



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias

**Diseño de sustratos a partir de residuos sólidos urbanos con uso potencial en la
construcción de azoteas verdes**

TESIS

Que para obtener el título de
Licenciada en Ciencias de la Tierra

PRESENTA

Diana Laura Lomelí Ramírez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Lucy Mora Palomino



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. Datos del alumno

Lomelí
Ramírez
Diana
Laura
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
31006789-0

2. Datos del tutor

Dra.
Lucy Natividad
Mora
Palomino

3. Datos del sinodal 1

Dra.
Silke
Cram
Heydrich

4. Datos del sinodal 2

Dra.
Claudia Alejandra
Ponce de León
Hill

5. Datos del sinodal 3

Dr.
Rodolfo Omar
Arellano
Aguilar

6. Datos del sinodal 4

Biól.
Panuncio Jerónimo
Reyes
Santiago

7. Datos del trabajo escrito

Diseño de sustratos a partir de residuos sólidos urbanos con uso potencial en la construcción de azoteas verdes

100 pp

2018

Dedico esta tesis, su contenido, tiempo y esfuerzo a mi familia, a mis amigos y a todos aquellos que han creído y siguen creyendo en mí, para subir este primer escalón y todos los que siguen.

“Su corazón les dice que nunca han de encontrar,
no encuentran, buscan.”

J. S.

“Las macrópolis han perdido su centro, el
núcleo lógico del que una vez salieron. [...] la fascinación del vacío central: la ciudad
como constante orilla.”

J.V.

Agradecimientos Institucionales

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ciencias por ser mi casa y mi hogar durante estos años. Porque esta Universidad es mi suelo y mi raíz y a ella debo quien soy hoy, en lo personal y en lo profesional.

Al proyecto “Construcción de suelos artificiales a partir de la reutilización de residuos generados por la Ciudad de México, una alternativa urbana sostenible” (Convenio SECITI/066/2016) apoyado por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México.

Al Instituto de Geología de la UNAM, por abrirme sus puertas y prestarme sus instalaciones para realizar de principio a fin la parte experimental y de laboratorio.

Al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía-LANGEM y al Laboratorio de Cromatografía del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM, por el uso de sus instalaciones, equipos y materiales para llevar a cabo el desarrollo experimental del presente trabajo de tesis.

Agradecimientos personales

A Lucy Mora, por apoyarme en todo y tenerme paciencia, también por confiar en mí. Por todas las oportunidades que me has dado para crecer como persona y como profesionalista. Muchas gracias por el tiempo que me has dedicado y por enriquecerme siempre con enseñanza en la vida y en la edafología.

A mis sinodales: Silke Cram, porque (no lo sabe) su clase le cambió el rumbo a mi carrera, siempre es un gusto escucharla. Dra. Claudia Ponce, por ser la primera en responder y por darme un gran impulso para concluir. A Omar Arellano, por sus valiosísimos comentarios y por toda la *buenaondez* y disposición siempre. Biólogo Jerónimo Reyes, por compartir su experiencia en el tema.

A la Dra. Blanca Prado, por su buen humor para ver las cosas y alentarnos a mejorar.

A la Mtra. Iris Suárez Quijada, responsable técnico del invernadero automatizado del Instituto de Geología de la UNAM y a Jonathan Montes.

Al M. en C. Javier Tadeo León, responsable técnico del Laboratorio de Espectroscopía Atómica, por tomarse el tiempo de explicarme y apoyarme en el análisis de metales totales tanto en plantas como en cada sustrato.

A la Dra. Olivia Zamora Martínez por la determinación de aniones y cationes mayoritarios por medio de cromatografía de iones, en muestras de lixiviados de suelos.

A la M. En C. Kumiko Shimada, responsable de los análisis de carbono y nitrógeno, por su apoyo en los análisis de muestras de este trabajo.

Al Dr. Bruno Chávez, porque siempre que hablamos me saca una sonrisa.

A todos los compañeros, colegas y amigos que me he encontrado en mi paso por el Laboratorio de Edafología Experimental y del Instituto de Geología.

Agradecimientos y dedicatorias

Al universo. A la Tierra. A la vida. A todo lo que hay ahí afuera que desconozco, pero que voy a descubrir.

A mis papás. A los que tenían 33 cuando acabaron de crecer conmigo. A los ya no tan jóvenes, que son mi orgullo y mi dirección, mi raíz, mi origen, mi orilla, mi destino. A ustedes que admiro y amo profundamente.

A mis hermanas. Por ser ejemplo, guía y mano derecha, por la paciencia y el aprendizaje, por el ensayo, el error y los aciertos. También por las coincidencias y diferencias, la incertidumbre y las certezas, que se transformaron ahora en equilibrio. Las amo todos los días.

A Ale Minchaca, que llegó al final, pero se quedó desde el principio. Estoy convencida de que sin ti no sería posible. Gracias por las sonrisas que lo son todo. Y los consejos. Y el amor. Y la felicidad. Gracias por el apoyo incondicional. A Imo, Sam, Miguel y Oli, porque sí son una casa solar, por acompañarme y por ser solidarios partidarios de mi construcción personal. ¡Los quiero!

A mis profesores. Los que me enseñaron de lo académico y de la vida, porque la enseñanza ha trascendido el aula. Gracias a todos los que me marcaron para siempre.

A mis amigos, los de todos los tiempos, que ya no están, pero aquí siguen.

A Lilianito, Mon y Kusy: mis amigos de vida. Porque nunca paro de reír. Los amo.

A los preparatorianos, que hicieron por mí mucho más de lo que nunca podrán imaginar. A esa etapa la llamo felicidad; a ustedes, mis amigos. A Tato que sigue estando, ahora más que nunca.

Benjamín, no necesito verte para saberte, y eso siempre es único, valioso, suficiente, intransferible. Has hecho por mí mucho más de lo que crees. I love you.

A los amigos terrólogos, por el entusiasmo y la esperanza, por no desistir, por abrir el camino: Julieta, por estar en las buenas y en las malas. Edson, por el buen humor de siempre y tu listilla persona. Sandruki, porque encontrarte en el pasillo siempre me alegra el día. Victoria, porque siempre es un gusto hablar contigo y saber tus planes. Jimena, por abrirme los ojos en todos los sentidos y por el tiempo compartido. Lilian, por los planes que cumplir y las charlas largas. ¡Los quiero!

Resumen

En la Ciudad de México se producen hasta siete toneladas diarias de residuos de la industria de la construcción, demolición y excavación. Estos residuos son comúnmente depositados en tiraderos a cielo abierto, sellando y disminuyendo los servicios ecosistémicos del suelo. Por otro lado, la demanda de tezontle, tepojal, arcillas, arenas, tierra negra y de hoja para ser usados como sustrato en la naturación de azoteas verdes (AV) en las ciudades, implica que se extraigan de los ecosistemas. Los tecnosuelos o suelos construidos se han visto como una alternativa para asemejar los servicios que se pierden en los suelos naturales a causa de la degradación y para emularlos cuando sea necesario. Tal es el caso de los sustratos para AV.

El objetivo de este trabajo es proponer diferentes mezclas de materiales provenientes de residuos sólidos urbanos, que puedan utilizarse como sustrato en AV. Estos desechos son: residuos de demolición (D), tepetate (T), composta (C), caucho molido (CM) y una combinación 1:1 de residuos de café y naranja (CN). Se prepararon 8 mezclas a partir los anteriores: siendo Ma, Mt, Ba, Bt, Ra y Rt: DCT (60, 20, 20%), Lt: DTCCM (54.5, 18.2, 18.2 y 9.1 %), NCt: DTCNC en la misma proporción. Las mezclas Ma, Lt, NCt y Mt se usaron para jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill), mientras que Ra y Rt para verdolaga (*Portulaca oleracea*), Ba y Bt son testigos sin planta. La experimentación se llevó a cabo en un invernadero automatizado durante ocho meses. Como resultado, la mezcla Lt y NCt disminuyeron la densidad aparente del resto de las mezclas (18 y 29%, respectivamente) y aumentaron la porosidad. La primera tuvo una sobrevivencia final de 100%, menor porcentaje de compactación y mayor capacidad de almacenamiento de agua, además disminuyó el pH de 10.2 a 8.3; la segunda tuvo 83.3% de sobrevivencia, pérdida de volumen de 14% y disminuyó el pH a 7.8. La mezcla acondicionada Ma tuvo la misma sobrevivencia que NCt, disminuyó el pH de 9.8 a 8.5. La mezcla Mt presentó sólo 25% de sobrevivencia y la menor producción de jitomate. En ninguno de los casos sobrevivió la verdolaga. Se detectó una falta importante de fósforo asimilable en todas las mezclas.

En conclusión, se comprueba que todas las mezclas de estos materiales son candidatos para usarse como sustrato para el crecimiento de plantas en AV. Las mezclas con enmiendas (Lt y NCt) cumplen con la normatividad de la Ciudad de México para la carga neta en AV, para el establecimiento de plantas de jitomate y su cultivo y sin representar ningún riesgo para la salud. Por lo anterior, se confirma que pueden ser usados potencialmente como sustratos para AV.

Se requieren más estudios bajo condiciones reales de AV para probar el comportamiento y éxito de estos materiales y sus mezclas con diferentes plantas, que tengan otros requerimientos nutrimentales y ambientales.

Abstract

Mexico City produces over seven tons a day of solid waste from construction, demolition and excavation industry daily. These wastes usually end up on open sky landfills that lead to sealing and a decrease in environmental services related to soil. On the other hand, several ecosystems are being depleted in order to obtain materials such as tezontle, tepojal, clay, sand and other volcanic materials, and organic horizon from natural soil, with fulfilling the need of substrate to build green roofs (GR) in cities as all purpose. Technosoils are often seen as an alternative to emulate services otherwise provided by natural soils. This study was planned aiming to prove that waste materials are good to serve as substitutes for commonly used organic and inorganic substrates for GR. Some of their desirable characteristics are low density, high porosity, plant support and high water retention capacity.

The objective of this study was to propose different types of artificial substrates made out of urban solid waste such as demolition waste (D), tepetate (T), compost (C), rubber crumble (R) and a combination 1:1 of coffee grounds and orange peel (CN), so they could be used as plant growing media on GR. Eight mixes were prepared out of the above materials, being Ma, Mt, Ba, Bt, Ra and Rt: DCT (60, 20, 20%), Lt: DTCR (54.5, 18.2, 18.2 y 9.1 %), NCt: DTCNC on same proportion. Letter a means conditioned, t, sifted and B, blanks. Mixes Ma, Lt, NCt and Mt were used to grow tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill), meanwhile Ra and Rt grew purslane (*Portulaca oleracea*). These plants were used as they are common in Mexico. This study was conducted in a controlled greenhouse during eight months. As a result, mix Lt and NCt diminished bulk density (18 and 29%, respectably) and increased volumetric porosity. First one ended up with a survival rate of 100%, less compaction percentage and a higher water retention availability, also lowered pH from 10.2 to 8.3; while second one had 83.3% survival, 14% volume loss, and diminished pH to 7.8; conditioned mix Ma had same survival percentage as NCt, lowered pH from 9.8 to 8.5. Worst results were found on Mt as it had only 25% survival and lowest tomato production, meaning that conditioning is needed, at least for this crop. In no cases purslane survived. It is important to note that there was a lack of phosphorus, in all cases.

In conclusion, it is proven that all of these waste materials mixes are candidates to be used as substrate for growing plants on GR; amendments served for D, T and C mix to decrease load weight, tomato plants establishment and tomato crops with no health hazards, they also meet Mexico City's normativity, so they are confirmed to be potentially used as GR substrates.

Further studies under actual GR conditions are needed in order to prove these mixes and materials' behavior and success with different plants, which may have other nutrient and environmental requirements.

Índice general

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	MARCO TEÓRICO	4
	2.1 El suelo	
	2.1.1 Suelos naturales: definición y funciones	4
	2.1.2 Características importantes de los suelos	5
	2.1.2.1 Textura y estructura	
	2.1.2.2 Porosidad	
	2.1.2.3 Densidad aparente	6
	2.1.2.4 Densidad real	
	2.1.2.5 pH	
	2.1.2.6 Conductividad eléctrica (CE)	7
	2.1.2.7 Elementos traza	
	2.1.2.8 Materia orgánica	
	2.1.3 Calidad de suelo	8
	2.1.4 Degradación de suelo.	
	2.2 Residuos sólidos	9
	2.2.1 Residuos Sólidos Urbanos	
	2.2.2 Clasificación de residuos de la construcción y demolición	
	2.2.3 Generación en la Ciudad de México	11
	2.3 Azoteas Verdes	
	2.3.1 Clasificación y usos	12
	2.3.2 Clasificación en la Ciudad de México	

2.3.3	Diseño de azoteas verdes	13
2.3.4	Características deseables del sustrato en AV	
2.3.5	Implementación de AV	
2.3.6	Ventajas y desventajas de las AV	14
2.4	Agricultura urbana: en vías de la agricultura en azoteas verdes o rooftop gardening	15
2.41	Agricultura urbana	
3.	ANTECEDENTES	16
3.1	Suelos artificiales	
3.1.1	Contexto y definición de los suelos urbanos y antropogénicos.	
3.1.2	SUITMAs	17
3.2	Materiales reciclados para la construcción de AV	18
3.2.1	Fracción orgánica del sustrato en AV	23
3.3	Agricultura urbana en la Ciudad de México	25
3.4	Rooftop gardening o agricultura en techos verdes	
3.5	Especies mexicanas para cultivo en AV	26
4.	JUSTIFICACIÓN	27
5.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	31
5.1	Objetivos	
5.1.1	General	
5.1.2	Particulares	
5.2	Hipótesis	
6.	MÉTODO	32
6.1	Selección de los materiales	
6.1.1	Materiales minerales	
6.1.2	Materiales orgánicos.	
6.2	Selección de plantas	
6.2.1	<i>Lycopersicon esculentum</i> M. (jitomate)	33
6.2.2	<i>Portulaca oleracea</i> (verdolaga)	34

6.3	Preparación de mezclas	
6.3.1	Materiales	
6.3.2	Mezclas	35
6.4	Germinación de plantas	
6.5	Montaje experimental	36
6.5.1	Riego	37
6.5.2	Obtención de lixiviados	
6.6	Caracterización de materiales y mezclas	
6.6.1	Caracterización física	
6.6.2	Caracterización química	
6.6.3	Mezclas como soporte para plantas	38
6.7	Métodos analíticos	
6.8	Métodos estadísticos y trabajo en gabinete	40
7.	RESULTADOS	41
7.1	Caracterización	41
7.1.1	Caracterización química y física de materiales individuales	
7.1.2	Caracterización de las mezclas	44
7.2	Comportamiento químico de las mezclas en el tiempo	46
7.2.1	pH y Conductividad Eléctrica en lixiviados	
7.2.2	Contenido de carbono, nitrógeno y fósforo totales en mezclas	49
7.2.3	Elementos traza en lixiviados	50
7.2.4	Cambio en las concentraciones de iones mayores en lixiviados	52
7.3	Variables físicas	61
7.3.1	Retención de humedad	
7.3.2	Pérdida de volumen	
7.4	Desarrollo vegetativo y actividad biológica	63

7.4.1	Sobrevivencia	
7.4.2	Altura y diámetro de tallo	65
7.4.3	Número y peso seco de frutos	67
7.4.4	Biomasa de plantas de jitomate	69
7.4.5	Metales en vías aéreas y raíces de plantas	70
8.	DISCUSIÓN	72
8.1	Caracterización de materiales	
8.2	Caracterización de las mezclas	73
8.2.1	Comportamiento químico de las mezclas en el tiempo e iones y lixiviados	74
8.2.2	Metales en lixiviados iniciales y finales	78
8.2.3	Densidad aparente y pérdida de volumen	79
8.3	Desarrollo vegetativo y actividad biológica	81
8.3.1	Sobrevivencia	
8.3.2	Altura y diámetro de tallo	82
8.3.3	Número y peso seco de frutos	83
8.3.4	Biomasa seca y metales en plantas de jitomate	84
8.4	Inocuidad de frutos	84
8.5	Carga por unidad de área	85
9.	CONCLUSIONES	87
10.	PERSPECTIVAS A FUTURO	88
11.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	89
12.	ANEXOS	99

Índice de figuras

- 1.1 Grupos de SUITMAs según la provisión de servicios ecosistémicos urbanos. Tomado y adaptado de Morel *et al.* (2015)
- 2.1 Capas estructurales de una azotea verde. Adaptada al español. Tomada de God Frey Roofing Inc.
- 6.1 *Lycopersicon esculentum* Mill. Tomado de Conabio (2009)
- 6.2 *Portulaca Oleracea*. Tomado de Conabio (2009)
- 6.3 Germinación en almácigo
- 6.4 Medidas de columnas y nivel del sustrato
- 6.5 Número y distribución de plantas por columna
- 7.1 Porcentaje promedio de volumen de poros por mezcla y SD.
*a: tamizado <3 mm. b: sin tamizar.
- 7.2 Metales semitotales en mezclas. Las líneas indican los límites permisibles para suelos de cultivo, según la NOM-EM-034-FITO-2000
- 7.3 pH y SD de los lixiviados durante ocho meses
- 7.4 Comparación inicial y final de pH en lixiviados
- 7.5 Conductividad eléctrica en lixiviados durante ocho meses
- 7.6 Comparación inicial y final de CE en lixiviados en las mezclas
- 7.7 Porcentaje de C, N y F totales en las mezclas al inicio y final del experimento. i: inicio, f: final
- 7.8 Concentración de arsénico en lixiviados iniciales y finales.
LMP As: LMP de As según la NOM-EM-034-FITO-2000. LPEPA As: LMP de As según la EPA (2013)
- 7.9 Concentración de vanadio en lixiviados iniciales y finales.
No hay límites permisibles

- 7.10 Concentración de zinc en lixiviados iniciales y finales.
LMP As: LMP de Zn según la NOM-EM-034-FITO-2000.
ASTDR: LMP de As según la ASTDR (2005) S
- 7.11 Comportamiento de los aniones mayores en los lixiviados al inicio (i) y al final (f)
- 7.12 Comportamiento de los cationes mayores en los lixiviados al inicio (i) y al final (f)
- 7.13 Índices de saturación en lixiviados iniciales
- 7.14 Índices de saturación en lixiviados finales
- 7.15 Índices de saturación con fósforo total en lixiviados iniciales
- 7.16 Índices de saturación con fósforo total en lixiviados finales
- 7.17 Curvas de retención de humedad
- 7.18 Curvas de retención de mezclas con plantas de jitomate
- 7.19 Porcentaje de pérdida de volumen total después de ocho meses por cada mezcla. a: condicionado. t: tamizado
- 7.20 Germinación de semillas de jitomate en mezcla CNT (izquierda) y mezcla Lt (derecha)
- 7.21 Altura de plantas de jitomate en cada mezcla
- 7.22 Diámetro del tallo a la altura de la base por cada mezcla
- 7.23 Frutos de la mezcla Lt
- 7.24 Número de frutos totales al cabo de ocho meses de crecimiento en cada mezcla y en un vertisol
- 7.25 Peso promedio de la biomasa seca de frutos de jitomate en cada mezcla y en un vertisol. Se muestra la DS
- 7.26 Frutos de las mezclas Ma y Lt para obtención de biomasa seca
- 7.27 Biomasa seca total y de hojas, tallo y raíces por cada mezcla y SD Biomasa seca total y de hojas, tallo y raíces por cada mezcla y DS
- 8.1 Concentración de aniones mayores en lixiviados iniciales y finales

- 8.2 Concentración de cationes mayores en lixiviados iniciales y finales
- 8.3 Comparación de densidad aparente inicial y final por mezcla
- 8.4 Temperaturas promedio en las mezclas y SD

Índice de tablas

- 2.1 Clasificación propuesta en la NADF-007-RNAT-2013 para residuos de la construcción y demolición
- 6.1 Condiciones necesarias para el establecimiento de plantas de jitomate
- 6.2 Condiciones necesarias para el establecimiento de plantas de verdolaga
- 6.3 Características composicionales de cada mezcla
- 6.4 Métodos in situ y en laboratorio
- 7.1 Propiedades físicas y químicas de los materiales individuales
- 7.2 Metales en pasta de saturación materiales individuales
- 7.3 Iones mayores en pasta de saturación materiales individuales
- 7.4 Metales totales en caucho molido
- 7.5 Propiedades físicas y químicas de cada mezcla
- 7.6 Metales pesados totales en cada mezcla
- 7.7 Metales totales importantes para el crecimiento de plantas en cada mezcla
- 7.8 Concentraciones de As, Cd, Pb, V, Z y P al inicio y final de los ocho meses y comparación con los valores permisibles para lixiviados y agua usada en riego, propuestos por la NOM- EM-034-FITO-2000, EPA en 2012, 2013, 2007 y ASTDR 2005
- 7.9 Iones mayores en lixiviados iniciales y finales
- 7.10 Parámetros de la ecuación de Van Genuchten y parámetros de disponibilidad de agua
- 7.11 Sobrevivencia de plántulas en almácigo por especie y mezcla
- 7.12 Metales totales en hojas, tallos y raíces por mezcla
- 8.1 Densidades aparentes

8.2 Sobrevivencia al final del experimento

8.3 Metales de interés en frutos de jitomate en cada mezcla

8.4 Comparación de carga por unidad de área con la legislación vigente

Índice de abreviaturas

AS	Suelos antropogénicos
AV	Azoteas verdes
C	Composta
CdMx	Ciudad de México
CE	Conductividad eléctrica
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
CM	Caucho molido
CMIC	Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción
CN	Café + naranja
COVs	Compuestos Orgánicos Volátiles
DA	Densidad aparente
DF	Distrito Federal
DR	Densidad real
DR	Densidad real
FLL	German FLL Guidelines for Green Roofs
FFL	German FLL Guideline for Green Roofs
MO	Materia Orgánica
P	Perlita
PAHs	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
pH	potencial Hidrógeno
PM	Peatmoss
RCD	Residuos de la Construcción y Demolición
RD	Residuos de demolición
RS	Residuos Sólidos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
T	Tepetate
V	Vermiculita
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Se espera que para el 2050 más del 70% de la población mundial viva en ciudades (United Nations, 2010; Rockstrom *et al.*, 2009). Los servicios ecosistémicos en las ciudades, como comida, agua y servicios estéticos y recreativos, cada vez más se ven provistos por la presencia de áreas e infraestructuras vegetadas, como jardines, huertos urbanos y azoteas verdes; su importancia radica en la regulación del clima, asimilación de contaminantes y la disminución del efecto de la isla de calor, además del reservorio de biodiversidad (McPhearson, 2011; Morel *et al.* 2015).

