y son más altos conforme el análisis de la sección anterior, en su ausencia los valores se dispersan, pero ambos grupos presentan un aumento a medida que el

ΔpH no se acrecentó en demasía.

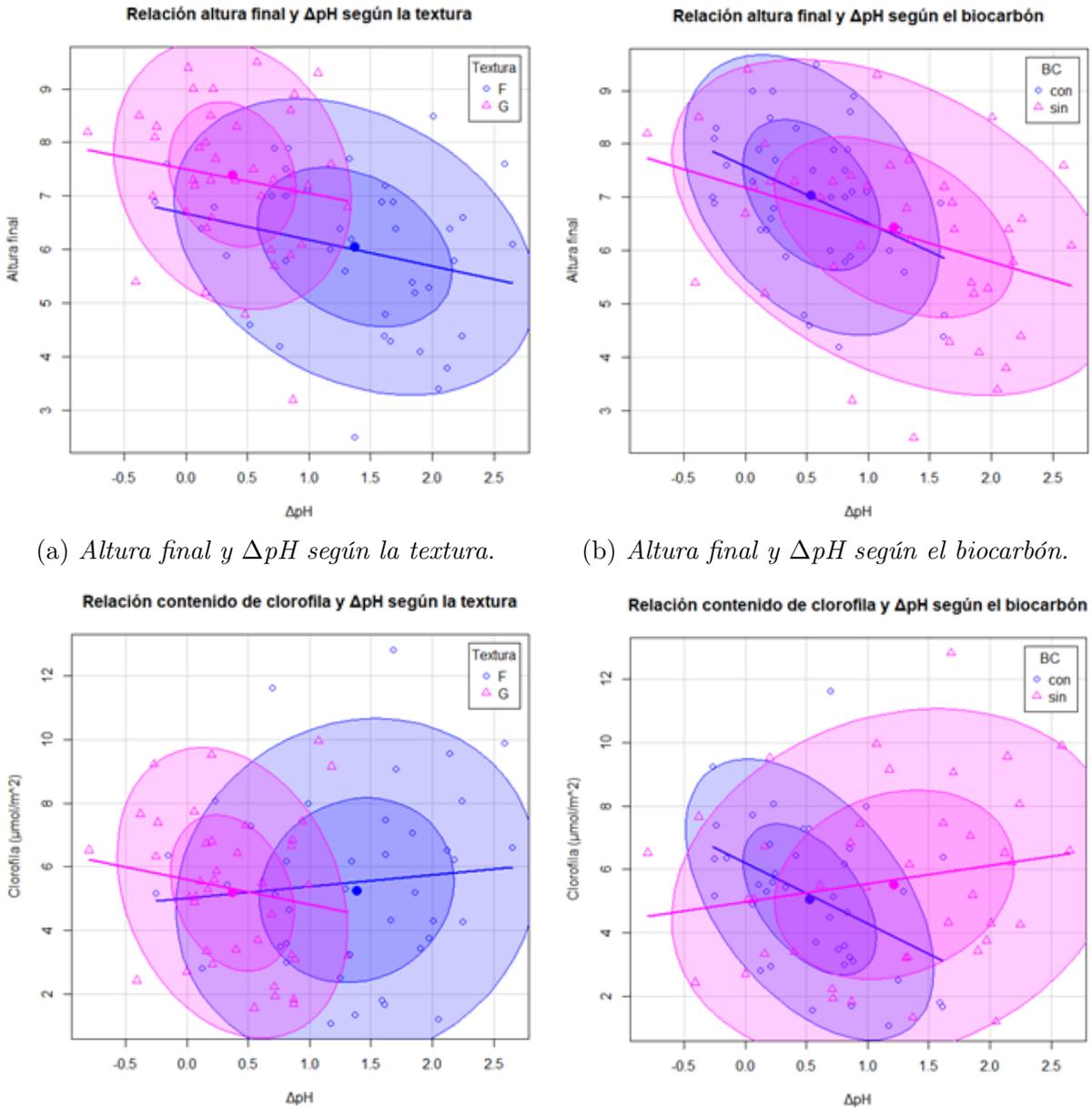
Es de señalar que, para el contenido de clorofila ni la textura, ni el BC resultó significativo para esta especie vegetal. Los valores de la media con Textura F fueron de $5.50 \mu\text{mol}/\text{m}^2$. Los valores con Textura F se concentraron en valores del $\Delta\text{pH}=0$ (ver fig. 5.22c) con una tendencia acentuada conforme el pH disminuyó. En el caso de la Textura G la media fue de $5.30 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, los valores se encuentran más dispersos y presentan una tendencia opuesta a la de la Textura F; aumentan conforme el pH se incrementó. Para el BC (ver fig. 5.22d) la media en su presencia fue de $5.14 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, sus valores se caracterizaron por estar agrupados entre $\Delta\text{pH}=0$ (en la misma zona que Textura F) y con una tendencia acentuada conforme el pH disminuyó. Sin BC la media fue mayor ($5.66 \mu\text{mol}/\text{m}^2$) con valores dispersados con una tendencia ascendente conforme el pH aumentó.

En resumen, para *A. occidentalis* no hubo una disminución del pH como para *Z. mays*, sin embargo, son los mismos materiales los que permitieron que el pH no aumentara en demasía. En cuanto a la altura se observan comportamientos similares al de *Z. mays*, con excepción de la Textura G; el crecimiento se vio favorecido cuando el pH no aumentó demasiado. Para la clorofila de *A. occidentalis* se observan comportamientos totalmente opuestos en relación a *Z. mays*.

5.3.2. Conductividad eléctrica

La CE se vio afectada por los distintos componentes del tecnosuelo. Las diferencias significativas de los tratamientos para ambas mediciones de CE para *Z. mays* se presentan en la tabla 5.16. La textura, MO y la inoculación de BAC son los factores que tuvieron diferencias significativas para la CE inicial, final y promedio, aunque hubo mayores diferencias significativas en la CE del lixiviado de los tecnosuelos. En la tabla 5.17 se presentan los valores promedio de ambas mediciones de CE acorde a cada factor, cabe señalar que BAC solo afectó la medición inicial de lixiviado muy ligeramente ($P=7.94\text{E}-02$) en el sustrato control.

La CE promedio de los tecnosuelos con *Z. mays* fue de $1.06 \text{ dS}/\text{m}$ y $1.75 \text{ dS}/\text{m}$ para lixiviado. La textura tuvo la mayor diferencia significativa en las mediciones de ambas CE. Los valores



(a) *Altura final y ΔpH según la textura.*

(b) *Altura final y ΔpH según el bicarbón.*

(c) *Contenido de clorofila y ΔpH según la textura.*

(d) *Contenido de clorofila y ΔpH según el bicarbón.*

Figura 5.22: *Comportamiento de la altura final y la clorofila según el ΔpH en la especie vegetal *A. occidentalis*.*

Factor	CE suelo <i>inicial</i>		CE suelo <i>final</i>		CE suelo <i>promedio</i>	
	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P
Textura	8.82	2.49E-15	0.52	4.527E-06	1.40	<2.2E-16
MO	1.26	2.23E-04	-	-	0.23	1.205E-07
BAC	0.33	4.91E-02	-	-	-	-

Factor	CE lix. <i>inicial</i>		CE lix. <i>final</i>		CE lix. <i>promedio</i>	
	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P
Textura	31.14	1.831E-05	0.20	5.99E-04	2.17	3.50E-10
MO	121.9	2.94E-13	2.05	<2.2e-16	13.57	<2.2e-16
BAC	8.10	2.13E-02	0.08	2.86E-02	0.11	9.36E-02

Tabla 5.16: Valores del análisis ANOVA para las mediciones de conductividad eléctrica (CE) directa (suelo) y lixiviado (lix.) del tecnosuelo en la especie vegetal *Z. mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

promedio en suelo con Textura F (1.19 dS/m) son mayores que con Textura G (0.93 dS/m), los valores son más altos en la CE del lixiviado (2.16 dS/m y 1.33 dS/m, respectivamente). Seguido de la textura fue la MO, la cual, tuvo diferencias significativas para ambas mediciones, igualmente presentan valores más altos en los lixiviados, los valores LR son ligeramente más altos (1.11 dS/m) que los de CO en suelo (1.00 dS/m), pero en los lixiviados la CO es más alta (1.91 dS/m) que LR (1.59 dS/m), probablemente este material posee compuesto más solubles. Por último, BAC afectó solamente la medición promedio de los lixiviados teniendo valores ligeramente más bajos cuando hubo inoculación de BAC.