Por otro lado, los suelos cumplen un papel fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos y el aprovisionamiento de la vida en el planeta en general. Algunas de sus funciones las describen la Comisión Europea (2010) y la FAO (2015), incluyendo el soporte para plantas, infraestructura y vías de comunicación, transformador, filtro y amortiguador de substancias, regulación de los ciclos biogeoquímicos, provisión de materias primas y patrimonio arqueológico, así como reservorio de biodiversidad y poza génica. Sin embargo, los suelos urbanos poseen propiedades y destinos distintos a los suelos naturales, por lo que fue necesaria la creación de una clasificación de suelos en áreas urbanas, industriales, de tránsito y mineras (SUITMAs, por sus siglas en inglés). Esto lo describen Morel *et al.* (2015), que aseguran que los suelos urbanos proveen servicios ecosistémicos y funciones específicas y diferentes de los suelos naturales. Proponen que existen los SUITMAs pseudo-naturales vegetados, los diseñados vegetados, los de tiraderos y los simples (fig. 1.1).

En el grupo de los SUITMAs diseñados y vegetados, se encuentran los sustratos de azoteas verdes, que se clasifican como tecnosoles o tecnosuelos. De acuerdo con la Base de Referencia Mundial del Recurso del Suelo (WRB), se define a los tecnosoles como suelos cuyas propiedades y pedogénesis están dominados por su origen técnico. Es decir, son suelos artificiales cuyo propósito es solucionar algún problema que un suelo natural pudiera tener.

Estos ofrecen distintos servicios ecosistémicos, como la producción de alimentos, energía o fibras, el control de la calidad del agua y el aire, y el flujo de los mismos en las ciudades, el sostenimiento de la biodiversidad, mitigación de contaminantes, la protección del suelo como capital natural (a través de la reducción de la extracción de materiales) o como sumidero de carbono (Morel *et al.*, 2015).

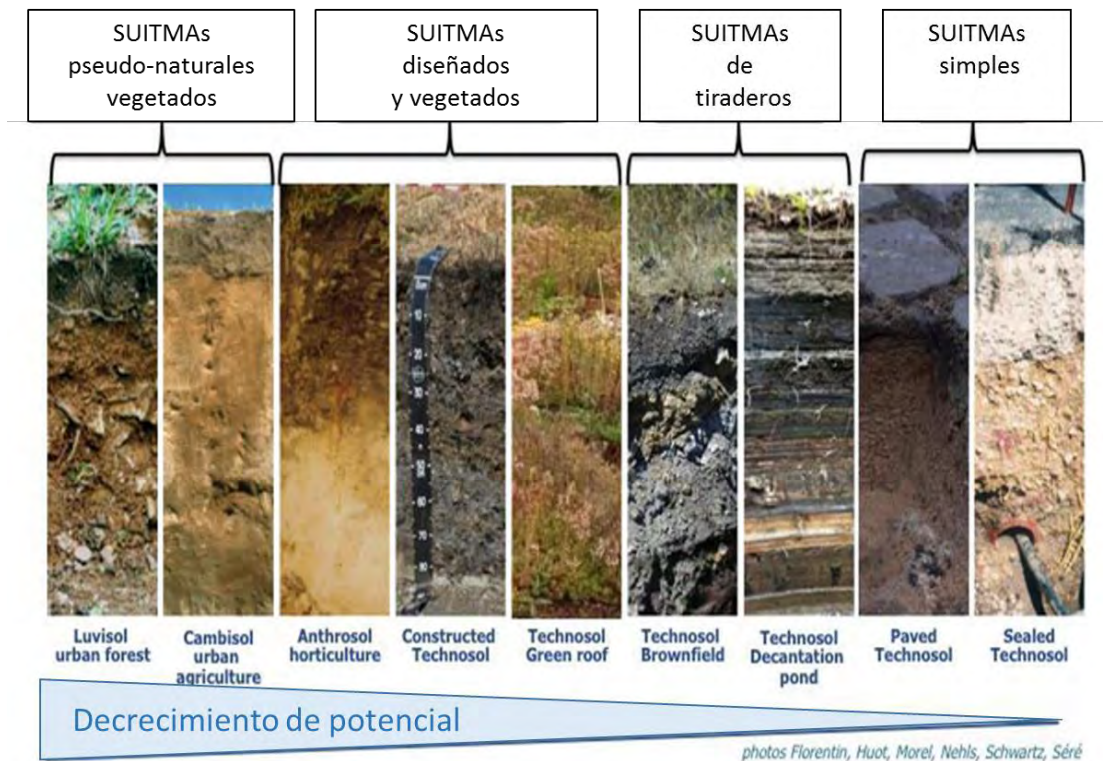


Figura 1.1 Grupos de SUTIMAs según la provisión de servicios ecosistémicos urbanos.

Adaptado de Morel *et al.*, 2015

En la Ciudad de México, por otro lado, 713 km² de suelo se encuentran bajo condiciones de sellamiento, lo que equivale a un 47% de su territorio (Cram *et al.*, 2008). Asimismo, en la línea de consumo y descarte prevaleciente en las ciudades, se pasa de la demanda de recursos al desecho de estos; así, las ciudades producen y descartan toneladas de desechos sólidos, que incluyen cascajo, neumáticos, residuos orgánicos, de construcción y asfalto. Tal es el caso de los residuos de construcción y demolición (RCD), de los que se estima que en México sólo el 20% se dispone de manera adecuada y cerca del 10% se colocan sobre suelo de conservación o sobre la vía pública, mientras que solamente un 3% se recicla (CMIC, 2013). Esto, a su vez, contribuye con la reducción de la cantidad y la calidad de áreas verdes al interior de la ciudad.

Para contener esta situación se ha propuesto la recuperación y generación de áreas verdes en camellones, azoteas verdes y parques. Las azoteas verdes (AV), en

particular, son sistemas integrados por distintas capas de materiales que permiten el desarrollo de elementos vegetales vivos en el techo, azotea o terrazas de un inmueble (Soberanes, 2013). Estos materiales se integran por una fracción mineral y otra orgánica; ambas deben ser de baja densidad, debido a la capacidad de carga limitada de los techos de los edificios. Han mostrado tener beneficios y efectos positivos en las ciudades, lo que las ha convertido en una estrategia para mantener la calidad ambiental y, por consiguiente, contribuir con el desarrollo sustentable. Proveen servicios ecosistémicos como la reducción de la isla de calor urbana, la reducción de la contaminación del aire y la reducción del consumo de energía de los edificios (Saiz *et al*, 2006; Getter y Rowe, 2006; Møller y Bergen, 2017). Debido a lo anterior, se han estudiado a diversas escalas, los sustratos, la extensión, especies vegetales, flujo de agua, lixiviados, entre otros parámetros para verificar su impacto (Getter y Rowe, 2006). Es importante notar que estos beneficios están relacionados con la selección de vegetación que, a su vez, depende enteramente de la composición de los sustratos elegidos para la construcción de estas AV. En el mundo, destaca el uso de materiales como las arcillas expandidas, peatmoss, vermiculita, perlita, ladrillos o azulejos triturados, entre otros (*idem*). Mientras que en México es común el uso de grava, tepojal, tezontle, piedra pómez y materia orgánica (NADF-013-RNAT-2007). Todos ellos se extraen de la naturaleza, lo que implica el riesgo de degradación de otros sistemas naturales y de diferentes ecosistemas.

Con lo anterior en mente, la presente tesis busca proponer un posible aprovechamiento de residuos sólidos urbanos, tales como residuos de demolición, tepetate, composta, caucho molido y residuos de café y naranja. Ello para resaltar su potencial para servir de medio de crecimiento o sustrato para plantas en azoteas verdes. Además, tiene como finalidad poner sobre la mesa alternativas de reciclaje de los RCD y residuos orgánicos para que mezclados promuevan la creación y afianzamiento de espacios urbanos dedicados a mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1 El suelo

2.1.1 Suelos naturales: definición y funciones

Para ilustrar qué es el suelo bastaría con exponer el conjunto de características que le confieren este nombre a este particular compartimento de la corteza terrestre. Entonces es importante mencionar que se trata de la interface entre la atmósfera y la litósfera, además presenta una interacción con los cuerpos de agua salada o dulce (hidrósfera), sin mencionar que sostiene la vida de plantas y animales (White, 2006).

De manera general, se puede decir que el suelo es un sistema trifásico que comprende la fase sólida, la líquida y la gaseosa (Bonneau y Souchier, 1982). La fase sólida está conformada por una fracción mineral y otra orgánica; la primera derivada generalmente del material parental, mientras que la segunda se desprende de la biosfera que se desarrolla sobre y dentro del suelo, incluyendo plantas y sus partes (Ellis y Mellor, 1995).

Entonces, el suelo se forma a partir del rompimiento de material rocoso que, con ayuda de bacterias y otros microorganismos se desintegra convirtiéndose en un compuesto de distintos elementos minerales junto con materia orgánica, microorganismos, aire y humedad; a este proceso de creación de suelo se le conoce como pedogénesis (Seré, G., *et al.*, 2008 en: Seré *et al.*, 2010). Este proceso pedogenético tiene como principio los factores formadores de suelo que describe Jenny (1941) que, a grandes rasgos, se refiere a la dinámica de las condiciones y circunstancias que llevan a un suelo a ser lo que es, es decir, la interacción entre el material parental, relieve, clima y actividad de organismos, todo lo anterior en el marco del tiempo que requieren dichas interacciones para formar el suelo.

Por otro lado, los suelos representan un proveedor principal de servicios ecosistémicos que muchas veces no son reconocidos (Dominatti *et al.*, 2010) debido a que los procesos se llevan a cabo bajo tierra. Sin embargo, esto no demerita su importancia:

- Fertilidad como el suministro de nutrientes para plantas para asegurar su crecimiento, que, en última instancia, significa el abastecimiento de

alimentos.

- Filtro y reserva de agua, que implica la mitigación de inundaciones y el ciclo de la misma.
- Soporte estructural para plantas y animales, así como edificaciones.
- Regulación de clima a través de la dinámica de gases de efecto invernadero: el carbono y el nitrógeno al pasar por el suelo, donde se transforman y secuestran; esto también influye en los ciclos biogeoquímicos.
- Fuente de recursos como arcilla y mantillo.
- Conservación de la biodiversidad, que implica que el suelo es hábitat de miles de especies microscópicas y mesofauna, conocidos como edafón, que regulan las plagas y se encargan de degradar desechos.

Los anteriores son algunos ejemplos de servicios ecosistémicos que los suelos proveen (Dominatti *et al.*, 2010).

2.1.2 Características importantes de los suelos

2.1.2.1 Textura y estructura

La distribución de los diferentes tamaños de partículas dentro del suelo determina su textura (White, 2006). Estos tamaños de partícula varían desde las arcillas (menos de 0.002 mm) hasta las arenas y todas las condiciones intermedias. Esto significa que la textura se refiere a la proporción relativa de arcillas, limos y arenas que se encuentran en una muestra determinada de suelo. La fracción de tamaño dominante de las partículas de suelo se utiliza comúnmente para describir la textura (Wild, 1995).

Con la estructura se describe el arreglo de las partículas del suelo, es decir, la forma en que estas se agrupan. Las agrupaciones de los diferentes tamaños de partícula forman agregados o peds, que constituyen, en forma y tamaño, una característica propia de cada suelo. La cantidad de arcillas y materia orgánica es significativa para el proceso de formación de agregados; asimismo, la porosidad interna, el tamaño y la estabilidad, son características importantes de los agregados (Wild, 1995).

La textura (fracción mineral) y la estructura son importantes porque definen la porosidad total del suelo y el área superficial de las partículas, por lo que de ellas depende también el intercambio catiónico. Adicional a esto, la materia orgánica confiere al suelo otras propiedades que, en conjunto, se traducen en la capacidad del suelo de filtrar contaminantes o amortiguar acidez. Una buena estructuración del suelo es deseable porque disminuye la susceptibilidad a la erosión, facilita la infiltración y el laboreo (Rucks, *et al.*, 2004)

2.1.2.2 Porosidad

El tamaño, forma y arreglo de las partículas y agregados determinan el espacio poroso o porosidad dentro del suelo. Aunque Ellis y Mellor (1995) diferencian entre el espacio poroso y la densidad, siendo la primera la que influencia la porosidad, además de la densidad aparente del suelo.

Se representa con la letra griega Φ . Matemáticamente se define como la proporción del volumen de poros y el volumen total del suelo (White, 2006).

$$\Phi = \text{volumen de poros} / \text{volumen total del suelo}$$

Es de suma importancia porque los poros son el almacén principal de agua y aire que requieren las plantas para sobrevivir, además de facilitar el enraizamiento.

2.1.2.3 Densidad aparente

Se obtiene a partir de la masa y el volumen de un núcleo seco. La influencia de la porosidad sobre la densidad aparente radica en que ésta considera el material sólido y los poros dentro de un volumen determinado (Ellis y Mellor, 1995). Sin embargo, también hay una influencia de la densidad real, dado que los constituyentes de las partículas que conforman un suelo varían en composición, forma de agregarse y arreglo (White, 2006).

Al mostrar de manera implícita la porosidad del suelo, indica la presencia de condiciones favorables para el establecimiento de especies vegetales. Así, una alta densidad aparente significaría poca porosidad, por ende, poca aireación y agua disponible para las plantas.

2.1.2.4 Densidad real

También conocida como densidad de partícula, la densidad real se determina a partir de la medición del volumen de líquido desplazado por un sólido (Gubiani *et al.*, 2006), en este caso, las partículas sólidas del suelo. Esto quiere decir que se toma en cuenta la relación de la masa de una muestra de suelo con el volumen que ocupan en realidad sus partículas (Burés, 1997). De este modo se considera exclusivamente la fracción sólida del suelo, es decir que no se cuantifica la porosidad.

2.1.2.5 pH

El potencial Hidrógeno se refiere, llanamente, al grado alcalinidad o acidez que tiene un suelo. Se determina por el balance de protones (H^+), hidróxidos (OH^-) y aluminio (Al^{3+}) presentes en la solución.

Es importante, pues determina diferentes propiedades químicas y biológicas de las que depende la supervivencia de las plantas en el suelo, así como la microbiota que en él se encuentra. Entre esas propiedades se encuentran la capacidad de absorción que tienen las plantas en las raíces, la disponibilidad de nutrimentos, algunos procesos metabólicos de los microorganismos del suelo, entre otros (Brady y Weil, 2006).

El pH, cuando a suelo se refiere, se puede medir en la solución del suelo o en los lixiviados o como una suspensión del suelo en agua (Wild, 1995).

2.1.2.6 Conductividad Eléctrica (CE)

La CE deriva de la presencia natural de los iones disueltos en la parte líquida del suelo (proveniente de agua superficial o subterránea), entre ellos están Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl , SO_4^{2-} y HCO_3^- y, en menores concentraciones, K^+ y NO_3^- . Se refiere a la concentración total de sales disueltas, cuya conductancia es medida, dando lugar a la CE (White, 2006). El incremento de temperatura afecta a la CE, elevándola también, es por ello que se corrige normalmente a 25°C .

2.1.2.7 Elementos traza

Brady y Weil (2006) indican que existen 18 elementos que resultan esenciales para el correcto desarrollo de las plantas. Nueve de ellos se requieren en pequeñas cantidades y son conocidos como micronutrientes. Se trata del hierro, manganeso, zinc, cobre, boro, molibdeno, níquel, cobalto y cloro, que se encuentran en bajas concentraciones en los suelos. Además, se ha mostrado que la presencia de otros elementos como el silicio, vanadio y sodio potencian el desarrollo de algunas especies vegetales. La deficiencia de estos nutrimentos puede resultar grave pues produce la disminución de crecimiento, bajos rendimientos e incluso la muerte.

2.1.2.8 Materia orgánica (MO)

La fracción orgánica del suelo incluye residuos de plantas, animales y organismos en general, en diferentes etapas de descomposición, células, tejidos del edafón y sustancias sintetizadas por los mismos (Brady y Weil, 2002). La MO está, de forma general, compuesta por una fracción con estructura visible y humus, compuesto por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas (Wild, A, 1995). Determina propiedades físicas, químicas y biológicas, como el amortiguamiento térmico, alta retención de agua, estabilidad de agregados, alta capacidad de intercambio catiónico y fuente y almacén de nutrimentos para las plantas y para la biota del suelo (Stevenson, 1994; von Lützow et al., 2002). Debido a lo anterior, de la MO depende la capacidad de filtro y amortiguador del suelo.

2.1.3 Calidad de suelo

La calidad del suelo depende generalmente de su uso y su capacidad para desempeñarse bajo ese uso o función (White, 2006). Tras considerar las implicaciones del suelo en los ecosistemas naturales, los ciclos biogeoquímicos, los sistemas socio-ambientales, la producción agrícola, etc. La calidad del suelo se puede definir entonces como la capacidad continua que tiene el suelo de funcionar dentro, y a veces fuera, de sus límites ecológicos para sostener la productividad biológica y la diversidad, mantener la calidad ambiental (calidad del aire y del agua) y promover la salud de plantas, animales y humanos (Brady y Weil, 2002).

2.1.4 Degradación de suelo

En particular, se refiere al decrecimiento de la productividad por los cambios adversos en el balance de nutrimentos, materia orgánica, estabilidad de agregados y las concentraciones de electrolitos y sustancias tóxicas. Algunos de los problemas más reconocidos en cuanto a degradación son la erosión, compactación, sellamiento, inundación y déficit de agua, acidificación, sodificación, salinización, acumulación de químicos agrícolas y residuos urbanos o industriales. De estos últimos, se identifican cuatro fuentes importantes: residuos de construcción y demolición, materiales metálicos, emisiones de generadores de poder y desechos orgánicos y químicos (Ellis y Mellor, 1995).

A grosso modo, se define la degradación como la destrucción o perturbación del sistema suelo. Asimismo, Ellis y Mellor (1996) hablan de la degradación como la disminución de la calidad del suelo a través de malas prácticas derivadas de las actividades humanas. Del mismo modo, la FAO (1980) la define como el producto de procesos físicos, químicos y biológicos que disminuyen su utilidad, reduciendo su capacidad actual o potencial para producir bienes o servicios; mientras Bridges y Oldeman (1999) hablan de la merma de la capacidad del suelo para sostener la vida.

La urbanización y la industrialización son ejemplos de detonantes de muchos de estos tipos de degradación, sin mencionar prácticas inadecuadas de manejo, ruptura del balance bioquímico a través de agroquímicos, entre otras. Entre los productos de la industrialización y la urbanización en general, se encuentra la disposición de residuos, que suelen verterse en tiraderos, que pueden derivar en contaminación de suelo y agua, pérdida de biodiversidad y disminución de la recarga de acuíferos.

2.2 Residuos sólidos

2.2.1 Residuos Sólidos Urbanos

Según la Norma Ambiental para el Distrito Federal, que establece la clasificación y especificaciones de manejo para Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) NADF-007-RNAT-2013 (2015), los residuos sólidos (RS) son aquellos “materiales, productos o subproductos que sin ser considerados como peligrosos, se descarten o desechen y que son susceptibles de ser aprovechados o requieran sujetarse a métodos de tratamiento o disposición final”. Mientras, los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son “los generados en casa habitación, unidad habitacional o similares que resultas de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques, los provenientes de cualquier actividad que genere residuos sólidos con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza en las vías públicas y áreas comunes”.

2.2.2 Clasificación de Residuos de la Construcción y Demolición

Los constituyentes de los residuos provenientes de la industria de la construcción y demolición son un conjunto o fragmentos o restos de madera, paneles de yeso o de cemento, residuos de albañilería, tabiques, materiales pétreos, tierra, morteros, plásticos, pisos, cal, tejados, metales, vidrio, plásticos, asfalto, concretos, hormigón, ladrillos, bloques, materiales de excavación, cerámica, entre otros (NADF-007-RNAT-2013, 2015). Esta diversidad proviene del tipo de obra y de la etapa de demolición o construcción en que se encuentre

Tabla 2.1. Clasificación propuesta en la NADF-007-RNAT-2013 para residuos de la construcción y demolición

Tipo de residuo de la construcción y demolición	Posible reuso
A. Provenientes de concretos hidráulicos y morteros Elementos prefabricados Elementos estructurales y no estructurales Sobrantes de concreto en obra y premezclado	Elaboración de blocks, tabiques, adcretos, losetas, bordillos, postes de cemento y arena Sub-bases en caminos y estacionamientos Terraplenes y pedraplenes Andadores y trotapistas Bases para ciclistas, guarniciones y banquetas Cobertura de rellenos sanitarios Relleno en cimentaciones Relleno en jardineras y camellones
B. Mezclados	Sub-bases en caminos y estacionamientos Terraplenes y pedraplenes

Concretos hidráulicos Blocks, tabicones, adoquines Tubos de albañal Cerámicos Mampostería Tabiques, ladrillos, etc. Piedra braza Agregados pétreos	Andadores y trotapistas Bases para ciclistas, guarniciones y banquetas Cobertura de rellenos sanitarios Relleno en cimentaciones Relleno en jardineras y camellones
C. Provenientes de fresado de concreto asfáltico Carpeta asfáltica Bases negras	Bases asfálticas o negras Concretos asfálticos elaborados en caliente o en frío Concreto asfáltico templado o tibio
D. Residuos de excavación Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares, y pétreos contenidos en ellos	Se deberá privilegiar la correcta separación para facilitar el reuso y reciclaje
E. Residuos Sólidos Urbanos Papel y cartón Madera Plásticos Metales Vidrio Residuos de podas, tala y jardinería	Se deberá privilegiar la correcta separación para facilitar el reciclaje
F. Otros Impermeabilizante Tablaroca Asbestos Tubería Instalación eléctrica Herrería	Se deberá ponderar el reciclaje

2.2.3 Generación de RSU en la Ciudad de México

De acuerdo con el Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México (IRS) publicado por SEDEMA en 2015, solamente en la Ciudad de México (CdMx) se producen en promedio 12,893 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos de cualquier tipo, derivados de actividades comerciales, turísticas, manufactureras, académicas, industriales, administrativas, entre otras. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se producen principalmente residuos orgánicos, cartón, plástico y vidrio, además de neumáticos y residuos de la construcción. Estos

últimos se clasifican en residuos de manejo especial, es decir, provenientes como descarte de actividades productivas (NOM-083-SEMARNAT, 2003).

De la producción diaria de RS en la CdMx, hasta 7,000 ton/día (NADF-007-RNAT-2013, 2010) se derivan de la industria de la construcción, demolición y excavación. Las delegaciones Venustiano Carranza, Benito Juárez, Iztapalapa, Gustavo A. Madero y Tlalpan las que, en conjunto, aportan hasta el 98.3% de la totalidad de descarte de estos residuos. En 2014 (SEDEMA) se procesaron 21,653 toneladas en la planta portátil itinerante para el tratamiento de la construcción, que abarca las, hasta ahora, 16 delegaciones políticas.

2.2 Azoteas verdes

Los techos o azoteas verdes (AV) se han visto como herramientas de mitigación de problemas ambientales al incrementar la superficie vegetada en las ciudades, mejorar la dinámica y flujo de energía y agua (Oberndorfer *et al.*, 2007) de entrada y salida que ocurre en los edificios comúnmente. Además de sus beneficios, se puede añadir que se incrementa rápidamente la tendencia a generar ciudades sustentables.

La creación de sustratos para soportar la vegetación en las llamadas azoteas verdes, generó la necesidad de innovar con los materiales utilizados y con sus propiedades físicas y químicas natas para satisfacer determinados criterios necesarios para una óptima implementación; lo que también representa un ejemplo de suelos artificiales.

son parches de vegetación antropogénicos que consisten en membranas, sustrato diseñado (medio de crecimiento) y ensambles de plantas ubicadas en lo alto de edificios u otras estructuras. Reciben una radiación solar intensa, precipitación variada y pueden o no ser irrigados (Sutton, 2015).

Aunque la Green Roof Organization (2011), que opera en el Reino Unido, se refiere a ellos, llanamente, como un techo, muelle u otra estructura en la que se permite el crecimiento de vegetación intencionadamente o para establecer hábitats para la vida silvestre.

2.3.1 Clasificación y usos

Las AV se clasifican de distintos modos, aunque la más general se refiere al uso o destino que se planee darle al área verde. Esta clasificación habla del uso intensivo y el extensivo. Incluyendo algunos puntos intermedios de los que hablaremos más adelante.

- Azoteas Verdes de uso intensivo

Los techos verdes intensivos son aquellos que se ajustan al paisaje como otras áreas verdes de disfrute, como parques y jardines, y que están diseñados para soportar grandes cantidades de peso. Se usan como hortalizas, áreas de juego y recreativas. Tienen un grosor de sustrato que va desde los veinte centímetros y hasta más de un metro y son capaces de soportar especies de ornato, incluso árboles. Por ende, son más pesados, requieren irrigación y mayor mantenimiento. (GRO, 2011; Orberndorfer, *et al.*, 2007; FLL, 2008).

- Azoteas Verdes de uso extensivo

Por otro lado, las AV extensivas poseen una capa de sustrato más delgada y ligera (0-20 cm de profundidad), no requieren irrigación y generalmente utilizan plantas resistentes a la irradiación y la sequía, es decir, condiciones de intemperie. Al mismo tiempo, requieren mucho menos mantenimiento que los anteriores y no están diseñados para especies grandes, más bien suelen soportar herbáceas, arbustos y plantas de ornato; típicamente pasto (GRO, 2011; GRO, 2014; Orberndorfer *et al.*, 2007).

2.3.2 Clasificación en la Ciudad de México

En la Ciudad de México, la Norma Ambiental para el Distrito Federal que Establece las Especificaciones Técnicas para la Instalación de Sistemas de Naturación en el Distrito Federal (NADF-013-RNAT-2007) es relativa a los sistemas vegetativos, incluyendo las azoteas verdes. En ella se listan tres clasificaciones:

1. Cubierta con naturación extensiva: La capa de sustrato no debe exceder los 18 cm de espesor y el peso máximo estimado para el sustrato y la vegetación en condiciones de saturación es de 110 y hasta 140 kg/m². La cubierta es la tradicional, requerimientos nulos o bajos de mantenimiento.
2. Cubierta con naturación intensiva: El sustrato tendrá como mínimo un espesor de 20 cm y la capa de sustrato y vegetación (en saturación) es mayor que 250 kg/m². Los requerimientos de mantenimiento y riego son, en este caso, normales o frecuentes.
3. Cubierta con naturación semi-intensiva: La carga del sustrato y la vegetación, en estado saturado, es de 150 a 250 kg/m². El mantenimiento y el riego es normal, pero no frecuente. La colocación del sistema de naturación es la tradicional.

2.3.3 Diseño de Azoteas Verdes

El diseño de una AV debe incluir distintos materiales con el fin de asegurar el funcionamiento óptimo del sistema, la distribución de pesos sobre la superficie, el

crecimiento y mantenimiento de las plantas, las entradas y salidas de agua, así como considerar distintas variables como la climatológica, la vegetación, la pendiente y la capacidad de carga del edificio. Del mismo modo, se debe considerar para el adecuado desarrollo de las plantas, como irradiación, humedad, drenaje, aireación para las raíces y nutrimentos (GRO, 2011; Dunnett, 2004).

2.3.4 Características deseables del sustrato en AV

Algunos requerimientos del sustrato de una azotea verde (Vijayaraghavan & Joshi, 2014; Getter & Rowe, 2006) son:

- Bajo peso
- Bajo costo energético y económico
- Alta capacidad de retención de humedad
- Alta porosidad
- Drenaje rápido
- Aporte de nutrimentos
- Soporte para plantas

2.3.5 Implementación de azoteas verdes

De acuerdo con las recomendaciones alemanas e inglesas, en general deben considerarse las siguientes capas con estas características con el fin de establecer un sistema de naturación en techos (FLL, 2008; GRO, 2011):

1. Vegetación
2. Sustrato o medio de crecimiento. Soporte para plantas. Es importante que sea ligero y resistente a la erosión y compactación, que tenga buena capacidad de retención de humedad, buena aireación y porosidad para el drenaje
3. Filtro. Impide el paso de partículas pequeñas y sedimentos que puedan entorpecer o imposibilitar la movilidad de agua por las siguientes capas y permitir el drenaje
4. Drenaje. Permite el balance agua-aire en el sistema de AV. Esto mediante la retención de agua y la movilización del exceso. Se pueden usar paneles de polietileno o poliestireno u otros plásticos; materiales rocosos con poros como grava, ladrillos triturados, arcilla y limo expandidos, pumita, tezontle u otras rocas de origen volcánico
5. Retención de humedad
6. Protección (opcional). Membrana geotextil que provee protección mecánica a capas inferiores

7. Barrera para raíces. Previene el crecimiento de las raíces de las plantas y a través de la capa impermeable. Se usan membranas de materiales como poliéster, fibra de vidrio, plástico o granulados minerales resistentes al crecimiento de las raíces
8. Capa impermeable. Protege la superficie del techo de la humedad del sistema

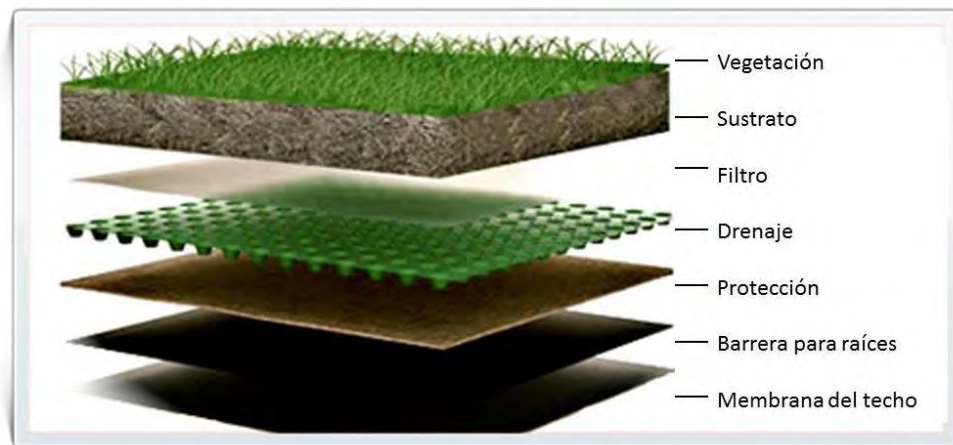


Figura 2.1. Capas estructurales de una azotea verde. Adaptada al español. Tomada de God Frey Roofing Inc.

2.3.6 Ventajas y desventajas de las Azoteas Verdes

- Amortiguamiento térmico en el edificio, lo que implica que requiere menor uso de aire acondicionado en verano y menores esfuerzos de calentamiento durante el invierno. Con ello se disminuyen las emisiones de CO₂ (Zinzi & Agnoli, 2012; Parizotto & Lambert, 2011).
- La implementación de especies locales representa una menor presión para la biodiversidad aledaña, pues provee e incrementa la cobertura que sirve de hábitat para invertebrados y aves (Bisceglie, *et al.*, 2014).
- Mejora la calidad de vida de las personas que habitan y laboran alrededor del área al proveer más áreas verdes y reducir la transmisión de ruido externo al interior del edificio (Bisceglie, *et al.*, 2014).
- Disminución de la temperatura del aire a través de la evapotranspiración de las plantas. Este efecto permite la reducción del efecto de la isla de calor en las ciudades (Molineaux, *et al.*, 2009).
- Reduce la precipitación que escurre de los techos al piso en las urbes (hasta 60-70) al absorber agua en el sustrato, lo que previene eventos de inundación y el desbordamiento del sistema de drenaje (Gregorie & Clausen, 2011; Stovin *et al.*, 2012).

- Aprovechamiento de un espacio para la agricultura urbana. Además, la producción de alimento provee beneficios económicos, culturales y educativos a las personas circundantes (Orberndorfer *et al.*, 2007).
- Secuestro de carbono a través de la generación de biomasa y transferencia del mismo al sustrato vía exudados, materia orgánica y mantillo (Getter *et al.*, 2009).
- Amortiguamiento de acidez de la lluvia, contaminantes como hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados (Arellano, 2012)

Por otro lado, algunas desventajas reportadas incluyen (Nagase & Dunnet, 2010):

- Baja disponibilidad de agua para las plantas
- Fluctuaciones importantes de temperatura
- Alta exposición a vientos
- Alta exposición a radiación solar

2.4 Agricultura urbana: en vías de la agricultura en azoteas verdes o rooftop gardening

2.4.1 Agricultura urbana

De acuerdo con Arosemena (2012) la agricultura urbana se entiende como “toda actividad relacionada con el cultivo de alimentos próximo a la ciudad y cuyo destino final es abastecerla”, es decir, como parte del “sistema agroalimentario urbano (producción, distribución, consumo y gestión de residuos orgánicos generados)”. En contraste, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) incluye también otras prácticas agropecuarias, como la silvicultura.

Al hablar de agricultura urbana es importante señalar que cada ciudad tiene condiciones distintas y muy particulares, por lo que no existe un estándar potencialmente aplicable a cualquier ciudad; por esta razón, se utiliza la siguiente clasificación para el establecimiento de agricultura urbana (Arosemena, 2012) de acuerdo con la distribución y condensación espacial de la población:

1. Zonas urbanas dispersas, con disponibilidad de mayores superficies para el cultivo.
2. Zonas densas de la ciudad, con superficies limitadas y fraccionadas.
3. Edificación urbana, que se caracteriza por la ausencia de suelo para cultivo.

Capítulo 3

Antecedentes

3.1 Suelos artificiales

3.1.1 Contexto y definición de los suelos urbanos y antropogénicos

La urbanización tiene efectos en el ambiente inmediato: las prácticas de las sociedades tales como la agricultura, la industria y la urbanización conducen a la degradación del suelo y, con ello, a una transformación física, química y biológica importante, que conlleva también a la formación de nuevos suelos caracterizados por la presencia de materiales tecnogénicos, pedogénicos y geológicos en distintas proporciones. Es importante notar que, a diferencia de los suelos naturales, los suelos urbanos y antropogénicos no provienen del proceso natural de formación de suelos propuesto por Jenny (1941).

De acuerdo con Burghardt (1994) los suelos en las áreas urbanas y suburbanas (suelos urbanos) consisten en depósitos antropogénicos con materiales naturales (minerales y orgánicos) y tecnogénicos, formados y modificados por el relleno, la mezcla y/o la intrusión de líquidos y gases, sellamiento, contaminación, entre otros. Del mismo modo, Maechling *et al.* (1974) se refieren a ellos como materiales de suelo que tienen una superficie no agrícola o hecha por el hombre de más de 50 cm de espesor y que se ha producido por la mezcla, relleno o por contaminación de la superficie del terreno en áreas urbanas y suburbanas.

Por otro lado, también existen los suelos antropogénicos (AS, por sus siglas en inglés) que se diferencian de los urbanos, anteriormente mencionados:

Evans *et al.* (2000) mencionan que los suelos antropogénicos cumplen con dos características importantes: i) los seres humanos son un factor determinante en la génesis de los mismos, aunado a otros factores naturales y ii) estos suelos tienen características dominantes y particulares derivadas de la influencia de actividades humanas.

En el Comité Internacional de Suelos Antropogénicos (ICOMANTH) en el año 2005 se identificaron estos suelos como aquellos formados por materiales que se comportan y han sido alterados por la actividad humana y el uso de herramientas, esto implica materiales transportados por acción humana, manufacturados, materiales provenientes de horizontes de suelos naturales grandemente modificados o destruidos por actividad humana constante o en un solo evento o cuya génesis es influenciada por estas actividades.

En 2007 la World Reference Base for Soil Resources (WRB) indica que, al ser desarrollados por actividades humanas intensivas, a estos suelos se le conocen como tecnosoles o suelos construidos siendo el resultado de una combinación deliberada de distintos componentes y que, a pesar de ser muy similares a los suelos naturales, sus materiales tecnogénicos son transformados a través de factores pedogenéticos que contribuyen a su evolución (Seré *et al.*, 2010).

Al igual que en los suelos naturales, las características particulares de los suelos artificiales están directamente relacionadas con el material originario. De este modo, sus propiedades físicas y químicas determinarán el modo en que se usan.

En la construcción de suelos artificiales generalmente se utilizan materiales que se han desechado, como ladrillos, concreto, asfalto, lodos, sedimentos de dragado, escombros de la construcción y demolición, rellenos sanitarios, ceniza, lodos residuales, escoria, residuos de minería, papel (Doni *et al.*, 2009; Seré *et al.*, 2008; Rokia *et al.*, 2014; Morel *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2008).

3.1.2 SUITMAs

Morel y colaboradores (2015) aseguran que las transformaciones en composición y funciones que experimentan los suelos limitan sus capacidades de proveer servicios ecosistémicos como los que proveen de manera natural. A partir de este conocimiento, propusieron los suelos en áreas urbanas, industriales, de tránsito, minería y militares o SUITMAs, apelando a su nomenclatura inglesa. Estos suelos excluyen el contexto urbano del que hablábamos en el apartado anterior, expandiendo sus horizontes hasta sitios donde la actividad humana es el principal formador de los mismos, aunque no se encuentren inmersos en la urbe como tal. Esto quiere decir que se refieren a tecnosoles o suelos construidos.

Los procesos que caracterizan la formación de estos suelos incluyen perturbaciones o procesos de degradación y son 3: i) transformación, mezcla, incremento de profundidad, compactación, nivelación de terreno y sellamiento. ii) excavación, es decir, la remoción de material, que acelera la erosión. iii) adición de material exógenos tales como desechos orgánicos, tóxicos, rellenos sanitarios, entre otros.

Al mismo tiempo se dividen en dos grupos importantes: los suelos modificados con fines ingenieriles y los suelos de azoteas verdes.

La importancia de los SUITMAs radica en su potencial para ser rediseñados o manipulados para restaurar espacios y obtener características similares a las que proveería un suelo natural, con lo que se podrían reproducir en cierto grado sus propiedades y el uso que se les dé. En particular se aspira a proveerlos con la capacidad de ser vegetados y sostener vida, así como para fomentar la infiltración y el drenaje de agua y, así, proveer servicios ambientales.

Entre estos últimos se comprenden la regulación del ciclo hidrológico (en ciudades, particularmente), mitigación de contaminantes, sostén de la biodiversidad, regulación de microclimas, almacenamiento de carbono y protección del acervo natural de suelo. No obstante que la producción de alimento es otro servicio ecosistémico, el empleo de SUITMAs para ese fin es poco común y se enfoca más en la revegetación ornamental.

3.2 Materiales reciclados para la construcción de azoteas verdes

Como se mencionó anteriormente, las AV requieren de un sustrato o medio de crecimiento y soporte de las plantas, el cual simula las características de un suelo natural. Por lo tanto, se requiere emular un sustrato con una fracción orgánica y una inorgánica o mineral.

Para ello, en México se utilizan materiales como las arcillas expandidas, lava expandida, piedra pómez, agrolita, perlita, tepojal, tezontle, vermiculita, turba, arena, corteza de pino, peatmoss, tierra negra, tierra de hoja, abono, aserrín y composta (NADF-013-RNAT-2007; Martínez, 2013; Palomino, 2012). Con frecuencia, la mayoría de los componentes inorgánicos anteriormente mencionados son extraídos de depósitos volcánicos u otros ambientes de vegetación conservada, ejemplos de ello son el tezontle, el tepojal y la tierra negra y de hoja. Por otro lado, la fracción orgánica provista por materiales como la composta y el aserrín se abastecen de residuos de origen orgánico.

Debido al alto costo energético de producción de los materiales usados comúnmente para la construcción de AV y que, además, muchos de esos materiales se extraen de fuentes naturales (Oberndorfer *et al.*, 2007; Peri *et al.*, 2012), se han probado y evaluado alrededor del mundo diferentes combinaciones de materiales reciclados que puedan sustituir completa o parcialmente el sustrato utilizado en la construcción de las mismas.

Entre estos estudios la sustitución de la fracción mineral o inorgánica por materiales reciclados es un eje generalizado. Dichos materiales y sus orígenes son variados, así como sus proporciones. Estos incluyen cenizas de incineradores y periódico (Bates *et al.*, 20015; Molineaux *et al.*, 2009), concreto (Bisceglie *et al.*, 2014),

desechos de demolición y construcción (Mickovski *et al.*, 2013; Bates *et al.*, 2015; Bianchini, 2012), trozos de caucho y neumáticos (Pérez *et al.*, 20012; Steinfeld y Del Porto, 2008), restos de azulejos (Steinfeld y Del Porto, 2008), conchas, vidrio y sílice en distintas formas (Eksi y Rowe, 2016; Krawczyk *et al.*, 2016; Steinfeld y Del Porto, 2008), gel de pañales (Kasmin *et al.*, 2016), entre otros.

También se ha sustituido la fracción orgánica, de suelo o tierra común, extraída de suelos naturales (Krawczyk *et al.*, 2016), por compostas de diferentes orígenes y contenidos.

Aunque el conocimiento alrededor de estos materiales aún es incipiente, su uso se relaciona con la capacidad que tienen de suplir las funciones de los sustratos naturales o mejorar propiedades intrínsecas de los mismos: nutrientes y soporte para plantas, almacenamiento de agua o disminuir la densidad.

Siguiendo lo anterior, Eksi y Rowe (2016) desarrollaron un experimento que utilizaba un porcentaje de fibra de vidrio y porcelana triturada como parte del sustrato para la construcción de AV en comparación con arcillas expandidas por calor, que se usan ampliamente en Estados Unidos por su baja densidad. Este material sirvió también como un control para medir el crecimiento de dos especies distintas, bajo condiciones controladas en un invernadero: una variedad de albahaca y una especie del género *Sedum*. Se midieron parámetros como la textura, la densidad aparente, porosidad, capacidad de retención de humedad, conductividad hidráulica, pH, sales, contenido de carbono y capacidad de intercambio catiónico (CIC). En este caso, no se encontraron diferencias en el crecimiento de la albahaca, aunque ambas especies acumularon más biomasa en el caso de las arcillas expandidas. Estos resultados indican que podrían deberse a las variaciones de retención de humedad presentes en el caso del vidrio y la porcelana, cuyo tamaño de partícula era superior al de las arcillas, permitiendo, así, una mayor pérdida de humedad. Se concluye que ambos materiales tienen un potencial similar al de las arcillas para utilizarse con fines de construcción de AV, siempre y cuando se considere la disminución del tamaño de partícula.