La CE inicial promedio de los tecnosuelos fue de 2.03 dS/m para la medición directa en el suelo y de 4.92 dS/m para el lixiviado. El material que más significancia tuvo para ambas mediciones fue la textura, teniendo los valores más altos la Textura F, tanto en suelo (2.36 dS/m) como lixiviado (6.15 dS/m) que la Textura G (1.71 dS/m y 3.68 dS/m, respectivamente). El se-

Factor	CE en suelo (dS/m)			CE en lixiviado (dS/m)		
	Inicial	Final	Promedio	Inicial	Final	Promedio
Control	0.73	0.37	0.58	0.82	0.02	0.33
Control + BAC	0.51	0.51	0.48	0.54*	0.01	0.30
Textura G	1.70***	0.63***	0.93***	3.68***	0.40***	1.33***
Textura F	2.36***	0.79***	1.19***	6.15***	0.72***	2.16***
Materia orgánica LR	2.15***	0.73	1.11***	4.29***	0.51***	1.59***
Materia orgánica CO	1.91***	0.69	1.00***	5.54***	0.61***	1.91***
BAC: si	1.97*	0.69	1.05	4.59*	0.53*	1.71*
BAC: no	2.10*	0.73	1.06	5.24*	0.60*	1.79*

Tabla 5.17: Valores de las medias de ambas conductividades eléctricas (CE) según el factor del tecnosuelo (textura, materia orgánica y BAC) en la especie vegetal *Z. mays*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

gundo material más significativo fue la MO, los LR tuvieron valores más altos en las mediciones directas (2.15 dS/m) que la CO (1.91 dS/m), en los lixiviados se presentó un comportamiento opuesto. Por último, BAC afectó la medición inicial de la medición directa y del lixiviado teniendo valores más bajos en aquellas combinaciones con inoculación. Como se mencionó, BAC solo tuvo diferencias significativas en la medición inicial del lixiviado, presentando la tendencia de tener un valor más bajo de CE en su presencia (ver tabla 5.17).

Los valores promedio para la medición final de suelo fueron de 0.71 dS/m y 0.56 dS/m para el lixiviado. La textura siguió teniendo significancia en la CE directa y del lixiviado, pero no así la MO y BAC, quienes sólo tuvieron diferencias significativas en el lixiviado. Las tendencias continuaron con valores más altos en Textura F que en Textura G. Valores más altos en la medición directa cuando el aporte orgánico es LR y valores más altos en lixiviados con CO. Por último, valores ligeramente menores en presencia de BAC únicamente en los lixiviados.

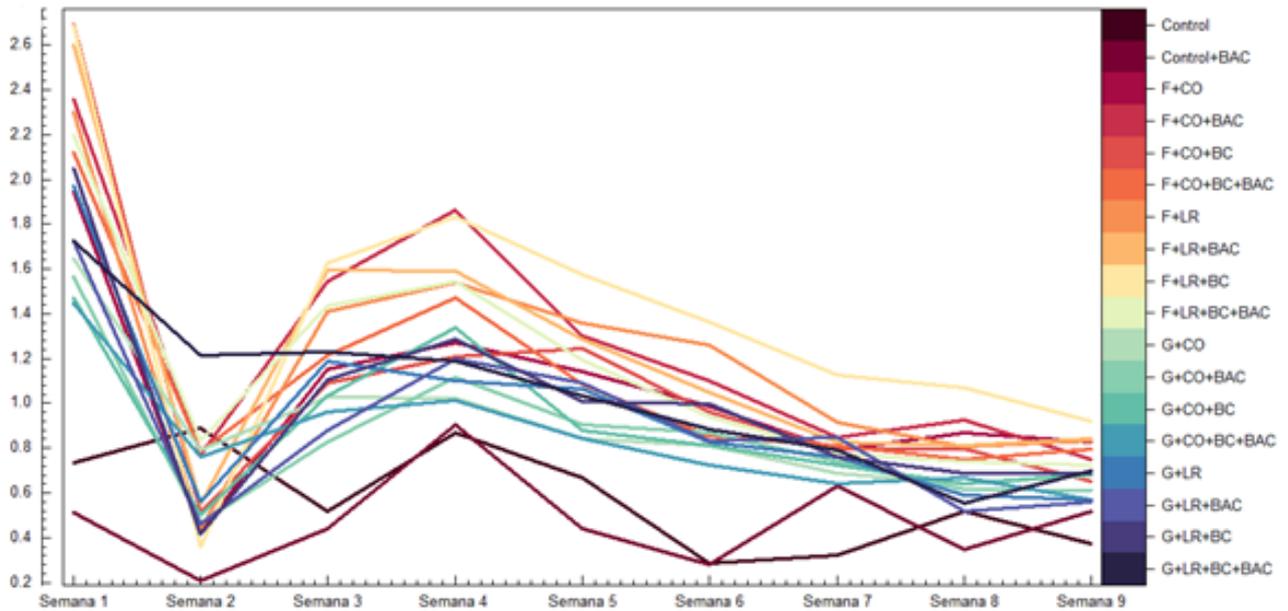
Tecnosuelo	CE en suelo (dS/m)			CE en lixiviado (dS/m)		
	Inicial	Final	Promedio	Inicial	Final	Promedio
A	1.95	0.83	1.05	6.10	0.62	2.21
B	2.36	0.75	1.27	6.40	0.79	2.51
C	2.70	0.65	1.11	7.91	0.70	2.28
D	2.12	0.80	1.10	6.48	0.62	2.06
E	2.30	0.83	1.21	6.08	0.76	2.09
F	2.30	0.84	1.24	6.08	0.72	2.14
G	2.68	0.92	1.40	6.02	0.90	2.16
H	2.19	0.73	1.15	4.14	0.70	1.86
I	1.65	0.68	0.90	4.42	0.53	1.61
J	1.57	0.61	0.86	4.02	0.46	1.51
K	1.47	0.68	0.90	5.04	0.68	1.68
L	1.44	0.57	0.85	3.95	0.53	1.46
M	1.97	0.57	0.96	2.88	0.28	1.11
N	1.72	0.56	0.90	2.71	0.21	1.06
O	2.05	0.69	1.00	3.41	0.30	1.17
P	1.73	0.69	1.04	3.01	0.27	1.10

Tabla 5.18: Valores de las medias de ambas conductividades eléctricas (CE) acorde a cada tecnosuelo en la especie vegetal *Z. mays*. Ver tabla 5.3 para el código de letras asociado a cada tecnosuelo.

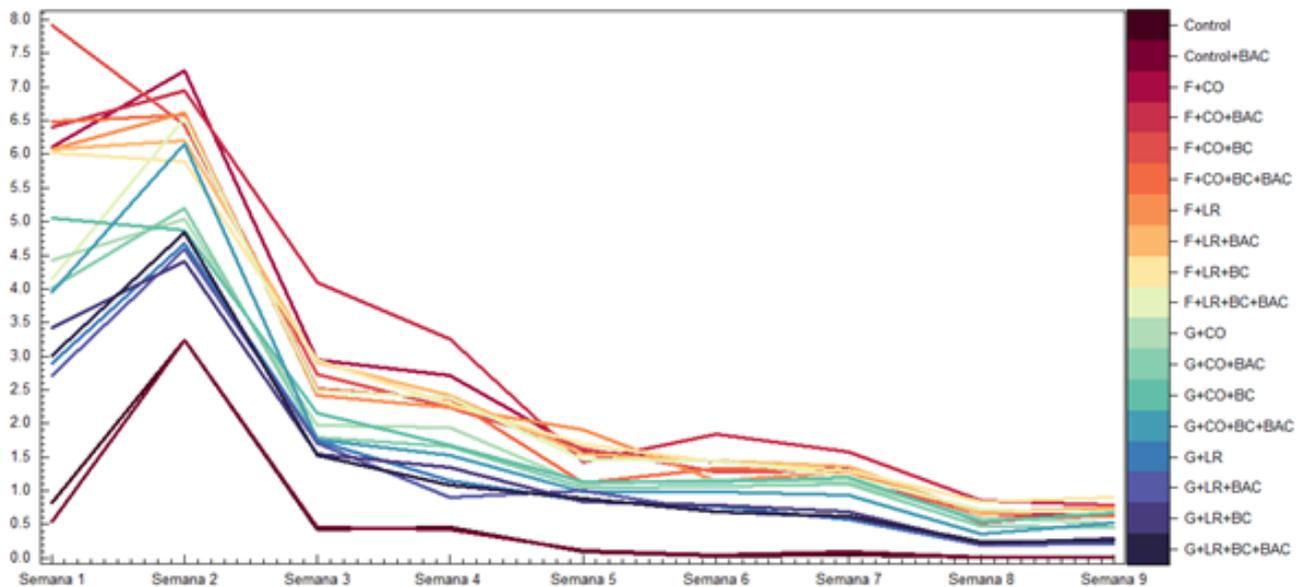
En la tabla 5.18 se presentan los valores promedio de las CE de mediciones directas y del lixiviado acorde a cada tecnosuelo. Se observan valores más altos en los lixiviados conforme el análisis anterior. Las combinaciones con Textura F tienden a valores más altos debido a la mayor significancia de este tratamiento. Se observan valores ligeramente más altos en las CE del suelo cuando los LR están presentes y valores menores que CO en los lixiviados. Es de resaltar que la tendencia a disminuir la CE cuando BAC es inoculado en algunas combinaciones se observa y en otras no.