Por otro lado, Krawczyk y colaboradores (2016) emplearon diferentes residuos de generación local, incluidos sílice proveniente de aleaciones de ferrosilicatos, arena fundida, celulosa y materia orgánica obtenida de un histosol cercano. En todos los casos los materiales cumplían con los estándares fisicoquímicos de la guía alemana de la FLL. Se trituraron los materiales mecánicamente para obtener tamaños menores a los 20 mm. Se encontraron P y K disponibles y altas concentraciones de Ca, Mg y S. Igualmente, se encontró que el sílice permite mantener las condiciones amortiguadoras o buffer de pH en la mezcla con otros materiales.

Asimismo, no se encontró alguna deficiencia en el crecimiento de las plantas, por lo que se concluye que el uso de este material es viable para colocarse en AV.

Durante 2014 Biscegli *et al.* utilizaron concreto aireado con autoclave (0.5-1 mm y 3-10mm) con el fin de incorporar en la construcción de azoteas verdes un material que aligere la carga neta sobre la estructura del edificio, reduciendo la densidad. Para crearlo se mezclan agua, arena, cemento, limo y un agente aireador. Es de alta porosidad, por lo que es ligero, fácil de transportar e instalar, dúctil, aislante térmico y acústico, además de poseer propiedades de transpiración. Con ello se sustituye el uso de lapilli (tezontle) o pumita (tepojal), ambos materiales que se extraen de la naturaleza. Como resultado al análisis de las características físicas y químicas, estas resultaron comparables a las reportadas en la literatura para el tezontle y tepojal. El pH después del estudio se estabilizó en 7.23, la densidad aparente de 459.2 kg/m³ con una porosidad de 62%. Al mismo tiempo, la retención de humedad alcanza el 222.62% de la masa de agua por la masa seca, de modo que califica al concreto aireado como un excelente material para disminuir la carga neta ejercida por el sustrato empleado en azoteas verdes extensivas.

Debido a la creciente generación de residuos de demolición y provenientes de la construcción, se han evaluado estos materiales con el fin de crear sustratos que tengan un uso potencial para la construcción de suelos artificiales:

En 2013, Mickovski y otros miembros del equipo utilizaron, bajo condiciones de invernadero, material de construcción reciclado e inerte. El objetivo del estudio fue evaluar la respuesta de este material para el crecimiento de una carpeta vegetal de pasto y *Sedum*, respectivamente, su resistencia a la erosión y el drenaje bajo distintas condiciones de pendiente y lluvia simulada. Se midieron parámetros como el índice de infiltración, la conductividad hidráulica, pH (en sustrato y lixiviados), turbidez, crecimiento de las especies y la estabilidad de agregados.

Para su diseño se utilizaron charolas con a escala de una AV y un geotextil con el sustrato, variando la pendiente, y colectores para capturar el agua drenada. Se usaron mezclas de desechos calcáreos en un 65% del peso y silícicos con un 35%; se adicionó a la mezcla un 20% del peso con los primeros 10 cm de suelo proveniente de un cambisol para adicionar materia orgánica, además un porcentaje adicional de composta común. Esto resultó en un 20 % de material de construcción, 65% de barro y 15% de composta. La profundidad del sustrato se determinó de 7.5 cm, con un peso aproximado 9 kg por charola. El diámetro se estableció <5 mm para mantener el drenaje apropiado.

Los resultados indican que esta mezcla provee un drenaje dinámico y adecuada retención de humedad ($\pm 19\%$); muestra una estabilidad media y resistencia a la erosión, aún bajo condiciones de inclinación y lluvia intensa (90 mm). La calidad de los lixiviados no mostró disminución, lo que representa un uso viable del drenaje para uso de agua no potable.

Kasmin y colaboradores (2016) utilizaron en Malasia mezclas de vermiculita (V), perlita (P) y peatmoss (PM) adicionados con cáscaras de frutas y gel de pañales mojado, con el fin de crear una alternativa para la retención de precipitación en la ciudad. Se probaron siete mezclas distintas en las que se analizaron las propiedades físicas como la densidad aparente, máxima retención de humedad, permeabilidad, porcentaje de sólidos, densidad de partícula y porosidad y la evaporación. Lo anterior bajo tres diferentes condiciones ambientales: temperatura ambiente, sequía extrema ($\pm 50^\circ\text{C}$) y temperatura controlada (23°C). Los resultados arrojan que la capacidad de retención de una mezcla simple de VPPM al 50, 30 y 20%, respectivamente, corresponde al 50% en peso seco, mientras que para la adición de cáscaras aumenta al 54%. Para ambos casos se muestra que el almacenamiento de agua después de 34 días de condiciones ambientales resulta en 60 a 62 mm.

Dentro de los desechos urbanos, el caucho o neumático cada vez aumenta su volumen. En la CdMx los neumáticos usados también representan un problema pues se han reportado grandes cantidades en tiraderos clandestinos (SEDEMA, 2015). No hay un dato preciso de la cantidad de residuos de neumáticos que se producen en la CdMx.

El caucho triturado se ha intentado incorporar en el diseño de AV debido a sus propiedades como un material ligero. Esta característica le da un valor potencial para ser usado en edificaciones con una capacidad de carga limitada.

Pérez *et al.* (2011) propusieron usarlo mediante la sustitución de la capa de drenaje en la que comúnmente se usan materiales porosos de baja densidad, como pumita, arcillas y limos expandidos, puzolana (Mex. Tezontle) y otras rocas volcánicas de propiedades similares. Esto quiere decir que el caucho se colocó en la base de las capas para promover el drenaje proveniente de las capas superiores y del sustrato. En este caso evaluó la capacidad de drenaje y probar las propiedades aislantes del caucho granulado en comparación con el tezontle, previamente mencionado. En este caso se jugó con el tamaño de partícula del caucho (2-7 mm, 2-3.5 mm y 0.8-2.5 mm). Esto sin condiciones controladas de invernadero y bajo el régimen

climático del Mediterráneo. Los parámetros que evaluaron fueron la capacidad de retención de humedad y el crecimiento de tres especies vegetales, incluyendo el romero y dos especies de flores distintas. No se encontraron diferencias en cuanto al crecimiento de las especies ni en cuanto a la capacidad de retención entre el tezontle y el caucho, en especial con el tamaño de partícula más pequeño. Por lo anterior se concluye que el uso de caucho es viable para disminuir la extracción de materiales naturales, con los mismos resultados y sin alterar el desarrollo vegetativo.

Por otro lado, Cabeza *et al.* (2012) Utilizaron residuos de caucho como forma de sustituir las capas de drenaje en la construcción convencional de AV. Esto en una región de Barcelona. Algunos materiales que se utilizan tienen requerimientos especiales como alta porosidad y grandes tamaños de partícula para fomentar el drenaje, estos materiales incluyen pumitas (tepojal), arcillas expandidas o tezontle (Esp. Puzolana). Se proponen los residuos de caucho como alternativa al uso y extracción de materiales naturales que requieren mucha energía en sus procesos de transformación, sin mencionar el creciente descarte de neumáticos que aún no son reciclados en masa. Usados como alternativa a la capa común de drenaje, los restos de caucho proveen una ligera mejoría en el drenaje de agua, menor densidad aparente, además de reducir el peso neto y mejorar la capacidad de retención de agua. Además, no se muestra un efecto en el desarrollo de las plantas ni en el medio de crecimiento.

Sin embargo, el origen del neumático y su composición pueden representar un riesgo ambiental. La composición de las llantas en promedio es 48% de cauchos, 1.2% de óxidos de zinc, textiles 5%, acero 15%, azufre 1%, negro de humo 22%. Los elementos que se destacan en su composición son C, H, Fe, Zn, S, N y O. El desperdicio de llanta puede contener sustancias peligrosas como PAHs (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos) y metales pesados (Cr, Pb, Ni, Cd, Ta).

El estudio realizado para evaluar su toxicidad se ha llevado a cabo con exposición a diferentes temperaturas en los que se mide fitotoxicidad y emisión de contaminantes tales como COVs (Compuestos Orgánicos Volátiles).

En todos los casos se utilizó la información provista por Gomes y colaboradores (2011). DC se refiere al método de pulverización criogénico y RA al mecánico.

En el caso de DC la determinación de material particulado PM 2.5 alcanza los mayores niveles al exponerse a temperaturas de 40° C con 1.95 mg/m³. En contraparte RA presenta hasta siete veces más a la misma temperatura, es decir 13.8 mg/m³. En cuanto a los COVs la mayor concentración alcanzada la provee RA a 40°C con 12.1 ppm, mientras que DC refiere un tercio de ese valor.

En cuanto a los hidrocarburos es igualmente RA a 40° C la que presenta la mayor concentración con 12 mg/m³.

En el análisis de metales pesados en lixiviados se buscó Cd, Cr, Hg, Pb, Sn y Zn. Las concentraciones de metales pesados durante la lixiviación fueron menores a las estandarizadas como peligrosas por la DIN (normas alemanas).

Para probar la toxicidad se utilizaron crustáceos y algas. En todos los casos, la supervivencia fue del 100%.

También se ha mostrado que el uso de llantas en los sustratos es una buena fuente de zinc, que resulta positivo ya que es elemento que suele ser limitante para el crecimiento vegetal. Sin embargo, estos estudios realizados con polvo de llanta (nanómetros) muestran que se acumula una fracción del sustrato en las raíces del pepino (especie utilizada en el estudio). Se requieren estudios posteriores para determinar si están o no biodisponibles y cómo podrían afectar la red trófica (Moghadassi, S. *et al.*, 2015).

A pesar de los esfuerzos que se han realizado a nivel internacional, en México no hay estudios específicos que prueben la viabilidad del uso alternativo de materiales para la construcción e implementación de azoteas verdes.

3.2.1 Fracción orgánica en AV

La FLL (2011) sugiere que limitar el contenido de materia orgánica hasta en 6% para azoteas intensivas y hasta 20% en extensivas. Esto debido a que se busca mantener el funcionamiento de la enmienda orgánica a largo plazo, para evitar el lavado constante de los nutrientes.

En cuanto a las enmiendas orgánicas para añadir a las azoteas verdes hay distintos tipos:

Se ha reportado, en diversas investigaciones alrededor del mundo, el uso de materiales orgánicos como cáscara o fibra de coco, turba, desechos municipales orgánicos (poda), mantillo o cobertura vegetal, corteza de coníferas, composta de desechos municipales orgánicos (poda), composta de hojas, flores y pasto (Kasmin *et al.*, 2016; Eksi *et al.*, 2015; Vijayaraghavan & Joshi., 2014; Nagase & Dunnet, 2011).

La composta y los residuos orgánicos se utilizan como la fuente de nutrientes para las plantas, así como el material que favorece la retención de agua. También los residuos orgánicos se utilizan como propuesta de remediación. Entre ellos está el uso de cáscara de naranja y café, que son ejemplos de desechos que favorecen el acondicionamiento de materiales muy alcalinos. i.e. En 2007, Roldán y colaboradores utilizaron suelo y cáscara de naranja en proporciones de 100:0, 98:2, 96:4, 94:6 y 92:8 como biorremediador de contaminación por hidrocarburos total o TPH (Total Petroleum Hydrocarbon) en el estado de Veracruz, esto bajo condiciones de baja humedad. La caracterización del suelo y de la cáscara de naranja incluía la

determinación de pH en proporciones de agua de 1:1. El experimento se llevó a cabo durante tres meses, durante los cuales se realizaron mediciones a los 15, 60 y 90 días. El pH inicial del suelo era ligeramente alcalino con un valor de 7.5, mientras que el de la cáscara de naranja era 5.93. Al cabo de 15 días el pH disminuyó a 6 y se estabilizó de nuevo hacia el neutro en el segundo periodo de monitoreo. Esto indica que, a pesar de no ser el objetivo principal del estudio, la adición de cáscara de naranja sin pasar por el proceso de composteo, dio resultados positivos para la acidificación del pH de suelos naturales. Asimismo, el tratamiento 92:8, generó la mayor pérdida de hidrocarburos (69%) a los 15 días, aunque al cabo de 90 días no se encontraron diferencias entre los tratamientos. Debido a lo anterior se concluye que estos residuos tienen un efecto claro y positivo en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

El uso de granos de café inmaduros, bajo el mismo diseño experimental anterior, se ha reportado igualmente para la biorremediación de contaminación de suelos por hidrocarburos en suelos de Veracruz. En el caso de la caracterización de los granos de café se tenía un pH inicial de 4.2, mientras que para el suelo se tenía 7.5. Al cabo de 15 y 60 días el pH tuvo una disminución de 7.5 inicial a 6.5 promedio en la mayoría de los tratamientos, salvo aquel en que no se adicionaron los granos de café. Al cabo de 15 días, se logró remover hidrocarburos hasta en un 63% con la enmienda de 98:2, por lo que se constata la efectividad del café como biorremediador.

En otro experimento, propuesto por Morikawa y Saigusa en 2008, se utilizaron desechos de café para incrementar la disponibilidad de micronutrientes en suelos alcalinos. En este caso se utilizaron andosoles con pH 7.7 y suelos calcáreos con pH 9.4. Los desechos de café tenían un pH en agua de 5.26; en contraparte, se usó composta de desechos de café, cuyo pH resultó de 1.78. Se realizaron mediciones a los 30 y 60 días, de las que resultó una disminución del pH de los suelos calcáreos a 9.18 y 9.0, respectivamente; mientras que en el caso de los andosoles se reportó una disminución hacia 7.67 y 7.41, para los periodos de 30 y 60 días.

En estudios más recientes (Mohamad, *et al.*, 2016; Grard, *et al.*, 2015), se han utilizado residuos de café (coffee grounds) con una inoculación de micorrizas, composta y tierra negra a modo de servir como sustrato para especies vegetales comestibles (tomate, lechuga, perejil, zanahoria y fresa) en una azotea verde. Lo anterior se logró con éxito en las inmediaciones de la ciudad de París. Se midieron metales traza (MT) para conocer la inocuidad, resultando que ninguna de las especies presentaba una concentración peligrosa de acuerdo con los estatutos norteamericanos. Las mayores concentraciones de MT se presentaron en el perejil

y la lechuga. Se determinó que la fuente principal de los MT era el aporte atmosférico cerca de espacios con pesado tránsito vehicular. Asimismo, se encontró que la producción de hortalizas era equiparable a la agricultura tradicional y que el acomodamiento del sustrato en capas fue benéfico para la actividad biológica a partir de la inoculación con lombrices.

3.3 Agricultura urbana en la Ciudad de México

La agricultura urbana se trata de una práctica presente en diferentes ciudades del país, pero se centran en la dinámica de las grandes ciudades, la metrópoli y zonas conurbadas del centro de México. La transformación de las áreas rurales de producción agrícola remanentes en inmediaciones de centros urbanos son lo que dan origen a este tipo de agricultura (Torres, 2000).

La agricultura en la CdMx se presenta en tres formas: periurbana, urbana y suburbana. Cada una de las cuales difiere según su localización, la población residente y los sistemas de cultivo; aunque también se define por la densidad de edificios, de calles, espacios abiertos o la presencia de cuerpos de agua y bosques (Ídem).

La agricultura urbana se establece principalmente en jardines familiares, en los que la producción se reduce a pequeños huertos, plantas medicinales y en casos más raros, a la producción de leche (Torres, 2005).

3.4 Rooftop gardening o agricultura en techos verdes

Mejor conocida como *rooftop agriculture* o *rooftop gardening*, es un esquema relativamente nuevo de producción alimenticia en la que se insta a las poblaciones de las urbes a consumir vegetales producidos localmente.

Algunos inconvenientes reportados se deben a las restricciones del peso que es capaz de sostener la estructura del edificio, esto pone en perspectiva los requerimientos de densidad del sustrato y de la generación de biomasa del cultivo. Asimismo, las profundidades someras en el sustrato representan una limitante, así como las condiciones ambientales y la exposición a condiciones adversas (Eski *et al.*, 2015)

En 2015, Eski y colaboradores reportaron el porcentaje óptimo de materia orgánica adicionada al sustrato de una azotea verde extensiva con fines productivos, con cultivos de pepino (*Cucumis sativus*) y chiles (*Capsicum annuum*). Lo anterior fue comparado con controles de suelo de jardines cultivables a nivel del piso. El aporte de materia orgánica provenía de composta comercial derivada de la poda municipal en Estambul. Se trabajaron distintos porcentajes de composta (0, 20, 40, 60, 80 y 100%) en una mezcla de arena y arcillas expandidas. Los resultados arrojan que

para el cultivo de chiles y pepinos los mejores rendimientos de producción de biomasa y de la cosecha se dieron entre 60 y 80% de composta añadida, afectando más a los frutos de chile que a los de pepino. Igualmente, el desempeño productivo en la azotea verde resultó superior al del crecimiento en tierra, lo que implica la viabilidad del cultivo en azoteas.

3.5 Especies mexicanas para cultivo en azoteas verdes

Martínez (2013) propuso el uso de diferentes especies mexicanas para implementar agricultura urbana en techos verdes o rooftop agriculture con distintos sustratos que incluían el uso de agrolita, composta, tierra de hoja, tierra negra, perlita, arena, tepojal y peatmoss. Estos materiales se eligieron sobre otros en función de su capacidad de retención de humedad, porosidad, densidad y granulometría.

Las especies vegetales elegidas se tomaron en cuenta por su resistencia vientos fuertes, exposición al sol, adaptación al clima templado subhúmedo y especies perennes, comestibles y mexicanas: cilantro (*Coriandrum sativum* L.), verdolaga (*Portulaca oleracea* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris*), amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), romeritos (*Suaeda torreyana*), epazote (*Chenopodium ambrosioides*), acelgas (*Beta vulgaris*) y rábano (*Rhapanus sativus*).

3.5.1 Uso potencial de jitomate para cultivo en AV

De acuerdo con SIAP, el balance de producción de jitomate o tomate rojo, incluida cualquier variedad, durante el primer bimestre del año 2017 es de 22,512 ha sembradas; de las cuales 14, 219 ha han sido cosechadas, es decir, el 63%, con lo cual se han producido un total de 416, 093 toneladas.

El principal productor de tomate rojo saladette es Sinaloa con cerca del 34% de producción nacional en el año 2015 (SIAP), seguido por Michoacán y Zacatecas con el 18 y 8%, respectivamente. Sinaloa abastece el mercado nacional y la mitad del norteamericano (SAGARPA, 2010). En contraste, la Ciudad de México produjo en el mismo año 126.05 toneladas de jitomate, es decir, menos del 1% de la producción nacional; lo que implica que la demanda del mismo se cubre con la movilización del producto desde el interior del territorio mexicano. La CdMx no abastece por sí misma su consumo de este fruto, por lo que sería deseable que se produjera dentro de la urbe en espacios que se consideran desperdiciados y estériles, como las azoteas.

Capítulo 4

Justificación

Las ciudades en el mundo enfrentan numerosos retos, entre ellos el crecimiento acelerado de la población (Cohen, 2001), contaminación atmosférica (Edgerton *et al*, 2011), la generación de residuos sólidos urbanos (SEDESOL, 2009), el suministro y disposición de agua (Jujnovsky *et al*, 2012), por mencionar algunos.

Particularmente en la Ciudad de México y en la presente tesi, la generación de residuos sólidos urbanos es el tema que nos atañe en el presente trabajo. Esto se debe a la creciente dinámica inmobiliaria del sector vivienda, industria, comercio, servicios y salud (CEESCO, 2016) cuyos procesos de edificación necesariamente generan residuos. De acuerdo con el Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México (IRS) publicado por SEDEMA en 2015, solamente en la CdMx se producen en promedio 12,893 toneladas de residuos sólidos urbanos de cualquier tipo, derivados de actividades comerciales, turísticas, manufactureras, académicas, industriales, administrativas, entre otras. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se producen principalmente residuos orgánicos, cartón, plástico y vidrio, además de neumáticos y residuos de la construcción. Estos últimos se clasifican en residuos de manejo especial, es decir, provenientes como descarte de actividades productivas (NOM-083-SEMARNAT, 2003).

De la producción diaria de RS en la CdMx, hasta 7,000 toneladas por día (NADF-007-RNAT-2013, 2010) se derivan de la industria de la construcción, demolición y excavación. Se estima que el 39% proviene de material de excavación, 24% es escombros, 25% concretos y el 12% restante pertenece a otros (Laiseca, 2016). Las delegaciones Venustiano Carranza, Benito Juárez, Iztapalapa, Gustavo A. Madero y Tlalpan son las que, en conjunto, aportan hasta el 98.3% de la totalidad de descarte de estos residuos. En 2014 (SEDEMA) se procesaron 21,653 toneladas en la planta portátil itinerante para el tratamiento de la construcción, que abarca las, hasta ahora, 16 delegaciones políticas. Por otro lado, hasta 2011 había 14 centros autorizados para la disposición de estos materiales divididos en el área metropolitana y dos centros de transferencia autorizados en Tláhuac e Iztapalapa (SEDEMA, 2014). Sin embargo, no todo el descarte de los residuos de la

construcción (escombro, cascajo, materiales de demolición y excavación) son tratados. En 2010 la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (PAOT) reportó que terrenos baldíos y áreas ecológicas con un alto valor ambiental y urbano, son utilizados como tiraderos clandestinos. Hasta ese año, se encontraron 168 tiraderos de residuos de construcción distribuidos a lo largo y ancho del entonces Distrito Federal (DF), aunque es posible que existan cientos más. Tláhuac es la delegación más afectada al presentar 31 casos, seguida por Cuajimalpa y Álvaro Obregón. 55% se encontró en suelo de conservación y 45% en suelo urbano.

De acuerdo con la CMIC (2013), en México, sólo existen sitios especializados de disposición de residuos de construcción y demolición (RCD) en cuatro estados: Estado de México, con 14 sitios, el antes DF con un centro de transferencia, Guanajuato, con una planta en Irapuato, y Baja California, con 3 plantas en total.

Las afectaciones de los tiraderos de RCD incluyen al agua, aire, suelo (sellamiento y contaminación), flora y fauna, servicios ecosistémicos y al drenaje, también provoca la saturación de los sitios de disposición final e impactos sociales (i.e.: inundaciones, contaminación y enfermedades respiratorias), proliferación de fauna nociva, impacto visual estético y obstrucción de arroyos, cañadas y barrancas (PAOT, 2010; CMIC, 2013).

Por otro lado, la explotación de áridos o materias vírgenes para la construcción representa la segunda materia prima más consumida después del agua y pertenece a una actividad económica extractiva que está en pleno auge. Los recursos que emplea son: caliza, arenas, grava, rocas ígneas y sedimentarias. Se ha reportado que para la fabricación de sólo un metro cúbico de concreto u hormigón, es necesario entre 1.8 y 1.9 toneladas de áridos o materia prima (ANEFA, 2016). El uso de materiales reciclados disminuiría el empleo de materiales vírgenes en la construcción, lo que implicaría preservar áreas naturales (Luna, 2012).

Bajo las mismas circunstancias, en Morelos y zonas aledañas se han reportado grandes extracciones de tierra negra y hoja de monte para abastecer la demanda de material orgánico en cientos de viveros de la Ciudad de México, todo ello bajo el esquema de la ilegalidad. Esta extracción se liga con la degradación de suelos y recursos forestales. El mismo fenómeno se ha reportado en zonas boscosas de Querétaro y la Sierra Gorda, Cuajimalpa, Xochimilco y otras entidades circundantes a la CdMx (Ávila, 2001; Wagner, 2014; González, 2007).

Además, uno de los objetivos de SEDEMA a partir del 2007 fue “incrementar la superficie actual de áreas verdes que existen en la Ciudad de México, a través del desarrollo de tecnologías sustentables. Pretende contribuir y compensar la pérdida que se genera durante los procesos de construcción de edificaciones.”

Desde ese año y hasta el 2015, se han naturalado 32,764.44 m² de azoteas verdes, solamente sumando la participación de recursos públicos. Las edificaciones

equipadas con AV van desde escuelas y clínicas/hospitales, hasta edificios públicos y del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

El único año en que no se construyeron AV fue en 2011, sin embargo, el máximo fue en el año 2014 con 7,511.69m². Aunque no hay registro de la creación de AV con participación de la iniciativa privada, hay una clara tendencia a incrementar la superficie de las AV en la CdMx. Asimismo, la construcción de azoteas verdes requiere de materiales como el tezontle, tepojal, arenas y arcillas, que son igualmente extraídos de medios naturales a través de minas localizadas en la el Estado de México, principalmente. La producción incluye grava, arena, caliza, tezontle y tepetate, seguidos de otros minerales no metálicos de importancia como la dolomía, tepojal, arcillas y diatomita. El 97% de estos materiales están destinados a la industria de la construcción y el resto para la fabricación de vidrios (Alvarado, 2014).

Por otro lado, los RSU han sido utilizados en nuestro país y otros del mundo como estabilizadores de suelos, en rellenos, como filtros o terraplenes, cubiertas para rellenos sanitarios, construcción de caminos secundarios, además de la producción de materiales de construcción como bloques, adoquín, losetas decoración en parques y jardines, pavimentación, hormigones, mortero (Luna, 2012; Bedoya, 2003; Laiseca, 2016).

Es importante notar que la extracción de materiales vírgenes para proveer materias primas para la construcción de áreas naturadas y de construcción en general, pueden representar una fuerte presión en los ecosistemas. Además, la disposición final genera diversos conflictos sociales y ambientales que incluyen el sellamiento y compactación de suelo, así como contaminación. Debido a esto, la reutilización de materiales residuales de la construcción es una opción factible.

Como otra alternativa al reuso de los RSU, Sebastián Flores (2016) realizó múltiples estudios con diferentes combinaciones de estos materiales originarios de la CdMx y triturados por la empresa Concretos Reciclados para probarlos como sustrato para el crecimiento de plantas. Los componentes que se utilizaron fueron concreto molido, residuo de demolición y residuos de excavación. El contenido de los desechos de concreto molido incluían una mezcla de cemento, piedra caliza, arcilla y mineral de hierro, yeso, fragmentos de roca y agua. Para el segundo una mezcla de adocretos, blocks, concretos, cerámicos, mamposterías, ladrillos y tabiques. Por último, los residuos de excavación eran arenas recicladas. También se utilizó tepetate por tratarse de otro residuo urbano. Por otro lado, se usó composta de tala y jardinería provista por la Planta de Composta de la UNAM como el componente orgánico en el diseño experimental.

Se realizaron 9 mezclas con diferentes proporciones de los compuestos anteriormente mencionados Las 9 mezclas que se caracterizaron se constituyeron

por tepetate en todos los casos, adicionado con concreto, residuos de excavación, de demolición y bajo, medio y alto contenido de composta (10, 20 y 30%, respectivamente). Se caracterizaron los siguientes parámetros químicos y físicos en las mezclas: pH, iones mayores, metales totales, CE, densidad real y aparente, porosidad, capacidad de campo, textura, conductividad hidráulica, carbono total y nitrógeno total.

Los resultados arrojan que las mezclas provenientes de residuos de excavación son las que proveen mejores condiciones para el crecimiento de plantas ornamentales como el *Sedum* y comestibles como el tomate tipo cherry. En todos los casos se demostró que se pueden utilizar como soporte vegetativo para remediación ecológica en zonas urbanas o remediación en suelos degradados, sin el riesgo de toxicidad por metales pesados.

Con lo anterior queda de manifiesto que, en la Ciudad de México, es una posibilidad reutilizar RSU de distintos tipos y orígenes (orgánicos e inorgánicos) mezclados para obtener un sustrato para el crecimiento de vegetación ornamental y comestible, para camellones y áreas verdes urbanas en general. En México no se han realizado estudios en materia de los materiales que se pueden utilizar para la construcción de azoteas verdes, salvo la fracción mineral que propone la norma 013 del Distrito Federal que incluye materiales de origen volcánico o artificial, como el tezontle y las arcillas expandidas, que se usan con regularidad en la implementación de estos sistemas de naturación.

Capítulo 5

Objetivos e hipótesis

5.1 Objetivos

5.1.1 General

Proponer diferentes mezclas de sustrato que provengan de materiales de desecho, que tengan las características necesarias para utilizarse en la construcción de azoteas verdes: dar soporte para plantas, tener baja densidad y alta capacidad de retención de humedad.

5.1.2 Particulares

1. Caracterizar los desechos individualmente y las mezclas a través de las variables indicadoras de sustratos que pueden soportar el desarrollo de plantas (densidad aparente, porosidad, capacidad de retención de humedad, pH, CE, metales y sobrevivencia).
2. Evaluar el comportamiento químico de las mezclas en el tiempo.
3. Evaluar el desarrollo vegetativo de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) y verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) por medio de la sobrevivencia, altura, diámetro de tallo, número y peso seco de frutos y biomasa)
4. Mostrar por medio del análisis de metales que los frutos son aptos para el consumo.

5.2 Hipótesis

H0: El jitomate (*L. esculentum* Mill.) crece en la mezcla que pasó por un acondicionamiento previo (Ma) porque ya hubo un lavado de sales.

H1: La adición de caucho molido mejorará propiedades físicas del sustrato (porosidad, densidad y compactación).

H2: La adición de polvo de naranja y café acidificará el pH, que en origen es alcalino.

H3: La siembra verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) como planta adaptada a condiciones de pH alcalino mejorará las condiciones para el crecimiento de otras especies *a posteriori*.

Capítulo 6

Método

6.1 Selección de los materiales

6.1.1 Materiales minerales

Se utilizaron residuos de demolición, provistos por la empresa Concretos Reciclados S.A. de C.V. La composición de estos residuos es una mezcla que incluye adocretos, blocks, concreto, cerámicos, mampostería, ladrillos y tabiques.

Por otro lado, se empleó tepetate, definido como suelo endurecido de origen volcánico.

Asimismo, se empleó caucho molido de 3-5 mm, mismo que fue facilitado por la empresa Reciclados Vanguardía.

6.1.2 Materiales orgánicos

Se utilizó composta generada en la Planta de Compostaje de Ciudad Universitaria, perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La base sobre la cual se realiza el compostaje proviene de la poda de áreas verdes del campus.

Se obtuvieron residuos de café y cáscaras de naranja del Comedor de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

6.2 Selección de plantas

Se utilizaron dos especies de plantas comestibles nativas de México con la intención de responder a lo siguiente:

El establecimiento en las distintas mezclas y el crecimiento y producción de biomasa de especies perennes de desarrollo rápido (jitomate: *Lycopersicon esculentum* M.).

El acondicionamiento de las mezclas tras el establecimiento de una especie conocida por su resistencia a condiciones de salinidad, pH elevado y bajos requerimientos de humedad (verdolaga: *Portulaca oleracea*).

6.2.1 *Lycopersicon esculentum* M. (jitomate)

Esta especie requiere una alta humedad, así lo reportan Velasco y colaboradores (2011), con hasta 50-60% respecto a la porosidad del sustrato y valores altos de porosidad (85%). Los requerimientos de las plantas pueden revisarse en la tabla 6.1.



Figura 6.1. *Lycopersicon esculentum* Mill. Tomado de Conabio (2009)

Tabla 6.1. Condiciones necesarias para el establecimiento de plantas de jitomate

Horas de luz	Mínimo 6 horas de radiación
Temperatura	18-27°C
Humedad en sustrato	50-60% (Velasco, et. al, 2011)
pH	6-6.5
CE (en lixiviado de suelo)	<2.5 mS/cm
Macronutrientes	Nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre (FAO, 2013)
Micronutrientes	Hierro, molibdeno, boro, cobre, manganeso, zinc, cloro (FAO,2013)

6.2.2 *Portulaca oleracea* (verdolaga)

Como se mencionó anteriormente, la verdolaga ha sido probados en azoteas verdes funcionales (Martínez, 2013; Vijayaraghavan & Badavane, 2016). Se adaptan, además, a las condiciones que es posible encontrar en azoteas (Tabla 6.2) y ha sido probado que se adaptan a condiciones de sequía y alta salinidad (Yazici, *et al.*, 2007).

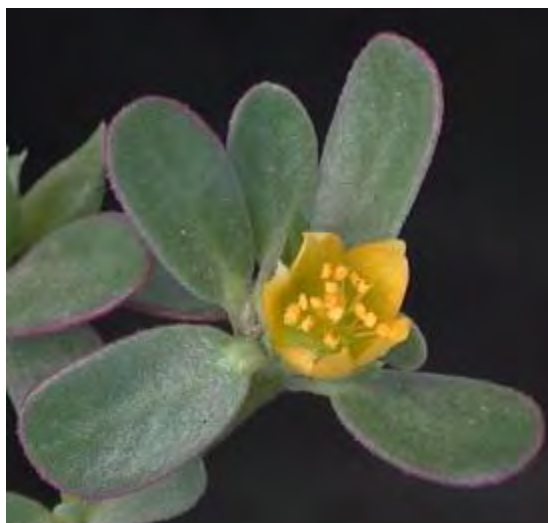


Figura 6.2. *Portulaca Oleracea*. Tomado de Conabio (2009)

Tabla 6.2. Condiciones necesarias para el establecimiento de plantas de verdolaga

Horas de luz	Soporta altas radiaciones
Temperatura	21 hasta 32°C
Humedad en sustrato	No soporta inundaciones
pH	6.1-6.5 (FAO, 2013)
CE (en lixiviado de suelo)	1- 1.5 mS/cm (Panamerican Seeds, 2017)
Macronutrientes	Nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre (FAO, 2013)

6.3 Preparación de mezclas

6.3.1 Materiales

Para la preparación de la mezcla de café y naranja se pusieron a secar a 40°C para eliminar la humedad y no destruir la materia orgánica. Después de tres días de secado se trituraron las cáscaras de naranja. Finalmente se mezclaron ambos en una proporción 1:1.

6.3.2 Mezclas

Se colocaron los pesos correspondientes de cada material, según el porcentaje seleccionado, para tandas de 20 kg en cubetas de 20 L, donde se rotaron hasta conseguir la homogeneidad. Se repitió el procedimiento hasta conseguir la cantidad suficiente de cada mezcla propuesta.

Para la preparación de la mezcla de café y naranja se pusieron a secar a 40°C para eliminar la humedad y no destruir la materia orgánica. Después de tres días de secado se trituraron las cáscaras de naranja. Finalmente se mezclaron ambos en una proporción 1:1.

Se reutilizó la mezcla 5 que Sebastián Flores (2016) usó en su experimento para probar si hay diferencias entre mezclas nuevas (Mt, Lt, NCt, Bt y Rt) y otras acondicionadas previamente (Ma, Ba, Ra). Las composiciones de cada una de las mezclas anteriores se ilustran en la tabla 6.3.

Tabla 6.3. Características composicionales de cada tratamiento.

%	Jitomate				Verdolaga		S/P	
	Ma	Mt	Lt	NCt	Ra	Rt	Ba	Bt
Demolición	60	60	54.5	54.5	60	60	60	60
Composta	20	20	18.2	18.2	20	20	20	20
Tepetate	20	20	18.2	18.2	20	20	20	20
Caucho molido	-	-	9.1	-	-	-	-	-
Café/Naranja 1:1	-	-	-	9.1	-	-	-	-

a: acondicionada. t: tamizada <3 mm. S/P: sin planta.

6.4 Germinación de plantas

En un almácigo se colocaron 30 semillas de *L. esculentum* en cada una de las mezclas Ma, Lt, NCt y Mt mientras que para Ra y Rt se utilizaron 30 de *P. oleracea*. La fig. 6.3 muestra el crecimiento en almácigo. Después de contabilizar las semillas germinadas y dejar un periodo de 3 días de aclimatación, se procedió al trasplante a las columnas experimentales.

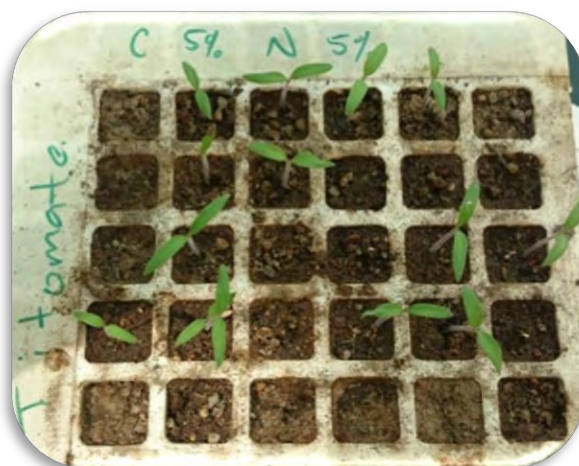


Figura 6.3. Germinación en almácigo

6.5 Montaje experimental

Se utilizaron macetas hechas con columnas de PVC de 18 cm de altura y 20 cm de diámetro (fig. 6.4), este diseño permite monitorear cambios de volumen, la obtención de lixiviados y la medición de variables *in situ*, además de simplificar el manejo del experimento.

Se colocó malla en la parte de abajo para cerrar la tapa inferior del cilindro. De cada una de las mezclas se realizaron cuatro réplicas, dando un total de 32 columnas. Se colocaron 15 cm de cada sustrato en las columnas, dando con ello un volumen total de 4712.388 cm³ en cada una. Se trasplantaron cuatro individuos de los germinados anteriormente para cada mezcla, según correspondía verdolaga o jitomate (Tabla 6.3). En total se colocaron 64 plántulas de jitomate y 32 de verdolaga (fig. 6.5). El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero en el Invernadero Automatizado del Instituto de Geología de la UNAM.

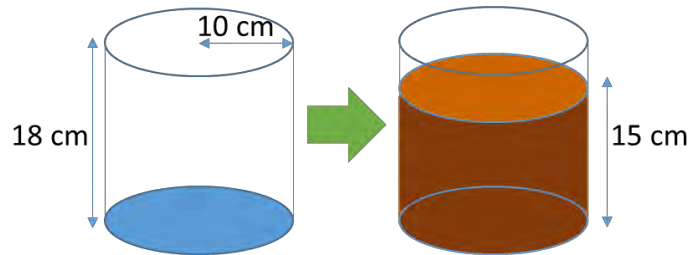


Figura 6.4. Medidas de columnas y nivel del sustrato

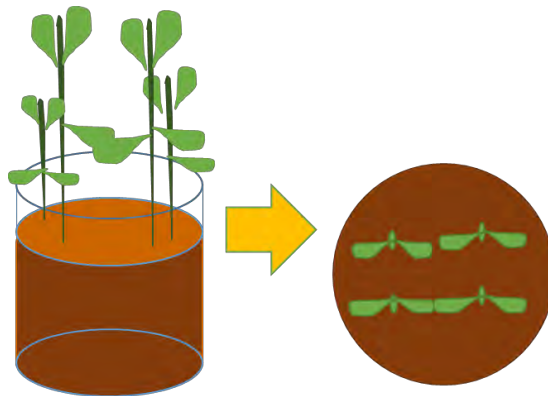


Figura 6.5. Número y distribución de plantas por columna

6.5.1 Riego

Se realizó un riego semanal con 500 ml de agua corriente, que se midió con probeta y se colocó despacio en cada uno de los grupos experimentales, con

cuidado de no generar lixiviados que pudieran alterar los resultados a la hora de obtener en otra ocasión la solución del suelo.

6.5.2 Obtención de lixiviados

Una vez por mes (a partir del primer riego) se vertió 1 L de agua corriente, medido con probeta. Se colocaron las columnas sobre embudos de 20 cm de diámetro y se colectaron los lixiviados. El embudo se enjuagó con agua mili-Q entre cada riego. También se colectó una muestra del agua de riego.

6.6 Caracterización de materiales y mezclas

6.6.1 Caracterización física

A cada uno de los materiales seleccionados y las mezclas de estos se les hicieron pruebas para conocer sus propiedades físicas: densidad aparente, densidad real, porosidad y capacidad de retención

6.6.2 Caracterización química

Se analizaron pH, CE, metales totales e iones mayores. Los métodos utilizados se muestran en el apartado de métodos analíticos (Tabla 6.4).

6.6.3 Mezclas como soporte para plantas

En este caso se evaluó la sobrevivencia de las plantas en almácigo y en las columnas después del trasplante y durante el tiempo que duró el experimento.

El crecimiento de las plantas se evaluó de acuerdo con el monitoreo mensual de la altura, diámetro de tallo de cada especie por mezcla. Al final del experimento se colectaron las plantas para conocer el peso de la biomasa seca de tallos, hojas y raíces.

Se obtuvo el número de frutos producidos por planta y por mezcla, así como la biomasa seca de cada uno.

6.7 Métodos analíticos

Se utilizaron los siguientes métodos para la obtención de características físicas, químicas y biológicas de los diferentes sustratos, en los lixiviados, como en los individuos de jitomate (*L. esculentum M.*) y sus frutos.

Tabla 6.4. Métodos *in situ* y en laboratorio

Medio	Parámetro	Método	Equipo	Referencia
Materiales individuales y mezclas	pH	Potenciometría	Beckman Phi 34	ISRIC, 1992
	Conductividad eléctrica	Conductancia	LaMotte CON6	ISRIC, 1992
	Densidad aparente	Gravimétrico	Balanza OHAUS	Flores, L., <i>et al.</i> , 2010
	Densidad real	Volumétrico	Picnómetro	Flores, L., <i>et al.</i> , 2010
	Metales totales	ICP-OES	Perkin Elmer Optima 83000 DV	NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004
	Iones mayores	Cromatografía	Waters 1525	XP CEN ISO/TS 21268-1
	Carbono y nitrógeno totales	Conductividad térmica	CNHS/Perkin Elmer 2400	
	<i>in situ</i>			
	Tensión	Conductancia eléctrica	Irrrometer Watermark 900M	
	Conductividad eléctrica	Conductancia eléctrica	Delta-T E-312-WET-2-K1	NOM-021- RECNAT-2000
	Humedad	Reflectometría	Delta-T E-312-WET-2-K1	
	Temperatura		Delta-T E-312-WET-2-K1	
	Compactación	Volumétrico		
	Elementos traza	ICP-OES	Perkin Elmer Optima 83000 DV	NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004
Lixiviados	Conductividad eléctrica	Conductancia eléctrica	La Motte CON 6	ISRIC, 1992

	pH	Potenciometria	Beckman Phi 34	ISRIC, 1992
	Iones mayores	Cromatografía	Waters 1525	
	Biomasa seca	Gravimetrico	Ohaus PA323C	
Plantas	Altura		Flexómetro	
	Diámetro de tallo		Vernier	
	Elementos traza	ICP-OES	Perkin Elmer Optima 83000 DV	NOM-147- SEMARNAT/SSA1- 2004
	Biomasa seca	Desección	Ohaus PA323C	
Frutos	Elementos traza	ICP-OES	Perkin Elmer Optima 83000 DV	NOM-147- SEMARNAT/SSA1- 2004
	Biomasa seca	Desección	Ohaus PA323C	

6.7 Métodos estadísticos y trabajo en gabinete

Para el análisis de equilibrio químico, especiación e índices de precipitación se utilizó el software Visual MINTEQ 3.1.

El ajuste de la curva de retención de humedad se hizo con el modelo empírico de Van Genuchten, a través del programa SWRCFit (Seki, 2007).

Los resultados obtenidos del crecimiento de plantas, acumulación de biomasa y número de frutos, se procesaron con el software Statistica 10.0 y se sometieron a un análisis de varianza de un factor (ANOVA). En los casos donde se encontraron diferencias, se realizaron pruebas post-hoc (Tukey-HSD con $p < 0.05$).