En la figura 5.23 se muestran ambas CE en el tiempo para *Z. mays*. Se aprecia mejor como la rápida solubilización de los componentes hacen que las CE disminuyan, pero no lo hacen de manera uniforme, presentan ligeras alzas y bajas, especialmente en las mediciones directas de suelo, dichas fluctuaciones no se presentarían si los materiales se encontraran aislados; las CE disminuyen de manera uniforme.

En resumen, para *Z. mays* la CE se vio afectada directamente por la textura, la MO y BAC. El BC no influyó. En todos los casos la CE del lixiviado fue mayor que la medición directa del suelo probablemente por la alta solubilidad de muchos componentes como el calcio, fósforo y nitrógeno. Los materiales que presentaron una mayor solubilización de sus componentes fue el concreto (Textura F) y la CO. Las mediciones fueron ligeramente más bajas cuando BAC



(a) Conductividad eléctrica en suelo.



(b) Conductividad eléctrica en lixiviado.

Figura 5.23: Mediciones de conductividad eléctrica (dS/m) de los distintos tecnosuelos en la especie vegetal *Z. mays*

se inoculó, una posible explicación es que ciertos metabolitos son producidos por las bacterias del suelo; como sideróforos, cuya función principal es convertir iones de hierro en una forma asimilable para las plantas [84], los cuales, pueden estar secuestrando iones distintos al hierro. De igual manera, en otros procesos bacterianos, distintos ácidos son segregados, los más fuertes como ácidos glucónico y 2-cetoglucónico tienen la capacidad de quelar al Ca^{2+} [85] y debido a ello las mediciones de CE son ligeramente menores en la presencia de BAC. Por último, los valores iniciales del tecnosuelo corresponden a un suelo ligeramente salino. Debido a la alta solubilidad del CaCO_3 al final los valores corresponden a un suelo no salino.

Para la especie vegetal *A. occidentalis* los cuatro factores tuvieron diferencias significativas en ambas mediciones de CE. Sin embargo, en ambas mediciones, la significancia de los valores varió mucho en las mediciones iniciales y finales, todas fueron significativas para CE *promedio*. Las diferencias significativas de los tratamientos para ambas mediciones de CE se presentan en la tabla 5.19. Al igual que en *Z. mays* las diferencias fueron más significativas en las mediciones de los lixiviados, con excepción de la MO en la CE de suelo final y el BC en los valores promedio de suelo, los cuales, tuvieron más significancia que en lixiviados. Los valores promedio de CE por factor se presentan en la tabla 5.20, así como la CE del sustrato control, cabe señalar que BAC solo tuvo ligera significancia en la medición directa de suelo final ($P= 0.077$).

La CE promedio de los tecnosuelos con *A. occidentalis* fue de 0.93 dS/m para suelo y 1.40 dS/m para lixiviado. La textura tuvo la mayor diferencia significativa en ambas mediciones de CE promedio, en la tabla 5.20 se observa que los valores promedio en suelo con Textura F (1.02 dS/m) son mayores que con textura G (0.84 dS/m), los valores son más altos en la CE del lixiviado (1.78 dS/m y 1.01 dS/m, respectivamente). La MO fue el segundo factor más significativo en la CE promedio del lixiviado y el que menor significancia tuvo en los valores promedio del suelo, al igual que en *Z. mays*, con LR son ligeramente más altos en suelo (0.95 dS/m) que los de CO (0.91 dS/m), y la CO es más alta (1.51 dS/m) que LR (1.29 dS/m) en los lixiviados. BAC fue el tercer factor con más significancia en el suelo y en los lixiviados tuvo más significancia que la MO, en ambos valores hay un ligero aumento cuando BAC fue inoculada, en suelo con BAC fue de 0.96 dS/m y sin 0.91 dS/m, en lixiviado fue 1.45 dS/m y

Factor	CE suelo <i>inicial</i>		CE suelo <i>final</i>		CE suelo <i>promedio</i>	
	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P
Textura	4.00	2.81E-06	-	-	0.65	7.69E-15
MO	-	-	0.07	4.70E-04	0.037	1.93E-02
BAC	-	-	-	-	0.05	5.17E-03
BC	0.48	7.72E-02	-	-	0.14	1.79E-05

Factor	CE lix. <i>inicial</i>		CE lix. <i>final</i>		CE lix. <i>promedio</i>	
	Sum Sq	P	Sum Sq	P	Sum Sq	P
Textura	217.34	<2.2e-16	1.40	<2.2E-16	11.77	<2.2e-16
MO	7.80	4.30E-03	0.02	6.63E-02	0.99	2.52E-12
BAC	3.14	6.47E-02	-	-	0.21	1.86E-04
BC	-	-	0.27	3.38E-08	0.07	3.00E-02

Tabla 5.19: Valores del análisis ANOVA para las mediciones de conductividad eléctrica (CE) directa (suelo) y lixiviado (lix.) del tecnosuelo en la especie vegetal *A. occidentalis*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

1.35 dS/m, respectivamente. El BC fue el que menor significancia tuvo en lixiviados, pero fue el segundo con más significancia en el suelo por encima de BAC y por debajo de textura, en ambas mediciones los valores fueron más bajos en su presencia, en suelo fue de 0.89 dS/m y 0.97 dS/m sin BC, los valores fueron 1.37 dS/m y 1.43 dS/m, respectivamente.

La CE inicial promedio de los tecnosuelos fue de 2.08 dS/m para la medición directa en el suelo y de 5.40 dS/m para el lixiviado. En cuanto a la medición directa inicial promedio la textura fue el factor que más significancia tuvo, teniendo valores más altos la Textura F (2.30 dS/m) que la Textura G (1.86 dS/m). Seguido fue BC, el cual, fue ligeramente significativo, los valores son ligeramente menores con BC (2.00 dS/m) que sin BC (2.16 dS/m). En lixiviados el más significativo fue textura con un valor para textura F de 7.04 dS/m y con textura G 3.75

Factor	CE en suelo (dS/m)			CE en lixiviado (dS/m)		
	Inicial	Final	Promedio	Inicial	Final	Promedio
Control	0.81	0.53	0.75	2.37	0.48	0.61
Control + BAC	1.15	0.95*	0.88	2.04	0.41	0.60
Textura G	1.86***	0.53	0.84***	3.75***	0.27***	1.01***
Textura F	2.30***	0.53	1.02***	7.04***	0.53***	1.78***
Materia orgánica LR	2.14	0.56***	0.95*	5.10**	0.38*	1.29***
Materia orgánica CO	2.01	0.50***	0.91*	5.71**	0.41*	1.51***
BAC: si	2.09	0.53	0.96**	5.60*	0.39	1.45***
BAC: no	2.06	0.53	0.91**	5.20*	0.40	1.35***
BC: con	2.00*	0.52	0.89***	5.55	0.34***	1.37*
BC: sin	2.16*	0.54	0.97***	5.24	0.46***	1.43*

Tabla 5.20: Valores de las medias de ambas conductividades eléctricas (CE) según el factor del tecnosuelo (textura, materia orgánica y BAC) en la especie vegetal *A. occidentalis*. Código para los valores significativos: * $P \leq 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$.

dS/m. Seguido fue la MO, la CO tuvo valores más altos (5.71 dS/m) que los LR (5.10 dS/m). Por último, BAC fue ligeramente significativo teniendo valores más altos en su inoculación (5.60 dS/m) que sin su inoculación (5.20 dS/m).