Capítulo 7

Resultados

7.1 Caracterización

De acuerdo con el método propuesto, se caracterizaron física y químicamente los materiales minerales y orgánicos seleccionados individualmente y con los componentes mezclados. A continuación, se presentan los resultados:

7.1.1 Caracterización química y física de materiales individuales

En la tabla 7.1 se observa que los residuos de demolición son el mayor componente de las mezclas y presentan también la mayor densidad aparente y real; en contraste, la menor porosidad. Tiene un pH alcalino de 11.4 y baja conductividad eléctrica en comparación con los demás componentes de las mezclas, junto al caucho molido (CM) y al tepetate. La composta presenta la mayor porosidad porcentual frente a los componentes minerales; esto es debido a su naturaleza orgánica. La densidad aparente de CM es baja, lo que indica que es un material altamente poroso. Esta característica es deseable para aligerar la carga del sustrato sobre la loza de las azoteas. De igual modo, la integración de materiales orgánicos, además de la composta, como los restos de café y naranja, cuyas porosidades son altas, propician una baja densidad aparente como la que se muestra individualmente y en una mezcla 1:1. La composta reporta la mayor CE y un pH cercano a la neutralidad. El comportamiento individual o en combinación de los restos de café y naranja, poseen los pH más ácidos y las CE más altas después de la composta. En cuanto a los datos obtenidos del CM en solución, el pH es prácticamente neutro, mientras que la CE es relativamente baja, lo que podría indicar que hay pocas sales solubles que se liberan.

Tabla 7.1. Propiedades físicas y químicas de los materiales individuales

Muestra	DA (g/cm ³)	DR (g/cm ³)	Porosidad (%)	pH	CE (mS/ cm)
Residuo de demolición*	1.3	2.6	49.8	11.4	1.57
Tepetate*	1.0	2.3	54.7	8.14	1.45
Composta*	0.5	1.70	68.3	7.76	4.3
Caucho molido	0.47	1.09	57.03	7.55	0.65
Café	0.45	1.10	58.8	3.85	3.28
Naranja	0.28	1.31	77.9	4.56	3.27
Naranja + café (1:1)	0.32	1.20	72.8	4.53	3.48

DA: Densidad aparente. DR: Densidad real. *Sebastián Flores, 2016

Algunos metales de importancia que se encontraron en bajas concentraciones (o no se detectaron) en las muestras de pasta de saturación son el aluminio, cobalto, cromo, níquel, titanio y vanadio. Como se esperaba los componentes orgánicos de las mezclas son los que poseen las mayores concentraciones de fósforo. El CM presenta la mayor cantidad de zinc en solución (fig. 7.2).

Tabla 7.2. Metales en pasta de saturación materiales individuales

Muestra	Al	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Mo	Ni	P	Sr	Ti	V	Zn
	mg/L														
Demolición*	0.02	0.02	<LD	0.22	0.06	0.01	0.01	<LD	0.05	0.01	**	0.96	<LD	0.06	**
Tepetate*	0.26	0.12	0.01	<LD	0.05	0.18	<LD	0.31	0.01	<LD	**	3	0.02	0.01	**
Composta*	0.08	0.19	<LD	<LD	0.06	0.25	0.03	0.02	0.06	0.02	**	1.5	0.01	0.02	**
Caucho molido	0.14	0.01	<LD	<LD	<LD	1.84	<LD	1.28	<LD	<LD	0.149	0.08	16.86	<LD	1.376
Café	0.24	0.06	<LD	0.006	0.07	0.41	0.02	0.08	<LD	0.03	17.88	0.36	0.009	<LD	0.17

Naranja	0.30	0.44	0.01	0.009	0.16	0.18	0.10	4.63	<LD	0.02	212.63	0.69	0.004	<LD	0.82
Café + naranja (1:1)	0.28	0.28	<LD	0.01	0.15	0.54	0.04	1.28	<LD	0.03	104.22	1.14	0.008	<LD	0.23

*Sebastián Flores, 2016. ** No analizado. <LD: menor al límite de detección

La composta y el tepetate tienen importantes concentraciones de cloro, lo que proveería de este elemento a las mezclas. Contrario a lo que se esperaría, en los residuos de demolición no se presenta el ion bicarbonato. El error de balance iónico en el caso de los iones mayoritarios se encontró en varios casos por encima del 10%, lo que implicaría que no se lograron leer las especies por completo (Tabla 7.3)

Tabla 7.3. Iones mayores en pasta de saturación materiales individuales

Muestra	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Error de balance iónico
	meq/L										
Demolición*	<LD	3.24	1.63	<LD	19.79	10.48	0.17	1.38	10.50	<LD	-4.51
Tepetate*	19.92	15.58	14.19	<LD	13.79	7.13	<LD	0.85	14.25	16.21	-24.57
Composta*	<LD	20.76	65.15	<LD	10.94	5.00	0.22	43.95	13.85	10.29	-13.83
Caucho molido	0.78	0.28	0.08	<LD	0.29	0.44	0.13	0.07	0.51	0.26	-0.69
Café	<LD	0.74	<LD	9.45	2.06	1.34	0.54	23.55	4.51	19.73	50.46
Naranja	<LD	0.16	<LD	0.36	0.44	0.32	<LD	8.45	3.56	1.57	67.07
Café + naranja (1:1)	<LD	0.32	<LD	4.63	2.45	1.15	<LD	32.85	11.27	11.54	66.92

*Sebastián Flores, 2016. <LD: menor al límite de detección

Es interesante notar que en la digestión ácida del CM no se detectó contenido en Mn (Tabla 7.4), dado que su origen es industrial. En cuanto a las concentraciones de algunos metales de interés, metales peligrosos como el As, Cd y V se encontraban por debajo del límite de detección (Ver anexo). En contraste, hay una concentración de alrededor de 0.8 ppm de plomo y estroncio y de 0.4 ppm de titanio. Y en el caso del zinc, que es un componente principal, una concentración de 953.15 mg/kg.

Tabla 7.4. Metales totales en caucho molido

Muestra	Al	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Li
	mg/kg							
Caucho Molido	9.249	<LD	0.751	<LD	0.326	0.798	9.739	0.470
	Mg	Mn	Ni	Pb	Sr	Ti	V	Zn
	mg/kg							
	34.364	1.025	0.675	0.823	0.896	0.490	<LD	953.15

<LD: menor al límite de detección

7.1.2 Caracterización de las mezclas

Se realizaron los mismos procedimientos que en el caso anterior, pero para las mezclas de tepetate, residuo de demolición, composta y, en el caso de la mezcla Lt, caucho molido; para NCt, una mezcla de café y naranja.

Tabla 7.5. Propiedades físicas y químicas de cada una de las mezclas

Mezcla	DA (g/cm ³)	DR (g/cm ³)	Porosidad (%)	pH	CE (mS/cm)
Ma	1.21	2.35	47.47	9.71	1.74
Lt	1.07	2.04	47.42	8.3	7.28
NCt	0.93	2.24	58.44	7.28	2.29
Ba	1.21	2.35	47.53	9.71	1.74
Ra	1.21	2.35	49.02	9.71	1.74
Mt	1.31	2.41	45.905	10.2	2.72
Bt	1.31	2.41	45.905	10.2	2.72
Rt	1.31	2.41	45.905	10.2	2.72

DA: Densidad aparente. DR: Densidad real

El volumen de poros se utiliza para conocer el espacio poroso, es decir, el espacio disponible como posible almacén de agua y aire que es potencialmente utilizable por las plantas.

La porosidad está ligada a la densidad aparente, por lo que la similitud entre el mayor volumen de poros y la menor densidad coinciden, como se esperaba, para la mezcla NCt (Tabla 7.5).

No hay diferencias entre ninguna mezcla, en cuanto al volumen de poros, salvo en el caso de NCt, que tiene un segundo componente orgánico añadido y presenta casi el 60% de poros con relación al volumen (fig. 7.1).

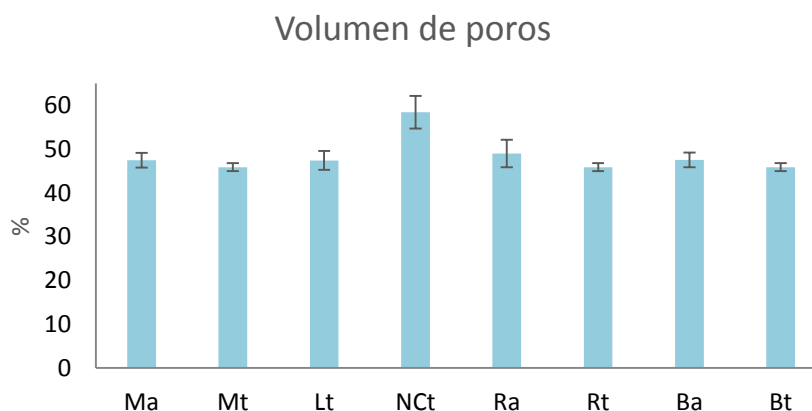


Figura 7.1. Porcentaje promedio de volumen de poros por mezcla y su desviación estándar. a: acondicionada. t: tamizada

En la tabla 7.6 se muestran los metales semitotales en muestras de las mezclas. De acuerdo con la NOM-EM-034-FITO-2000, se consideran de interés los metales mostrados en la tabla 7.7. En México esta norma establece los límites permisibles de metales en suelos para uso agrícola, considerados en peso seco (kg/ha).

Tabla 7.6. Metales pesados totales en cada mezcla

Mezcla	Al	As	Cd	Cr	Cu	Li	Mn	Pb	Ni	Sr	V
	mg/kg										
Ma, Ba, Ra	16683.9	<LD	2.2	42.5	16.5	14.2	336.3	28.9	53.2	66.5	37.5
Lt	15196.7	<LD	2	30	29.4	16	255	29.2	27.8	108.2	41.9
NCt	17523	3.2	2	35.4	18.1	14.2	251.2	59.5	26.3	100.7	41.8
Mt, Bt, Rt	13785.5	<LD	2.3	41.5	17.6	12.6	325.3	49	48	70.8	33.7
LP NOM-EM-FITO-2000	-	41	39	3000	1500	-	-	300	420	-	-
(kg/ha)											

<LD Menor al límite de detección. LP: Límite permisible

En la tabla 7.7 se observa que los iones mayores totales que son importantes para el crecimiento de la vegetación, contenidos en las partículas de cada mezcla, se comportan del siguiente modo: los más altos contenidos de hierro, calcio y potasio en la mezcla NCt, seguidos de la mezcla Lt. De modo contrario, la mezcla NCt es la más pobre en magnesio respecto a las mezclas minerales (Ma, Ba, Ra, Mt, Bt y Rt); esto también ocurre con las concentraciones más altas de fósforo. La mayor concentración de zinc está en la mezcla Lt, seguido por NCt. Las concentraciones de metales como Al, Cd, Mo, Ba no presentan variaciones importantes entre las mezclas o no se pudieron detectar. Por otro lado, elementos como Co, Cr, Fe, Ni, Mg, Mn hay menor presencia en el caso de las mezclas Lt y NCt, mientras que, por el contrario, son más elevadas para Sr, V, Zn. Los valores mayores de Cu, Li y Zn se presentan en la mezcla Lt, que tiene como componente caucho molido.

Tabla 7.7. Elementos totales importantes para el crecimiento de plantas en cada mezcla

Mezcla	Ca	Fe	K	Na	Mg	P	Zn
	mg/kg						
Ma, Ba, Ra	6305.51	20936.15	1575.87	957.45	11752.72	764.83	54.95
Lt	38567.72	15640.05	2168.77	1491.47	6189.04	659.95	176.18
NCt	40041.9	15312.5	2494.94	1131.50	4895	561.35	147.9
Mt, Bt, Rt	13387.68	19080.38	2434.82	925.27	10921.23	943.25	78.38

Es importante notar que la composición de las mezclas Ma, Ba, Ra, Mt, Bt y Rt es la misma, variando únicamente el tamaño de partícula (con Ma, Ba, Ra > Mt, Bt, Rt). Las variantes se presentan en las mezclas Lt y NCt con la adición de caucho molido y una mezcla 1:1 de café y naranja, respectivamente y con Mt, Bt y Rt, siendo materiales que no han sido acondicionados previamente.

En la figura 7.2 se muestran los contenidos de metales totales en muestras de las mezclas de este estudio y se comparan con la legislación vigente para metales en suelos de cultivo. Los LP se encuentran por encima del contenido de metales en las mezclas. Debido a lo anterior, se puede decir que en ninguno de los casos se sobrepasan los límites permisibles de metales en suelos utilizados para cultivo, de acuerdo con la legislación mexicana.

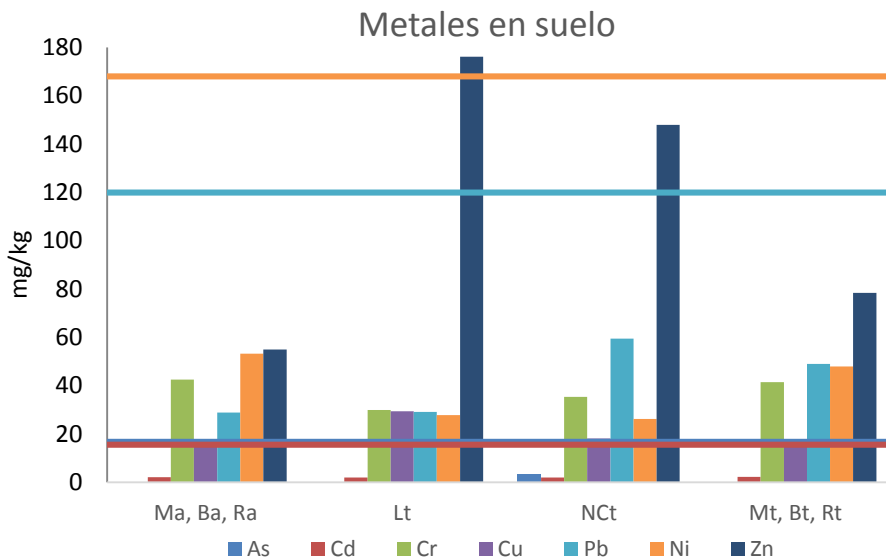


Figura 7.2. Metales semitotales en mezclas. Las líneas indican los límites permisibles para suelos de cultivo, según la NOM-EM-034-FITO-2000

7.2 Comportamiento químico de las mezclas en el tiempo

7.2.1 pH y Conductividad Eléctrica en lixiviados

A través de los ocho meses se colectaron los lixiviados de las mezclas, con el fin de observar los cambios en las variables químicas del pH y la Conductividad Eléctrica (CE). Se muestran los resultados desde el inicio hasta la última colecta en el octavo mes.

El pH tiene variaciones constantes a lo largo del experimento. Comparando el inicio y final del ciclo del cultivo, la mezcla Nct aumentó el pH de los lixiviados, de menos de 7.5 a casi 8.5. La mayor variabilidad entre todas las mezclas se presentó al tercer mes con 8.4 para la mezcla Mt y sus homólogos y con 7.4 en Nct (fig. 7.3).. Las mezclas Ma, Ra y Ba (que tienen la misma composición) se estabilizan alrededor de 8 en los últimos meses, mientras que Lt muestra una ligera disminución del inicio hacia el final, pasando de 8.30 a 8.19 (fig. 7.4).

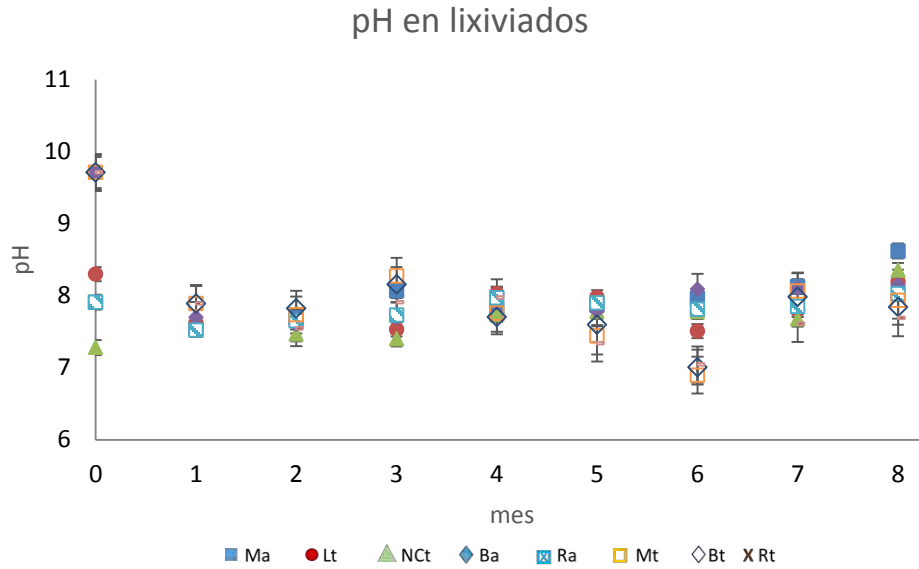


Figura 7.3. pH y SD de los lixiviados durante ocho meses

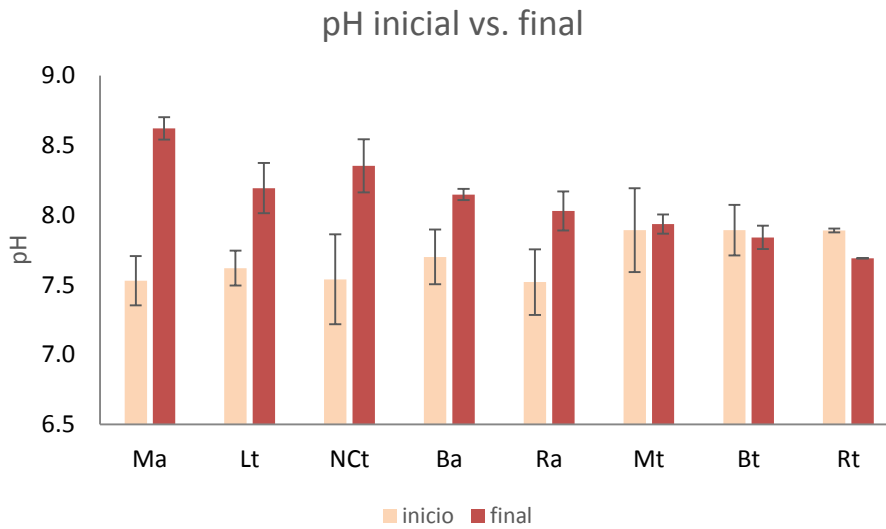


Figura 7.4. Comparación inicial y final de pH en lixiviados

En cuanto a la CE, hay notables fluctuaciones a lo largo del tiempo. La mezcla Nct presenta la menor variabilidad en los meses y va disminuyendo hasta la estabilización (fig. 7.5). En todas las mezclas hay una tendencia a disminuir con el tiempo. Hay que destacar que, al final, las CE menores corresponden a las mezclas sobre las que crecieron las plantas de jitomate. Esto podría atribuirse a la absorción de iones en solución por medio de raíces.

El aumento inicial en la conductividad eléctrica que se presenta en todos los casos conforme el agua de riego se administra, esta misma, posiblemente, aporta

minerales que podrían estar aumentando los valores de CE. La disminución de CE de los lixiviados colectados podría indicar que hay un lavado de sales solubles que se movilizan con los riesgos entre el inicio y el final del experimento (fig. 7.6).

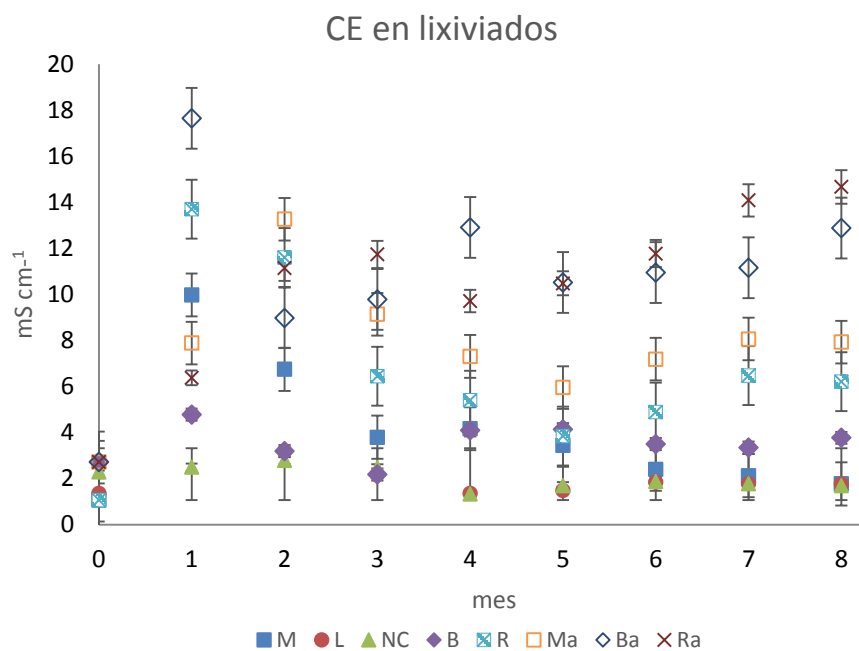


Figura 7.5. CE en lixiviados durante ocho meses

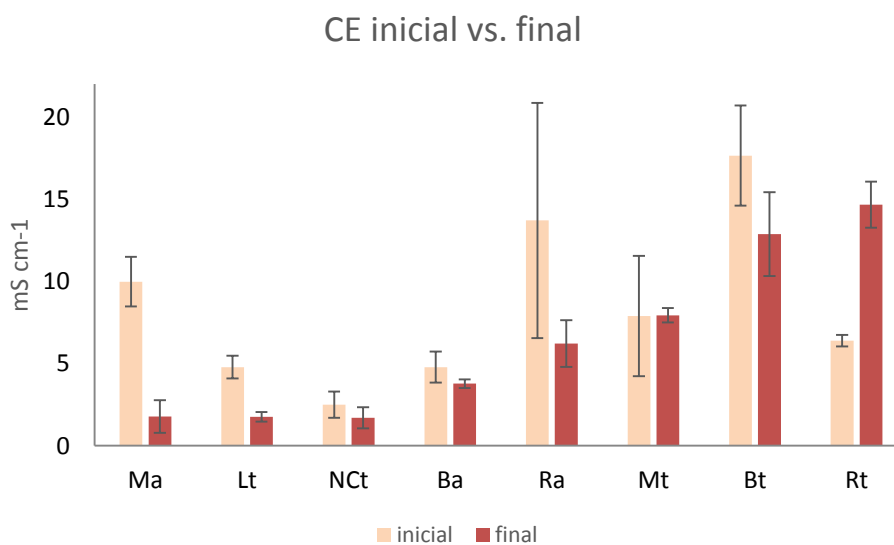


Figura 7.6. Comparación inicial y final de CE en lixiviados de las mezclas

7.2.2 Contenido de carbono, nitrógeno y fósforo total en mezclas

También se analizó el contenido total de carbono y nitrógeno. Se presentan a continuación los resultados.

Se observa en la figura 7.7 que el mayor contenido de carbono se presenta en la mezcla Lt y NCt con porcentajes por encima de 3%, seguidos de las mezclas Rt, Mt y Bt, en ese orden. Es importante mencionar que el porcentaje de carbono total incluye el carbono orgánico e inorgánico, lo que en el caso de las mezclas Lt y NCt es particularmente importante, pues ambos tienen entradas adicionales de hidrocarburos, en el caso de la primera, y de MO en el caso de la segunda. Este comportamiento se mantiene también para el porcentaje de nitrógeno total.

Por otro lado, las mezclas Mt, Rt y Bt no estaban previamente acondicionadas, es decir, son materiales recientemente mezclados, lo que los pone en perspectiva respecto a sus homólogos acondicionados (mezclas Ma, Ba y Ra), que tienen porcentajes menores de carbono, probablemente debido a que hubo mineralización durante el acondicionamiento. El comportamiento es contrario cuando se trata del nitrógeno total.

Entre los macronutrientes primarios requeridos por el jitomate, están el nitrógeno, el fósforo y el potasio (FAO, 2002). En todos los casos hay porcentajes bajos de fósforo que disminuye también la asimilación de nitrógeno (FAO, 2013)

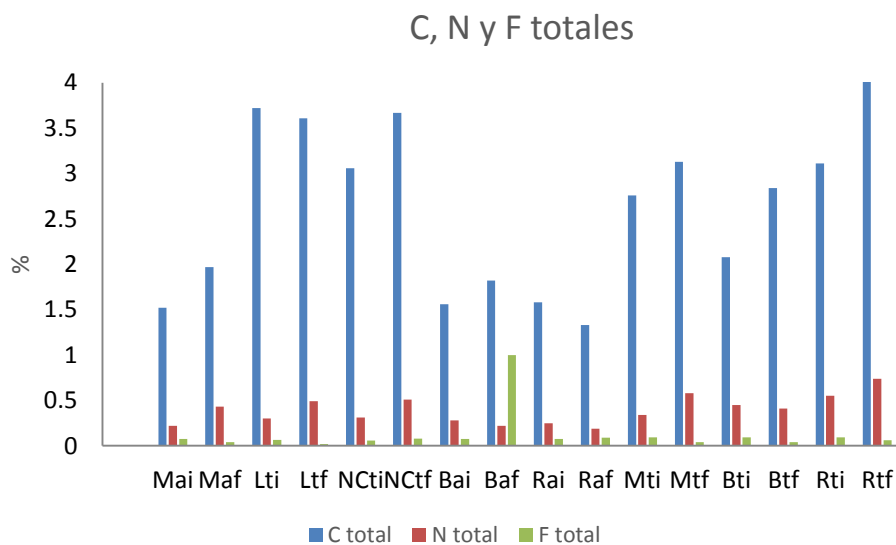


Figura 7.7. Porcentaje de C, N y F totales en las mezclas al inicio y final del experimento. i: inicio, f: final

7.2.3 Elementos traza en lixiviados

Se compararon los valores iniciales de metales de interés con los finales en lixiviados en cada mezcla en la tabla 7.8.

En ella se observa que los resultados de As, V y Zn muestran que, durante el establecimiento de las plantas, aumenta su concentración ligeramente, lo que podría indicar que se solubilizan con el tiempo y eso incrementa la disponibilidad de estos metales (fig. 7.8). Sin embargo, es posible que las concentraciones aumenten debido a la presencia de estos metales en el agua utilizada en riego, como se observa en el caso del arsénico, que no moviliza más que una fracción de la concentración que ingresa a través el agua. En el caso de las mezclas Ma, Ra y Ba, la fuente parece ser la composición mineralógica.

La concentración de vanadio en el caso de las mezclas puede deberse al origen mismo de los componentes minerales de estos tecnosoles, ya que no se observa su presencia en el caucho molido, evaluado individualmente, y tampoco el agua de riego es una fuente. Para este último, no hay legislación regulatoria de concentraciones en agua (fig. 7.9).

En ninguno de los casos se sobrepasan los límites permisibles de la legislación internacional para calidad de agua de consumo, ni de la mexicana para calidad de agua para riego. En el caso del zinc (que es el más abundante en el caucho molido) no se encuentra en cantidades importantes en la mezcla L. Incluso el agua utilizada para el riego de las columnas tiene una concentración mayor de este elemento. Esto podría indicar que el Zn contenido en las llantas trituradas no se está movilizando y que en realidad no se está lavando de la fracción mineral y orgánica con el riego, lo que significaría una reserva de este mineral (fig. 7.10).

Es importante notar que no se detectó la presencia de cadmio y plomo en lixiviados.

Tabla 7.8. Concentraciones de As, Cd, Pb, V, Z y P al inicio y final de los ocho meses y comparación con los valores permisibles para lixiviados y agua usada en riego, propuestos por la NOM- EM-034-FITO-2000, EPA en 2012, 2013, 2007 y ASTDR 2005

Mezcla	As		Cd		Pb		V		Zn		P	
	mg/L											
	i	f	i	f	i	f	i	f	i	f	i	f
Ma	<LD	0.019	<LD	<LD	<LD	<LD	0.037	0.092	0.113	0.084	1.54	0.91
Lt	<LD	0.037	<LD	<LD	<LD	<LD	0.033	0.047	0.199	0.122	0.444	0.197
NCt	<LD	0.021	<LD	<LD	<LD	<LD	0.034	0.064	0.229	0.072	0.247	0.443
Ba	<LD	0.045	<LD	<LD	<LD	<LD	0.031	0.048	0.08	0.184	1.047	1.425
Ra	<LD	0.027	<LD	<LD	<LD	<LD	0.034	0.042	0.123	0.095	1.756	2.207
Mt	0.035	<LD	<LD	10.619	<LD	<LD	0.031	0.023	0.151	0.019	1.103	0.524
Bt	0.041	<LD	<LD	7.015	<LD	<LD	0.043	0.020	0.3	0.092	1.168	0.532
Rt	0.019	<LD	<LD	12.589	<LD	<LD	0.031	0.024	0.056	0.149	2.036	1.437
Agua de riego	<LD	0.021	<LD	<LD	<LD	<LD	0.013	0.013	0.587	0.478	0.15	0.134

Límite permisible México** (mg/L)	0.2	0.05	5	-	10	-
Límite permisible EUA	0.001 ppm (EPA, 2013)	0.005 ppm (EPA, 2012)	0.015 ppm (EPA, 2007)	-	2-8 ppm (ATSDR, 2005)	-

** NOM-EM-034-FITO-2000. i: inicio, f: final

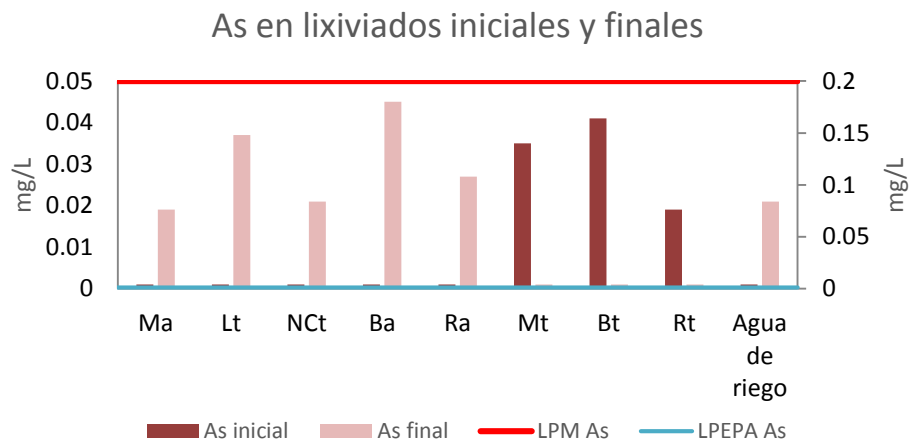


Figura 7.8. Concentración de arsénico en lixiviados iniciales y finales. LPM As: LMP de As según la NOM-EM-034-FITO-2000. LPEPA As: LMP de As según la EPA (2013)



Figura 7.9. Concentración de vanadio en lixiviados iniciales y finales. No hay límites permisibles

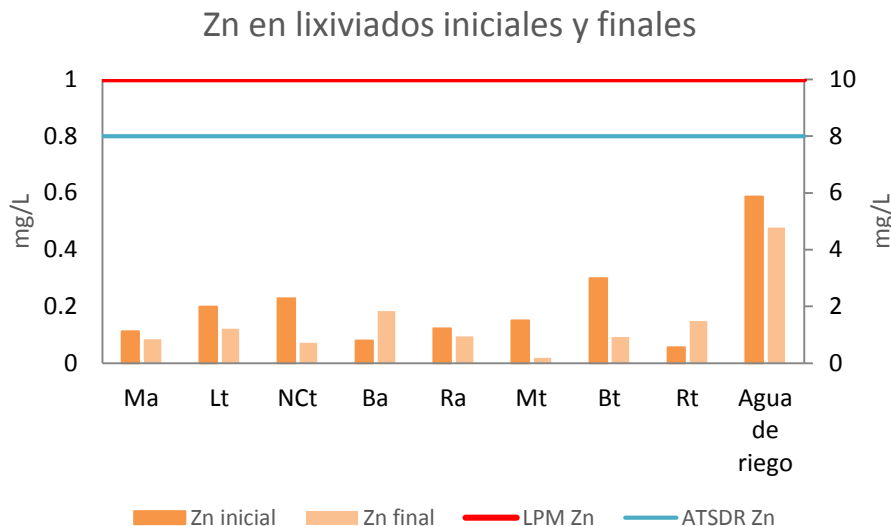


Figura 7.10. Concentración de zinc en lixiviados iniciales y finales. LPM As: LMP de Zn según la NOM-EM-034-FITO-2000. ASTDR: LMP de As según la ASTDR (2005)

7.2.4 Cambio en la concentración de iones mayores en lixiviados

Los iones mayoritarios en los lixiviados son indicadores de movilidad de elementos o disponibilidad de nutrientes para las plantas. Los iones se dividen en los aniones y cationes. En el primer grupo los iones mayores son HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , y SO_4^{2-} . En el grupo de los cationes, los mayores son Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ . Los tres primeros se consideran esenciales para el crecimiento de las plantas. En la tabla 7.9 se observa que ninguna de las mezclas se detectaron fosfatos PO_4^{3-} . Sin embargo, en el análisis de elementos traza (Tabla 7.7) se muestra que sí existe fósforo total en ellas; el mayor contenido lo presentan las mezclas Mt, Bt, Rt con casi 1000 ppm, consistentemente, en el análisis de metales en lixiviados iniciales y finales (Tabla 7.9). Son estas mismas mezclas las que presentan la mayor cantidad. Hay un aumento de fósforo total en los lixiviados iniciales y finales de todas las mezclas, salvo la mezcla Ma y Lt. En cuanto al análisis de iones en lixiviados, existen errores del balance iónico $>5\%$, lo que indica error analítico o cambios en las condiciones de equilibrio de las muestras. Ya que los análisis se realizaron bajo las mismas condiciones analíticas, se asume que hay posibles procesos de precipitación. Las figuras 7.13 y 7.14 muestran los índices de precipitación en lixiviados iniciales y finales. En todos los casos hubo un aumento de pH entre el inicio y el final del experimento.

El aumento de pH causa un desequilibrio en el carbonato, lo que implica la precipitación de calcita (figs. 7.13 y 7.14) y, como resultado, un descenso en las concentraciones de Ca^{2+} y HCO_3^- (Shaver, 1993).

Tabla 7.9. Iones mayores en lixiviados iniciales y finales

Muestra	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Error de balance iónico
	meq/L									
Mai	2.62	11.82	18.78	10.85	8.49	0.32	7.63	14.58	8.69	-5.21
Maf	2.14	4.37	2.28	4.35	4.59	<LD	2.30	3.65	1.71	-3.47
Lti	2.25	3.34	0.68	7.11	4.22	<LD	1.19	5.30	1.57	-4.24
Ltf	3.64	6.14	5.56	8.91	5.15	<LD	1.71	5.79	1.27	-27.08
NCti	3.36	0.00	1.98	4.56	3.73	<LD	1.75	4.35	2.53	11.02
NCtf	1.76	2.16	2.01	5.44	4.13	0.01	1.47	3.40	1.40	-4.42
Bai	3.54	0.00	19.31	9.40	6.52	<LD	8.20	13.72	9.07	7.55
Baf	6.34	8.28	13.34	6.15	6.69	<LD	7.18	10.35	7.08	-4.29
Rai	5.08	10.92	18.12	14.06	9.42	<LD	7.59	16.85	9.50	-5.26
Raf	14.17	16.38	36.55	22.13	11.92	0.03	11.83	18.91	8.37	-27.20
Mti	2.59	53.63	82.14	25.34	31.19	0.88	19.67	66.43	22.92	-7.42
Mtf	<LD	33.84	23.93	16.64	26.31	<LD	11.25	42.91	11.34	-6.43
Bti	3.19	73.34	107.18	29.57	41.09	0.82	22.30	94.97	23.13	-7.83
Btf	<LD	43.44	115.45	17.85	32.15	0.21	27.14	59.32	32.39	-9.15
Rti	1.67	20.84	32.26	9.36	12.20	0.57	12.54	19.14	12.65	-5.81
Rtf	<LD	41.09	83.11	14.02	31.07	<LD	14.51	54.70	14.05	-9.46
Agua de riego inicial	2.49	1.12	0.44	0.92	1.47	<LD	0.15	0.96	1.76	-6.75
Agua de riego final	2.19	1.08	0.52	0.79	1.37	<LD	0.14	0.87	1.65	-6.46

i: inicio, f: final. <LD: menor al límite de detección

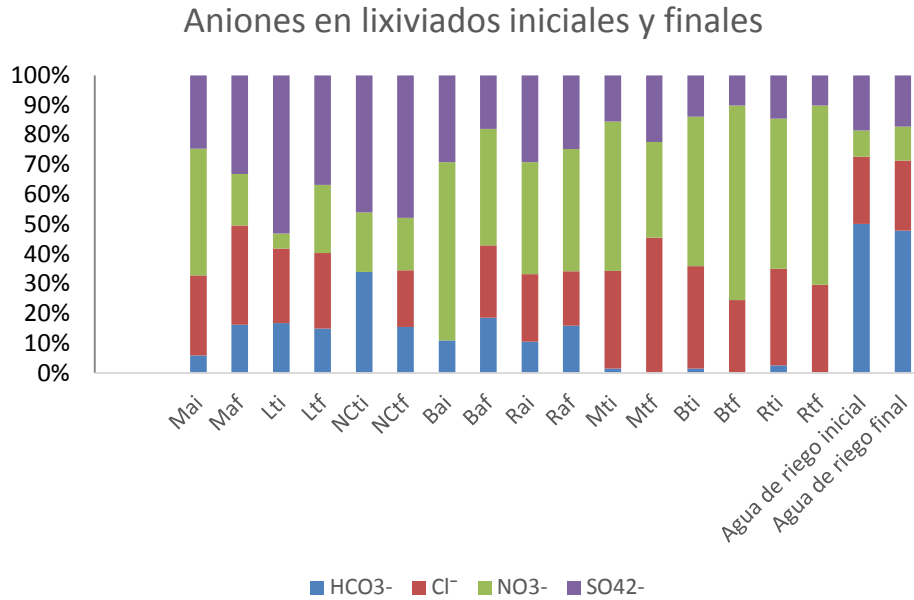


Figura 7.11. Comportamiento de los aniones mayores en los lixiviados al inicio (i) y al final (f)

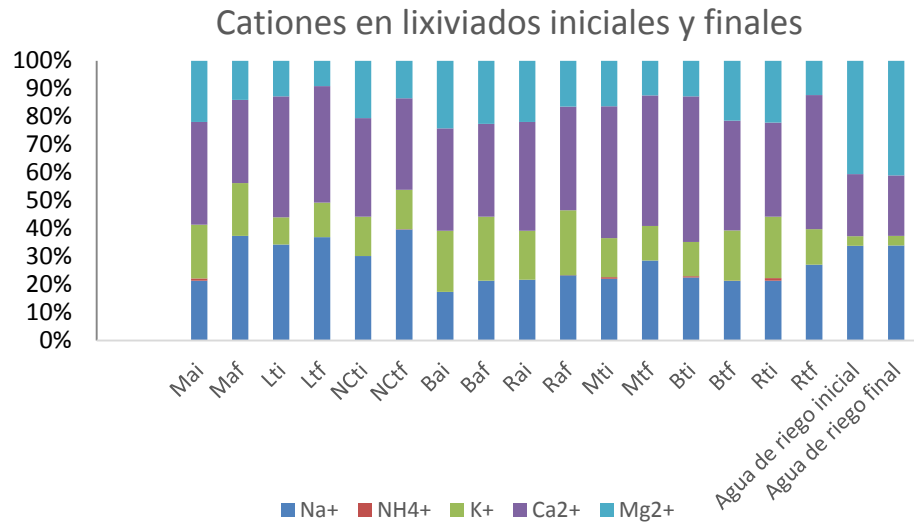


Figura 7.12. Comportamiento de los cationes mayores en los lixiviados al inicio (i) y al final (f)

La formación de estos minerales secundarios puede significar una reserva de Ca en los sustratos. Sin embargo, la presencia y actividad de las plantas acondiciona los materiales, resultando en una posible disolución paulatina de los minerales precipitados, llevándolos a la fase disponible.

Es importante notar que los índices de saturación no incluyen especies formadas de fósforo porque no se detectó el ion fosfato. Sin embargo, eso no significa que no se puedan estar formando precipitados de calcio y fósforo, que ocurren comúnmente cuando el pH tiende a la alcalinidad, particularmente porque estos compuestos suelen ser insolubles (Munera y Meza, 2015; Rojas, 2006).

Para ilustrar lo anterior, las figuras 7.15 y 7.16 muestran la incorporación de fósforo total en los lixiviados iniciales y finales. En ellas se muestra que hay precipitación de las siguientes especies de fosfato de calcio en todas las mezclas al inicio (salvo en Lt y Nct y en el agua): $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ en diferentes formas, $\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ fosfato de calcio trihidratado y $\text{CaHPO}_4(\text{s})$ fosfato dicálcico en forma sólida. Respecto a lo anterior, es necesario indicar que el índice de saturación es tan cercano a cero en caso de la mezcla Lt y Nct, que podría interpretarse como un error en el balance. En el caso de los lixiviados finales, todas las mezclas presentan precipitación de las especies antes mencionadas.

La presencia de calcio y el hecho de que las mezclas tienden a pH alcalino evitan que se detecte el fosfato por cromatografía.