Los valores promedio para la medición final de suelo fueron de 0.40 dS/m y 0.53 dS/m para el lixiviado. La textura siguió teniendo significancia solo en lixiviados con la misma tendencia; valores más altos en Textura F (0.53 dS/m) que en Textura G. Las tendencias continuaron con valores más altos en Textura F que en textura G (0.27 dS/m). La significancia de MO disminuyó en lixiviados teniendo valores más altos en CO (0.41 dS/m) que con LR (0.38 dS/m), cabe señalar que fue el único factor que afectó el promedio de la CE en suelo y tuvo una alta significancia con un comportamiento opuesto al de los lixiviados; valores más altos en LR que

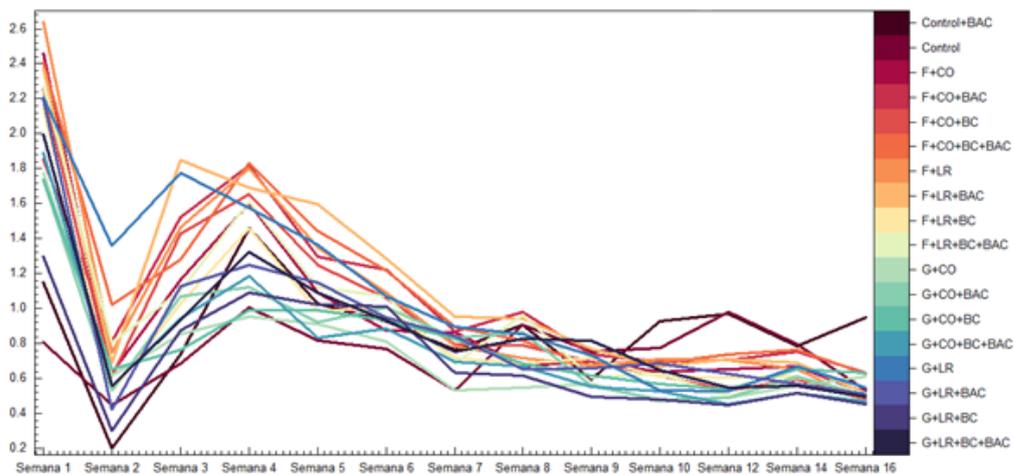
Tecnosuelo	CE en suelo (dS/m)			CE en lixiviado (dS/m)		
	Inicial	Final	Promedio	Inicial	Final	Promedio
A	2.46	0.52	0.96	6.17	0.54	1.67
B	1.85	0.63	1.07	7.81	0.61	2.18
C	2.26	0.48	0.98	7.14	0.52	1.75
D	2.41	0.62	1.11	8.41	0.56	2.06
E	2.64	0.47	1.06	6.45	0.70	1.78
F	2.37	0.51	1.13	7.46	0.62	1.83
G	2.14	0.50	0.89	5.96	0.35	1.40
H	2.27	0.52	0.96	6.99	0.38	1.59
I	1.78	0.61	0.75	4.00	0.27	1.07
J	1.74	0.50	0.83	3.36	0.27	0.99
K	1.74	0.63	0.80	4.24	0.29	1.17
L	1.89	0.47	0.78	4.56	0.29	1.19
M	2.21	0.55	1.09	3.39	0.33	0.96
N	2.20	0.51	0.90	3.30	0.35	0.94
O	1.29	0.45	0.71	4.25	0.15	0.97
P	2.00	0.50	0.88	2.90	0.21	0.83

Tabla 5.21: Valores de las medias de ambas conductividades eléctricas (CE) acorde a cada tecnosuelo en la especie vegetal *A. occidentalis*. Ver tabla 5.3 para el código de letras asociado a cada tecnosuelo.

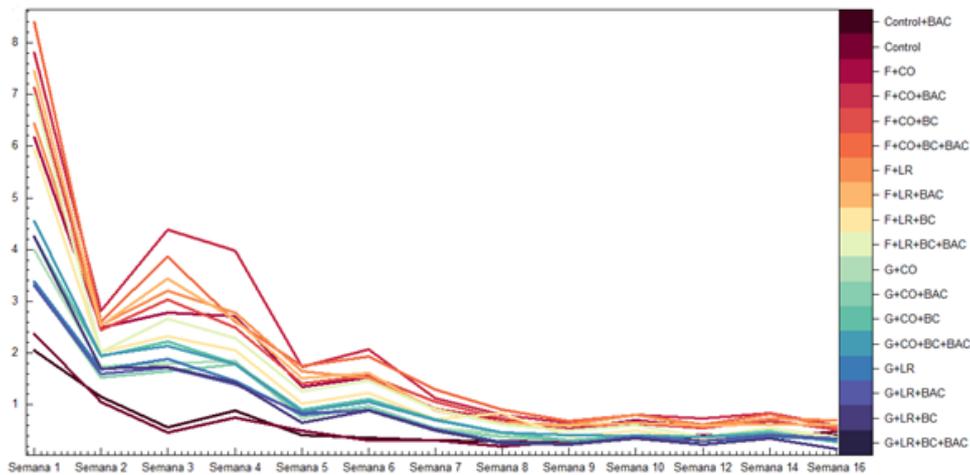
con CO. Por último, el BC dejó de tener significancia en suelo, pero fue altamente significativo en las mediciones finales de lixiviados, teniendo valores más bajos con BC (0.34 dS/m) que sin BC (0.46 dS/m). Como se mencionó, BAC tuvo una ligera significancia en medición directa de suelo final en el control de peat moss, presentando valores más altos cuando esta fue inoculada.

En la tabla 5.21 se presentan los valores promedio de las CE de mediciones directas y del lixiviado acorde a cada tecnosuelo. Se observan valores más altos en los lixiviados conforme el análisis anterior. Las combinaciones con Textura F tienden a valores más altos debido a la mayor significancia de este tratamiento. Se observan valores ligeramente más altos en las CE del suelo cuando los LR están presentes y valores menores que CO en los lixiviados. De igual manera, se observa que en aquellas combinaciones en donde BAC fue inoculado las CE aumentan, con algunas excepciones, principalmente en Texturas G con LR.

En la figura 5.23 se muestran ambas CE en el tiempo para *A. occidentalis*. En los lixiviados



(a) Conductividad eléctrica en suelo.



(b) Conductividad eléctrica en lixiviado.

Figura 5.24: Mediciones de conductividad eléctrica (dS/m) de los distintos tecnosuelos en la especie vegetal *A. occidentalis*

(ver fig. 5.24b) se aprecia mejor como la rápida solubilización de los componentes hacen que las CE disminuyan. Al igual que en *Z. mays* las CE, no disminuyen de manera uniforme, presentan ligeras fluctuaciones, igualmente por la actividad microbiana y distintos procesos químicos que pueden estar ocurriendo en el tecnosuelo.

En resumen, en el caso de *A. occidentalis* todos los tratamientos afectaron las mediciones de CE, las diferencias fueron más acentuadas en los lixiviados debido a la solubilidad de los compuestos con excepción del BC que fue más significativo en suelo. En este sentido BC no tuvo significancia para *Z. mays* probablemente por el tiempo de duración del experimento o por los distintos tamaños de partícula en los que se pudo encontrar el BC. Se puede observar

para *A. occidentalis* que los valores con BC son más bajos, una posible explicación es que el BC posee un área superficial grande, en la cual, pueden estar ocurriendo fenómenos de adsorción (física o química) de ciertos iones, el BC ha sido estudiado para inmovilizar iones en suelo debido a sus propiedades adsorbentes [86] probablemente en *A. occidentalis* fue más notoria este tratamiento por el tiempo de duración o por los tamaños de partícula en los que se pudo encontrar el BC. La disminución de ambas CE fue más notoria en esta especie igualmente por el tiempo de duración. Algo muy resaltable de esta especie y en relación con los datos de pH es que las CE fueron mayores cuando se inoculó BAC, en *Z. mays* ocurrió lo contrario, como se explicó en la sección anterior el hecho de que este sea una especie con la capacidad de crear una simbiosis con bacterias y por los datos obtenidos, probablemente se creó mejor simbiosis sumado la presencia de *K. oxytoca*, probablemente debido a ello se detectan CE más altas y aumentos en el pH; por la fijación del N₂.

5.3.3. Morfología del concreto

Visualmente y con ayuda de un microscopio óptico fueron identificados cambios en la apariencia física del CR (ver fig. 5.25) cuando se expuso a factores orgánicos, estos cambios se observaron en todas las combinaciones de tecnosuelo. Las muestras observadas en el SEM fueron seleccionadas con base en este criterio y su cercanía con las raíces de *A. Occidentalis*, como se describió en la metodología. Las observaciones mediante BSE fueron realizadas en aquellas zonas donde los agregados no ocupaban un gran espacio en la pasta cementante en magnificaciones de 100-500 aumentos.

En la figura 5.26 se presentan muestras del CR de la empresa CONCRETOS RECICLADOS. En la figura 5.26a se muestra un concreto de 0.5 cm a una magnificación de 150 aumentos, se pueden observar distintas microfracturas atribuidas al proceso de trituración, las cuales, pueden servir a la raíz como un soporte a través de su perforación. En la figura 5.26b de se observa la interfase entre el agregado y el cementante. En las figuras 5.26c y 5.26d se observa la morfología a 250 y 500 magnificaciones, respectivamente, de la pasta cementante del CR sin exposición a factores orgánicos, la superficie se ve mayormente lisa, sin rugosidades pronunciadas.

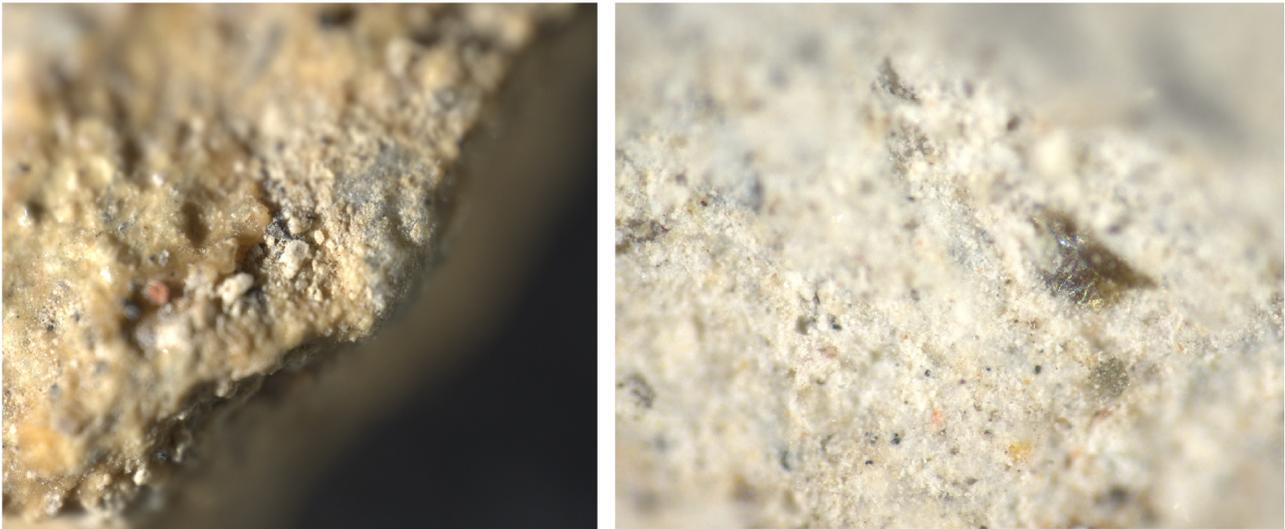
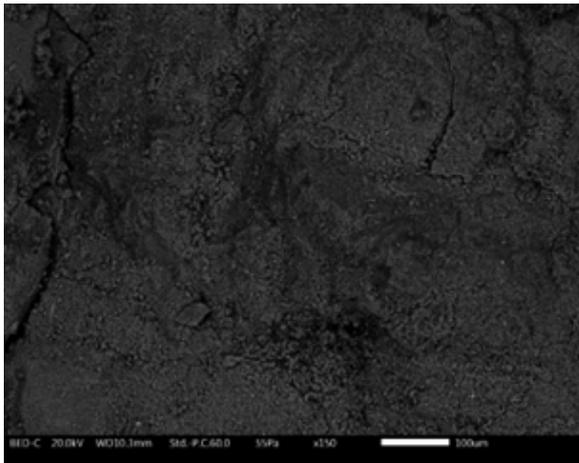


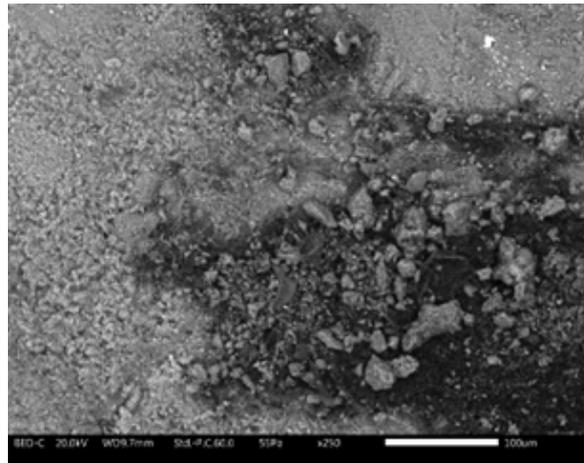
Figura 5.25: Observación de concreto a través de un microscopio óptico marca CARL ZEISS modelo CL 6000 LED. Izquierda: Concreto reciclado con exposición a tecnosuelo. Derecha: Concreto reciclado sin exposición.

Las imágenes de la microscopía SEM para el CR expuesto a tecnosuelo se presentan en la figura 5.27, se muestran las más representativas. En la figura 5.27a se muestra un CR de 0.5 cm del tecnosuelo I perforado por dos raíces de *A. occidentalis*. Se realizaron magnificaciones (ver fig. 5.27b y 5.27c) en zonas cercanas a la perforación. En dichas zonas, se aprecian cavidades, probablemente por el intemperismo sufrido y la solubilización de algunos de sus componentes, principalmente del CaCO_3 . Estas características de intemperismo también se presentan en el tecnosuelo L (ver fig. 5.27d) en una zona de interfase. Para el CR del tecnosuelo N (ver fig. 5.27e), se observan cambios similares en la apariencia en la zona del cementante.

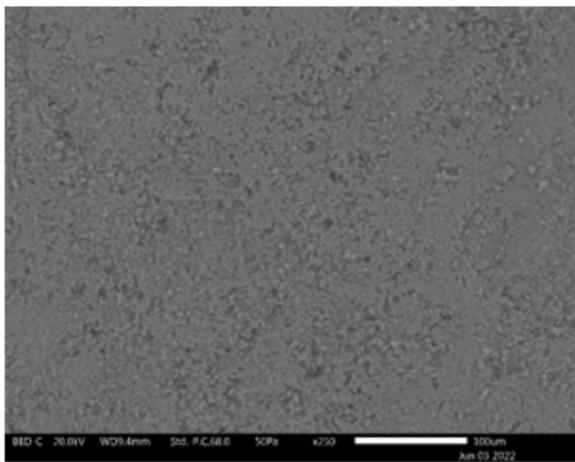
Cabe señalar que en ambos CR (con o sin exposición a tecnosuelo) se podrá apreciar un intemperismo, ya están expuestos a factores climáticos, no obstante, en el tecnosuelo, al acelerar el proceso de intemperismo, serán mayormente observables estos cambios en la roca técnica.



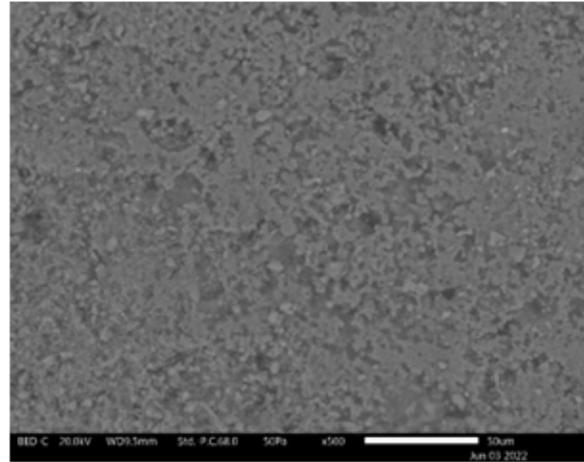
(a) *Microfracturas en concreto 3/16"*.



(b) *Interfase cementante-agregado del concreto.*

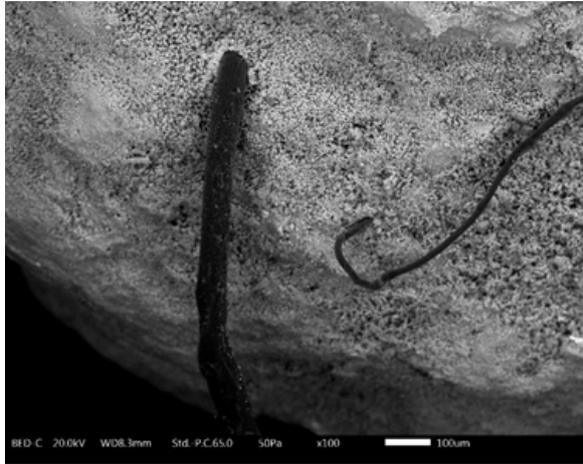


(c) *Morfología de la pasta cementante a x250.*

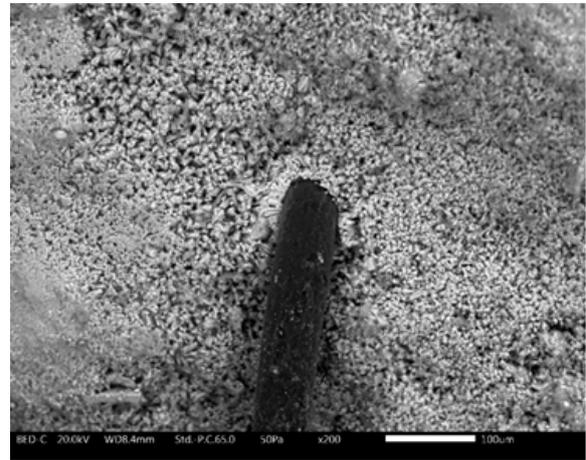


(d) *Morfología de la pasta cementante a x500*

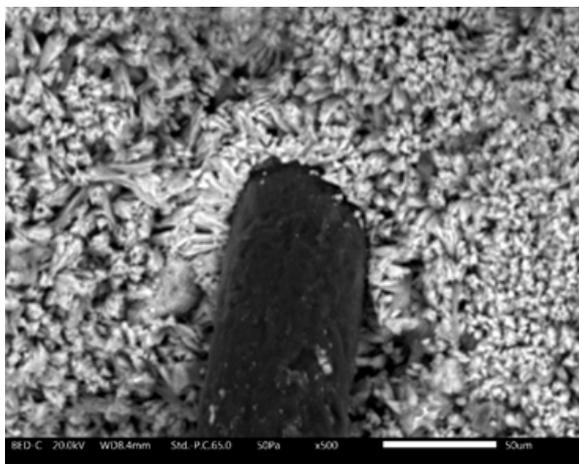
Figura 5.26: *Imágenes BSE del concreto reciclado sin exposición a tecnosuelo.*



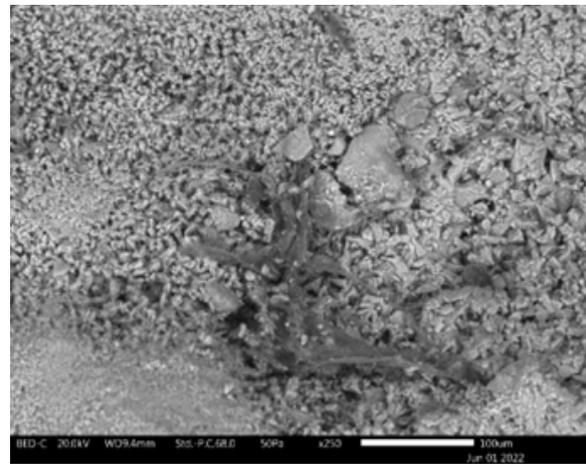
(a) *Concreto tecnosuelo I a x100.*



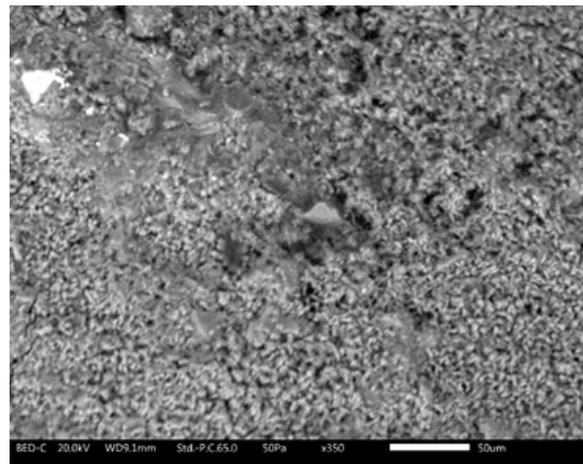
(b) *Concreto tecnosuelo I a x200.*



(c) *Concreto tecnosuelo I a x500.*



(d) *Concreto tecnosuelo L a x250.*



(e) *Concreto tecnosuelo N a x300.*

Figura 5.27: *Imágenes BSE del concreto reciclado con exposición a tecnosuelo.*

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se pretendió valorizar distintos residuos, principalmente aquellos que representan una problemática socioambiental en los procesos de urbanización, como los Residuos de la Construcción y la Demolición, específicamente el Concreto, además de este residuo, se valorizó Lodos Residuales, los cuales, presentan un gran reto ambiental a la hora de su disposición final. Por otra parte, se utilizaron materiales orgánicos sometidos a una valorización previa: Composta y Biocarbón.

La selección de estos materiales y su combinación tuvo por objetivo reincorporarlos al medio ambiente a través de la construcción de tecnosuelos. Se trató de imitar los componentes de un suelo natural. Sin embargo, la investigación no se limitó solo a imitar los componentes orgánicos e inorgánicos, también se tomó en cuenta la parte biológica del suelo, principalmente de aquellos microorganismos que tienen un carácter de Agente Promotor de Crecimiento Vegetal, en especial aquellas que pueden ser encontradas en hábitats con condiciones extremas; debido a las propiedades del tecnosuelo de esta investigación. Las bacterias fueron *Klebsiella oxytoca* y *Rhodococcus wrothlisaviensis*.

Se pretendió llevar a condiciones muy lejanas de lo ideal y evaluar el crecimiento de dos especies vegetales (*Zea mays* y *Albizia occidentalis*) en 16 combinaciones de tecnosuelos tomando en cuenta su altura final, biomasa del follaje y contenido de clorofila. En las combinaciones de tecnosuelo se modificó el aporte de Materia Orgánica y el tamaño de partícula del concreto

reciclado.

Se encontró que a las especies responden de manera distinta a cada aporte orgánico, *Z. mays* respondió mejor a los Lodos Residuales, para *A. occidentalis* no importó si fue Composta o Lodos Residuales. Ambas especies respondieron positivamente a la inoculación del consorcio bacteriano de *K. oxytoca* y *R. wrotislaviensis*, en el ensayo de interacción entre ambos consorcios bacterianos se demostró que *K. oxytoca* creció más de un 85 % en comparación con *R. wrotislaviensis*, por lo que el carácter de Agente Promotor de Crecimiento Vegetal se puede atribuir a *K. oxytoca*. Ambas especies respondieron positivamente a una disminución de la textura fina del Concreto y un aumento en el tamaño de partícula del Concreto. En el caso de *Z. mays* la adición del Biocarbón limitó su crecimiento, pero ayudó a disminuir drásticamente las propiedades químicas del tecnosuelo en la duración del experimento, para *A. occidentalis* ayudó significativamente en su crecimiento, pero no así en el contenido de biomasa. En cuanto a la clorofila de ambas especies, los contenidos fueron mayores en la textura fina y Lodos Residuales, si bien el contenido de clorofila es un indicativo de salud, la clorofila medida fue la total, por lo que se sugiere estudiar contenidos de clorofila A y B en futuras investigaciones.

Las técnicas de caracterización son una herramienta importante para predecir la pedogénesis de los materiales, al igual que para prevenir una contaminación adicional en suelos con influencia humana. La difracción de rayos X resulta una caracterización fundamental con el objetivo de saber que fases minerales se encuentran presentes en los artefactos inorgánicos, esto nos puede ayudar a entender cómo será el proceso pedogenético del tecnosuelo y los procesos químicos que pueden ocurrir. Por otra parte, la microscopía electrónica de barrido ayudó a observar cambios morfológicos y distintos micronutrientes presentes en el Concreto, que, aunque se puede considerar como una roca técnica, por su origen humano, también será susceptible a un intemperismo en el mediano y largo plazo, haciendo susceptible el aprovechamiento de sus elementos por los distintos procesos biológicos del suelo.

El pH de los tecnosuelos se comportaron de manera distinta para cada especie vegetal, principalmente por las interacciones planta-microorganismo. En ambos tecnosuelos se sugieren distintos procesos químicos que pueden estar ocurriendo:

- Continua carbonatación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ del Concreto por el CO_2 atmosférico (ver ecuación 5.1).
- Formación de fosfato cálcico debido al alto contenido de Ca^{2+} y su reacción con PO_4^- presente en la Materia Orgánica (ver ecuación 5.4).
- Disolución del calcio debido al ácido carbónico y su posterior precipitación (ver ecuación 5.2).
- Quelación de cationes por sideróforos y acidificación del medio por microorganismos.
- Fijación del N_2 .
- Aumento del pH debido a la disociación del NH_3 (ver ecuación 5.5), mayormente en *A. occidentalis* debido a su capacidad de generar simbiosis con bacterias fijadoras de N_2 .

Una interacción química interesante entre componentes del tecnosuelo es la estabilización de olores de los LR probablemente por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en el CR, aparte de convertirse en un aporte orgánico, En la literatura se reporta el uso de cal y cemento portland con el objetivo de llevar los Lodos Residuales a un pH básico por un determinado tiempo [87], ambos materiales son vírgenes, por lo que no se puede considerar como una estrategia sustentable en el manejo de residuos, con el Concreto reciclado no se extraen materiales para esa función. Se recomienda estudiar la disminución de patógenos debido a la interacción entre Concreto y Lodos Residuales; la disminución de olores debido a la putrefacción de los Lodos Residuales fue notoria en la segunda semana después de que los materiales se combinaron. Hasta la finalización de esta investigación no se encontró literatura sobre el uso de Concreto reciclado como método de estabilización alcalina.

Dada la complejidad que involucra la formación del suelo, su tiempo de formación y los distintos servicios ecosistémicos que proporciona, el suelo es un recurso natural valioso y debe de ser tratado como tal. La construcción de tecnosuelos resulta una estrategia de valorización de residuos, principalmente para aquellos que han recibido poca atención. Con esta estrategia se logra atacar la creciente problemática de los residuos, al mismo tiempo que se recuperan servicios

ecosistémicos que nos brinda el suelo, esta pérdida de servicios se debe a la falta de alternativas de disposición final para los residuos. Los resultados de esta investigación demuestran que los tecnosuelos construidos ayudan a minimizar el tiempo de inactividad de los residuos en rellenos sanitarios o tiraderos ilegales, al mismo tiempo que se recuperan los servicios ecosistémicos perdidos debido a una mala disposición final de residuos.

Bibliografía

- [1] ONU, World Urbanization Prospects, <https://www.un.org/development/desa/pd/content/world-urbanization-prospects-2018-revision>, [Online; acceso 24-octubre-2022], **2018**.
- [2] P. Pirez, “La urbanización y la política de los servicios urbanos en América Latina”, *Andamios* **2013**, *10*, 45-67.
- [3] M. d. P. S. Muñoz, “¿Le apuestan los sistemas de manejo de residuos sólidos en el mundo al Desarrollo Sostenible?”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **2015**, *1*, 445-450.
- [4] SEMARNAT, *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018*. SEMARNAT, **2019**.
- [5] SEMARNAT, *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. SEMARNAT, **2020**.
- [6] J. L. Morel, P. Charzyński, R. K. Shaw y G. Zhang, “The seventh SUITMA conference held in Toruń, Poland, September 2013”, *Journal of Soils and Sediments* **2015**, *15*, 1657-1658.
- [7] A. Lehmann, “Technosols and other proposals on urban soils for the WRB [World Reference Base for Soil Resources]”, *International agrophysics* **2006**, *20*.
- [8] D. Fabbri, R. Pizzol, P. Calza, M. Malandrino, E. Gaggero, E. Padoan y F. Ajmone-Marsan, “Constructed technosols: A strategy toward a circular economy”, *Applied Sciences (Switzerland)* **2021**, *11*.

- [9] S. Gayosso-Rodriguez, L. Borges-Gómez, E. Villanueva-Couoh, M. A. Estrada-Botello y R. Garruña-Hernández, “Sustratos para producción de flores”, *Agrociencia* **2016**, *50*, 617-631.
- [10] H. D. Mantero-Garcia, A. Gómez-Guerrero, F. Gavi-Reyes, B. P. Zamora-Morales y C. Ramirez-Ayala, “¿ Es sustentable el aprovechamiento de tierra de hoja en bosques de encino?”, *Madera y bosques* **2019**, *25*.
- [11] SEMARNAT, *Norma Oficial Mexicana NOM-027-SEMARNAT-1996: Que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de tierra de monte*. SEMARNAT, **2018**.
- [12] SEMARNAT, *Anuario estadístico de la producción forestal*. SEMARNAT, **2018**.
- [13] C. Camou, “Reciclaje de Indio mediante lixiviación ácida a partir de LCD de RAEE”, Tesis de licenciatura Universidad Nacional Autónoma de México, **2019**.
- [14] FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, <https://www.fao.org/>, [Online; acceso 22-septiembre-2022], **2022**.
- [15] V. O. Targulian, R. W. Arnold, B. A. Miller y E. C. Brevik, “Pedosphere” en *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)*, (ed.: B. Fath), Elsevier, Oxford, **2019**, págs. 162-168.
- [16] R. Lal y M. K. Shukla, *Principles of soil physics*, CRC Press, **2004**.
- [17] E. J. Tarbuck, F. K. Lutgens, D. Tasa y A. T. Cientficias, *Ciencias de la Tierra, vol. 1*, Pearson Educación Madrid, **2005**.
- [18] A. T. Alfonso, “Liquenes y rocas como ejemplo de interacción entre subsistemas terrestres”, *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* **2016**, *24*, 143-152.
- [19] R. Pinton, Z. Varanini y P. Nannipieri, *The rhizosphere: biochemistry and organic substances at the soil-plant interface*, CRC press, **2007**.
- [20] A. Delgado y J. A. Gómez, “The soil. Physical, chemical and biological properties” en *Principles of agronomy for sustainable agriculture*, Springer, **2016**, págs. 15-26.

- [21] D. Neina, “The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation”, *Applied and Environmental Soil Science* **2019**, 2019.
- [22] E. Ozlu y S. Kumar, “Response of soil organic carbon, pH, electrical conductivity, and water stable aggregates to long-term annual manure and inorganic fertilizer”, *Soil Science Society of America Journal* **2018**, 82, 1243-1251.
- [23] R. Jacoby, M. Peukert, A. Succurro, A. Koprivova y S. Kopriva, “The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions”, *Frontiers in plant science* **2017**, 8, 1617.
- [24] B. Lugtenberg, F. Kamilova y col., “Plant-growth-promoting rhizobacteria”, *Annual review of microbiology* **2009**, 63, 541-556.
- [25] E. Gamalero y B. R. Glick, *Mechanisms used by plant growth-promoting bacteria*, Springer, **2011**.
- [26] H. Antoun y D. Prévost, *Ecology of plant growth promoting rhizobacteria*, Springer, **2005**.
- [27] P. Prashar, N. Kapoor y S. Sachdeva, “Rhizosphere: its structure, bacterial diversity and significance”, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* **2014**, 13, 63-77.
- [28] K. Chaudhary y S. Khan, “Role of plant growth promoting bacteria (PGPB) for bioremediation of heavy metals: an overview”, *Biostimulation Remediation Technologies for Groundwater Contaminants* **2018**, 104-125.
- [29] S. Shamim y A. Rehman, “Cadmium resistance and accumulation potential of *Klebsiella pneumoniae* strain CBL-1 isolated from industrial wastewater”, *Pakistan Journal of Zoology* **2012**, 44.
- [30] F. R. Shakoory, I. Aziz, A. Rehman y A. Shakoory, “Isolation and characterization of arsenic reducing bacteria from industrial effluents and their potential use in bioremediation of wastewater.”, *Pakistan Journal of zoology* **2010**, 42.

- [31] K. Rehman, A. Imran, I. Amin y M. Afzal, "Enhancement of oil field-produced wastewater remediation by bacterially-augmented floating treatment wetlands", *Chemosphere* **2019**, *217*, 576-583.
- [32] S. Fauziah, P. Agamuthu, R. Hashim, A. Izyani y C. Emenike, "Assessing the bioaugmentation potentials of individual isolates from landfill on metal-polluted soil", *Environmental Earth Sciences* **2017**, *76*, 1-6.
- [33] C. Emenike, P. Agamuthu y S. Fauziah, "Blending *Bacillus* sp., *Lysinibacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. for optimal reduction of heavy metals in leachate contaminated soil", *Environmental Earth Sciences* **2016**, *75*, 1-8.
- [34] S. R. Subashchandrabose, K. Venkateswarlu, K. Venkidusamy, T. Palanisami, R. Naidu y M. Megharaj, "Bioremediation of soil long-term contaminated with PAHs by algal-bacterial synergy of *Chlorella* sp. MM3 and *Rhodococcus wratislaviensis* strain 9 in slurry phase", *Science of the Total Environment* **2019**, *659*, 724-731.
- [35] P. Schad y S. Dondeyne, "World reference base for soil resources", **2016**.
- [36] I. W. G. Wrb, World reference base for soil resources 2014, update 2015: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, **2015**.
- [37] F. Nachtergaele, "The "soils" to be classified in the World Reference Base for Soil Resources", *Eurasian Soil Science* **2005**, *38*, S13-S19.
- [38] B. J.-P. Grard, C. Chenu, N. Manouchehri, S. Houot, N. Frascaria-Lacoste y C. Aubry, "Rooftop farming on urban waste provides many ecosystem services", *Agronomy for sustainable development* **2018**, *38*, 1-12.
- [39] M. Deeb, M. Grimaldi, T. Z. Lerch, A. Pando, A. Gigon y M. Blouin, "Interactions between organisms and parent materials of a constructed Technosol shape its hydrostructural properties", *Soil* **2016**, *2*, 163-174.

- [40] S. Rokia, G. Séré, C. Schwartz, M. Deeb, F. Fournier, T. Nehls, O. Damas y L. Vidal-Beaudet, “Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes”, *Waste Management* **2014**, *34*, 2155-2162.
- [41] T. Abbruzzini, A. Reyes-Ortigoza, R. Alcántara-Hernández, L. Mora, L. Flores y B. Prado, “Chemical, biochemical, and microbiological properties of Technosols produced from urban inorganic and organic wastes”, *Journal of Soils and Sediments* **2022**, *22*, 146-161.
- [42] B. González-Méndez y E. Chávez-García, “Re-thinking the Technosol design for greenery systems: Challenges for the provision of ecosystem services in semiarid and arid cities”, *Journal of Arid Environments* **2020**, *179*, 104191.
- [43] CMIC, *Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición*, CMIC, **2014**.
- [44] C. Pruvost, J. Mathieu, N. Nunan, A. Gigon, A. Pando, T. Z. Lerch y M. Blouin, “Tree growth and macrofauna colonization in Technosols constructed from recycled urban wastes”, *Ecological Engineering* **2020**, *153*, 105886.
- [45] R. Zornoza, M. Gómez-Garrido, S. Martínez-Martínez, M. D. Gómez-López y Á. Faz, “Bioaugmentation in Technosols created in abandoned pyritic tailings can contribute to enhance soil C sequestration and plant colonization”, *Science of the Total Environment* **2017**, *593*, 357-367.
- [46] F. You, Tesis doct., The University of Queensland, **2015**.
- [47] G. F. MONEX, Análisis del sector construcción, <https://www.monex.com.mx/portal/download/reportes/200313b%20Sectorial%20-%20Construcción.pdf>, [Online; acceso 22-septiembre-2022], **2022**.
- [48] L. Lima, E. Trindade, L. Alencar, M. Alencar y L. Silva, “Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature”, *Journal of Cleaner Production* **2021**, *289*, 125730.

- [49] C. S. Poon, T. Ann y L. Ng, “On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong”, *Resources conservation and recycling* **2001**, *32*, 157-172.
- [50] E. Mejia, J. Giraldo y L. Martinez, “Residuos de construcción y demolición Revisión sobre su composición, impactos y gestión”, *Revista Cintex* **2013**, *18*, 105-130.
- [51] E. Mejia Restrepo, L. Osorno Bedoya y N. W. Osorio Vega, “Residuos de la construcción: una opción para la recuperación de suelos”, *Revista EIA* **2015**, 55-60.
- [52] D. Fytili y A. Zabaniotou, “Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review”, *Renewable and sustainable energy reviews* **2008**, *12*, 116-140.
- [53] R. Singh y M. Agrawal, “Potential benefits and risks of land application of sewage sludge”, *Waste management* **2008**, *28*, 347-358.
- [54] IMTA, *Energía limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos residuales*, IMTA, **2017**.
- [55] CONAGUA, *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*, CONAGUA, **2019**.
- [56] SEMARNAT, *Norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. SEMARNAT, **2002**.
- [57] S. L. Nordahl, J. P. Devkota, J. Amirebrahimi, S. J. Smith, H. M. Breunig, C. V. Preble, A. J. Satchwell, L. Jin, N. J. Brown, T. W. Kirchstetter y col., “Life-cycle greenhouse gas emissions and human health trade-offs of organic waste management strategies”, *Environmental science & technology* **2020**, *54*, 9200-9209.
- [58] D. Guirrerri, S. Silvestri, A. Cristoforetti, I. Rama, R. Giurea, E. Magaril y E. C. Rada, “Composting strategy for developing cities: A case study of Beira, Mozambique”, *WIT Transactions on Ecology and the Environment* **2020**, *247*, 69-79.
- [59] R. Barrena, X. Font, X. Gabarrell y A. Sánchez, “Home composting versus industrial composting: Influence of composting system on compost quality with focus on compost stability”, *Waste Management* **2014**, *34*, 1109-1116.

- [60] M. Tanaka, “Waste management for a sustainable society”, *Journal of Material Cycles and Waste Management* **2007**, *9*, 2-6.
- [61] S. Kim, Y. Lee, K.-Y. A. Lin, E. Hong, E. E. Kwon y J. Lee, “The valorization of food waste via pyrolysis”, *Journal of Cleaner Production* **2020**, *259*, 120816.
- [62] D. Gimžauskaitė, M. Aikas y A. Tamošiūnas, “Recent progress in thermal plasma gasification of liquid and solid wastes”, *Recent Advances in Renewable Energy Technologies* **2022**, 155-196.
- [63] J. Lehmann y S. Joseph, *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*, Routledge, **2015**.
- [64] I. Celik, I. Ortas y S. Kilic, “Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil”, *Soil and Tillage Research* **2004**, *78*, 59-67.
- [65] L. Encino-Ruiz, R. Lindig-Cisneros, M. Gómez-Romero y A. Blanco-Garcia, “Desempeño de tres especies arbóreas del bosque tropical caducifolio en un ensayo de restauración ecológica”, *Botanical Sciences* **2013**, *91*, 107-114.
- [66] M. d. L. R. Arce, S. Gale y N. Maxted en *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, *vol. 65*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, **2008**, págs. 255-305.
- [67] B. L. de Sena Costa, J. C. de Oliveira Freitas, P. H. S. Santos, D. M. de Araújo Melo, R. G. da Silva Araujo e Y. H. de Oliveira, “Carbonation in oil well Portland cement: Influence of hydration time prior to contact with CO₂”, *Construction and Building Materials* **2018**, *159*, 252-260.
- [68] E. Moreno-Pérez, J. Hernández-Ávila, Y. Rangel-Martinez, E. Cerecedo-Sáenz, A. Arenas-Flores, M. I. Reyes-Valderrama y E. Salinas-Rodríguez, “Chemical and mineralogical characterization of recycled aggregates from construction and demolition waste from Mexico city”, *Minerals* **2018**, *8*, 237.

- [69] J. Chi, R. Huang, C.-C. Yang y J. Chang, “Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete”, *Cement and Concrete Composites* **2003**, *25*, 197-205.
- [70] K. K. Aligizaki, M. R. de Rooij y D. D. Macdonald, “Analysis of iron oxides accumulating at the interface between aggregates and cement paste”, *Cement and Concrete Research* **2000**, *30*, 1941-1945.
- [71] B. J. Alloway, “Heavy metals and metalloids as micronutrients for plants and animals” en *Heavy metals in soils*, Springer, **2013**, págs. 195-209.
- [72] J. J. Rincón, Y. Gallardo, M. Leal e Y. Rojas, “Efecto de la relación calcio: fósforo en el suelo sobre el crecimiento y nodulación de plantas jóvenes de acacia mangium (willd) ¹”, *Bioagro* **2003**, *15*, 97-105.
- [73] COTEMARNAT, *Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018: QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL TRATAMIENTO AEROBIO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y DE MANEJO ESPECIAL, ASÍ COMO LA INFORMACIÓN COMERCIAL Y DE SUS PARÁMETROS DE CALIDAD DE LOS PRODUCTOS FINALES*. Secretaría de Economía, **2019**.
- [74] J. González Medeiros, B. Pérez Cid y E. Fernández Gómez, “Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples”, *Analytical and bioanalytical chemistry* **2005**, *381*, 873-878.
- [75] S. Tao, Z. Wu, X. He, B.-C. Ye y C. Li, “Characterization of biochar prepared from cotton stalks as efficient inoculum carriers for *Bacillus subtilis* SL-13”, *Bioresources* **2018**, *13*, 1773-1786.
- [76] D. Bassi, M. Menossi y L. Mattiello, “Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf”, *Scientific reports* **2018**, *8*, 1-13.
- [77] R. Munns, “Comparative physiology of salt and water stress”, *Plant cell & environment* **2002**, *25*, 239-250.

- [78] M. Babaeian, I. Piri, A. Tavassoli, Y. Esmailian, H. Gholami y col., "Effect of water stress and micronutrients (Fe, Zn and Mn) on chlorophyll fluorescence, leaf chlorophyll content and sunflower nutrient uptake in Sistan region.", *African Journal of Agricultural Research* **2011**, *6*, 3526-3531.
- [79] J. J. Brand y D. W. Becker, "Evidence for direct roles of calcium in photosynthesis", *Journal of bioenergetics and biomembranes* **1984**, *16*, 239-249.
- [80] M. Khayyat, S. Rajaei, S. Eshghi, E. Tafazoli y col., "Calcium effects on changes in chlorophyll contents, dry weight and micronutrients of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) plants under salt-stress conditions", *Fruits* **2009**, *64*, 53-59.
- [81] J. Ippolito, T. Ducey, K. Cantrell, J. Novak y R. Lentz, "Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics", *Chemosphere* **2016**, *142*, 184-191.
- [82] B. Kadiata y K. Mulongoy, "Early nitrogen fixation and utilization in *Albizia lebbek*, *Leucaena leucocephala*, and *Gliricidia sepium* using nitrogen (¹⁵N) labelling", *Communications in soil science and plant analysis* **1995**, *26*, 1397-1409.
- [83] A. L. Iniguez, Y. Dong y E. W. Triplett, "Nitrogen fixation in wheat provided by *Klebsiella pneumoniae* 342", *Molecular Plant-Microbe Interactions* **2004**, *17*, 1078-1085.
- [84] G. A. Aguado-Santacruz, B. Moreno-Gómez, B. Jiménez-Francisco, E. García-Moya y R. E. Preciado-Ortiz, "Impacto de los sideróforos microbianos y fitosideróforos en la asimilación de hierro por las plantas: una síntesis", *Revista fitotecnia mexicana* **2012**, *35*, 9-21.
- [85] L. C. Corrales Ramirez, Z. Y. Arevalo Galvez y V. E. Moreno Burbano, "Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal", *Nova* **2014**, *12*, 68-79.
- [86] A. U. Rajapaksha, M. Ahmad, M. Vithanage, K.-R. Kim, J. Y. Chang, S. S. Lee e Y. S. Ok, "The role of biochar, natural iron oxides, and nanomaterials as soil amendments for immobilizing metals in shooting range soil", *Environmental geochemistry and health* **2015**, *37*, 931-942.

- [87] CONAGUA, *Manual de agua potable alcantarillado y Saneamiento: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Tratamiento y disposición de lodos*. CONAGUA, **2015**.