Índices de saturación en lixiviados iniciales

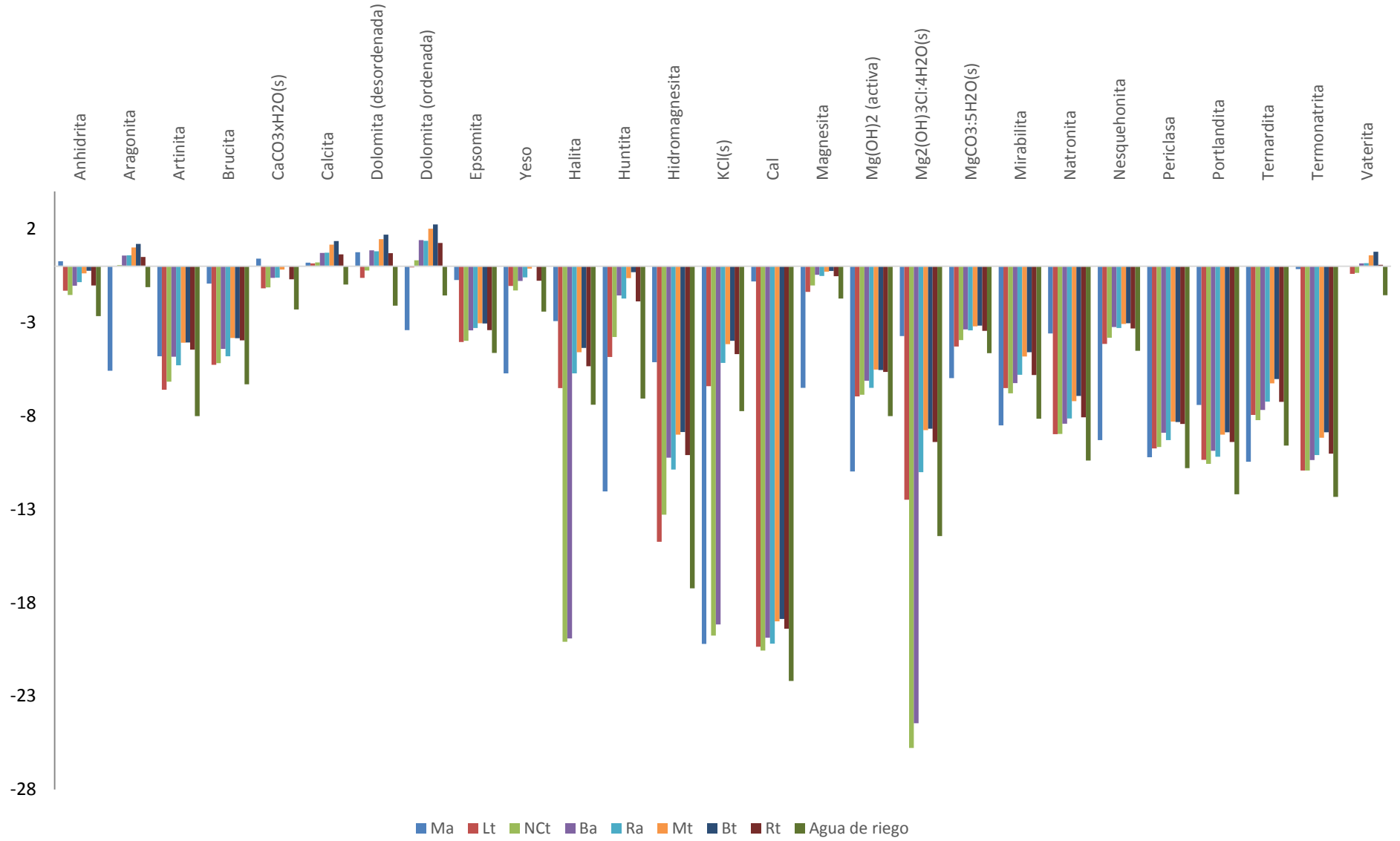


Figura 7.13. Índices de saturación en lixiviados iniciales

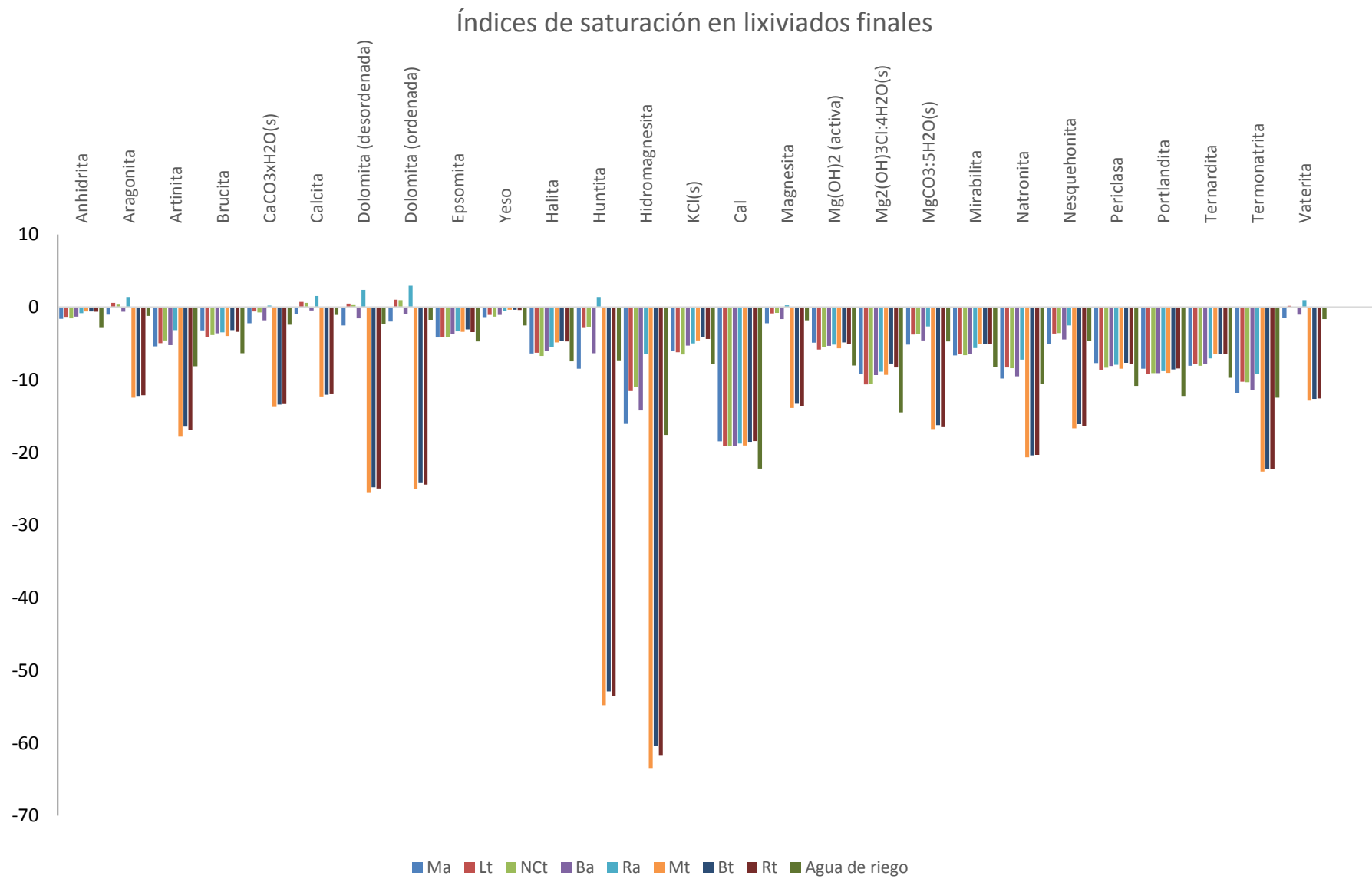


Figura 7.14. Índices de saturación en lixiviados finales

Índices de saturación con fósforo en lixiviados iniciales

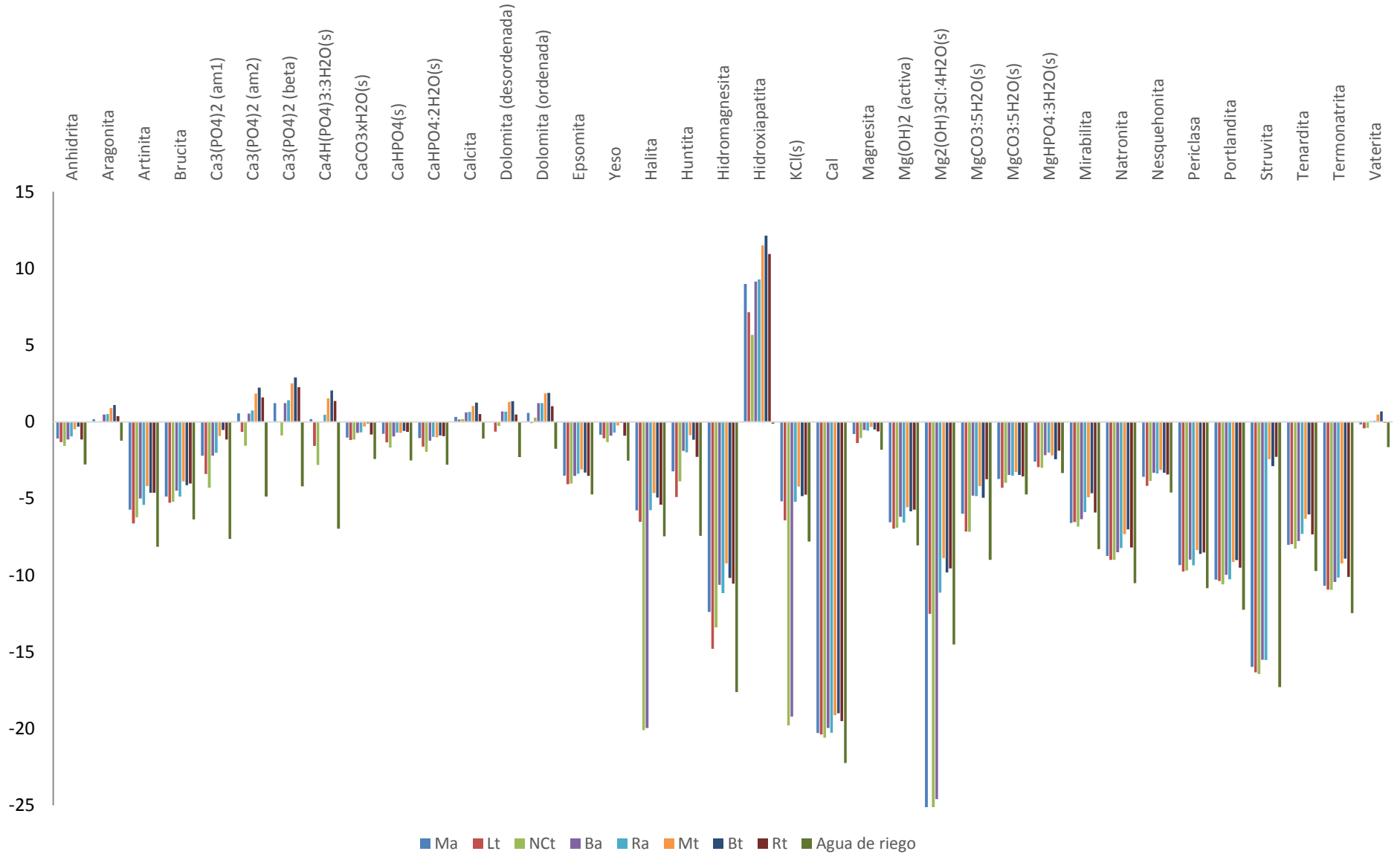


Figura 7.15. Índices de saturación con fósforo total en lixiviados iniciales

Índices de saturación con fósforo en lixiviados iniciales

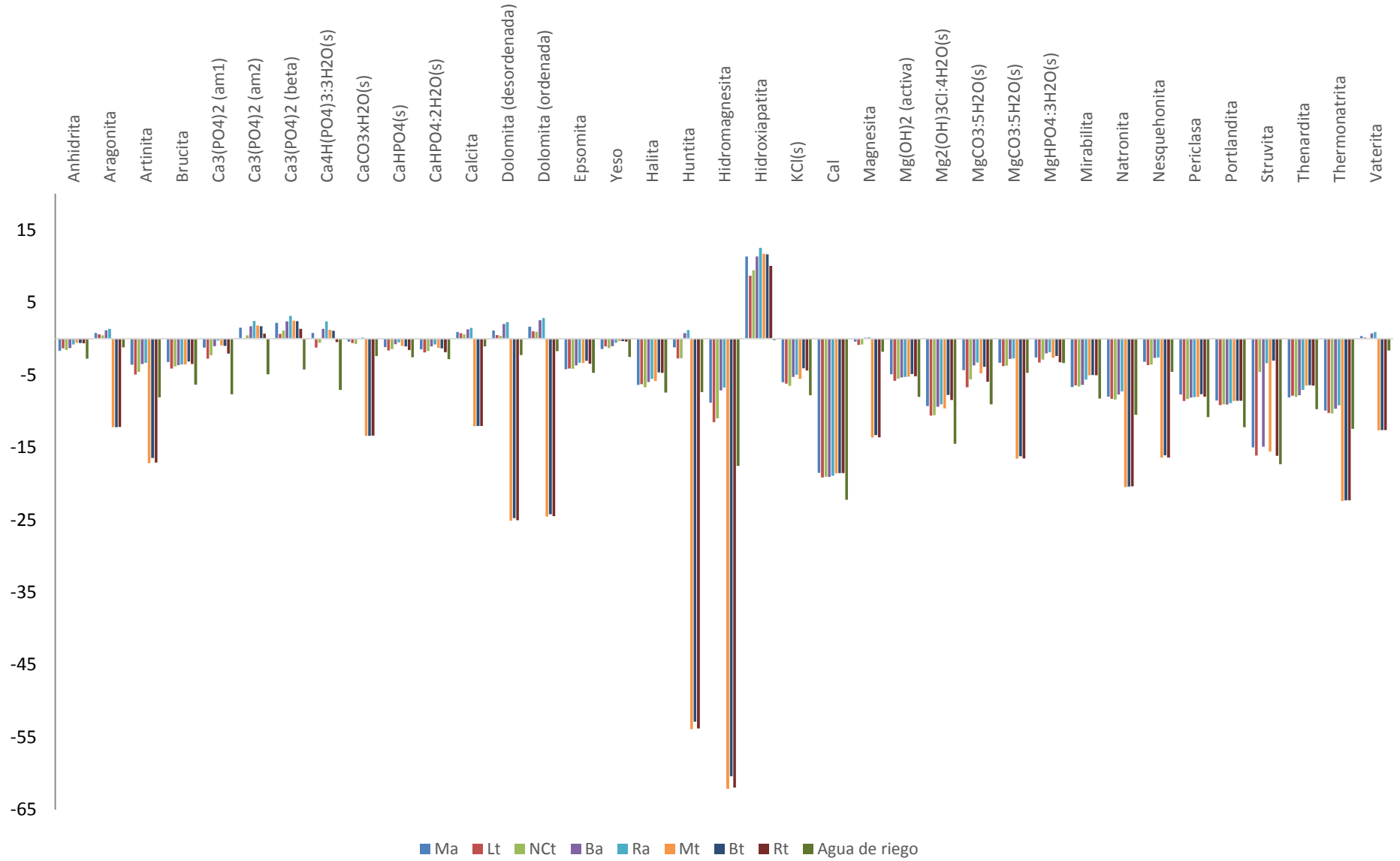


Figura 7.16. Índices de saturación con fósforo total en lixiviados finales

7.3 Variables físicas

7.3.1 Retención de humedad

Se graficaron las curvas de retención de humedad (fig 7.17) con el fin de comparar los desempeños de las mezclas con relación al almacenamiento de agua y la disponibilidad para las plantas. En la figura 7.18 se muestran los resultados aún con las plantas de jitomate.

La mayor disponibilidad de agua la presenta la mezcla Lt, por lo que se infiere que la adición de caucho molido modifica la textura y, en consecuencia, el tamaño de poros.

Los menores resultados de agua disponible para las plantas los presentan las mezclas tamizadas (Mt, Bt, Rt) y la mezcla con polvo de café y naranja (NCt). Esto se debe, posiblemente, a que el tamaño de partículas genera poros muy pequeños que retienen el agua fuertemente, evitando la disponibilidad para las plantas.

Tabla 7.10. Parámetros de la ecuación de Van Genuchten y parámetros de disponibilidad de agua

Mezcla	θ_s	θ_r	α	n	R^2	CC	CC *	PMP*	ADP
						%	%	%	%
M	0.282	0.09021	0.093	1.765	0.962	29	17	9	8
L	0.336	6.97E-06	0.0469	1.244	0.975	32.7	28	12	16
NC	0.290	8.54E-02	0.062	2.226	0.932	25.2	14	1	13
B	0.212	4.53E-06	0.143	1.439	0.971	26.3	17	9	8
R	0.248	3.53E-06	0.033	1.744	0.975	26	11	2	9
Ma	0.347	1.50E-01	0.111	3.866	0.981	30	19	6	13
Ba	0.308	0.1002	0.057	1.669	0.971	29.5	23	11	12
Ra	0.249	3.85E-06	0.178	1.317	0.950	30.2	22	14	8

θ_s : humedad a saturación. θ_r : humedad residual. α y n: constantes. CC: capacidad de campo. PMP: punto de marchitez permanente. ADP: agua disponible para las plantas. *calculada con Van Genuchten

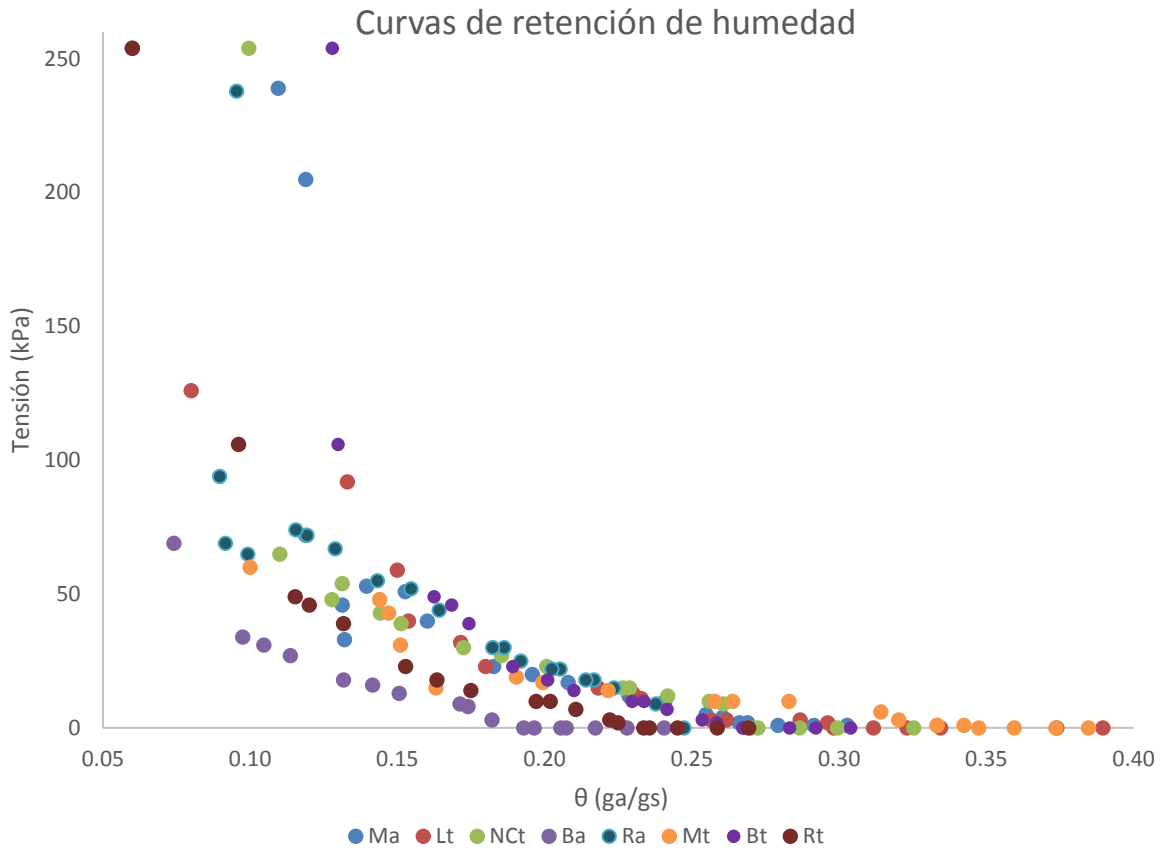


Figura 7.17. Curvas de retención de humedad

En la figura 7.18 vemos que el comportamiento entre las mezclas Lt y Ma con las plantas de jitomate son afines, diferenciándose de Nct y Mt, que mantienen tendencia similar. Es importante recordar que el tamaño de partícula de Lt y Ma es superior a 3 mm, mientras que en Mt y Nct es inferior. Esto implica que el agua retenida en mesoporos es mayor en el caso de estas dos últimas, probablemente. Mientras que, para Lt y Ma, poros más grandes fomentan la pérdida de humedad. Es importante recordar que la absorción de agua a través de las raíces implica una aceleración de la pérdida de humedad en el sustrato.

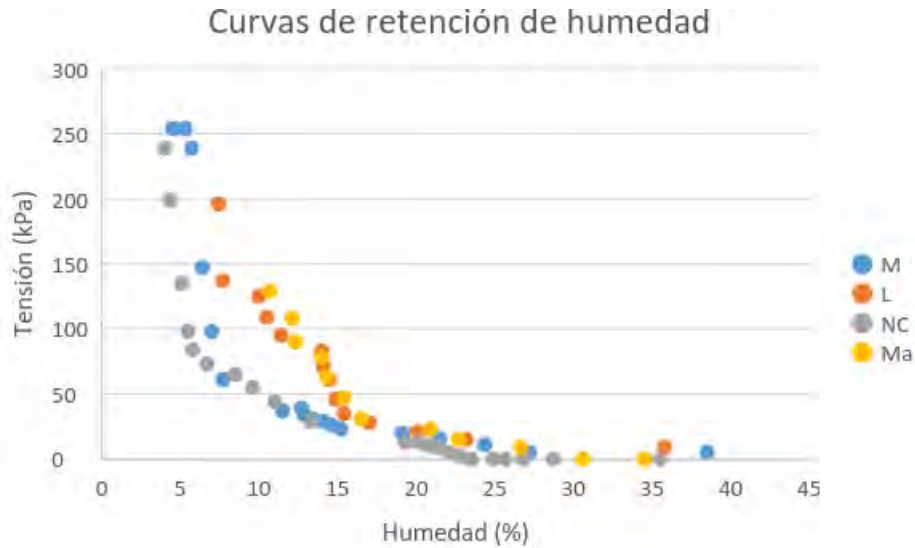


Figura 7.18. Curvas de retención de mezclas con plantas de jitomate

7.5.2 Pérdida de volumen

En la figura 7.19 se observa la disminución del volumen promedio en cada tratamiento en comparación con el volumen original (4712.3 cm³). La disminución en el volumen más representativa se presenta en el caso de la mezcla con residuos de café y naranja. Esto se debe, posiblemente, al tamaño de partícula de los desechos de café.

La menor pérdida se presenta en el caso de la mezcla con llanta, lo que implicaría un mejoramiento de las características físicas del sustrato; hay que resaltar que la pérdida es menor incluso comparando con Ma, Ra y Ba que son la mezcla sin tamizar, es decir, con tamaño de partícula mayor.

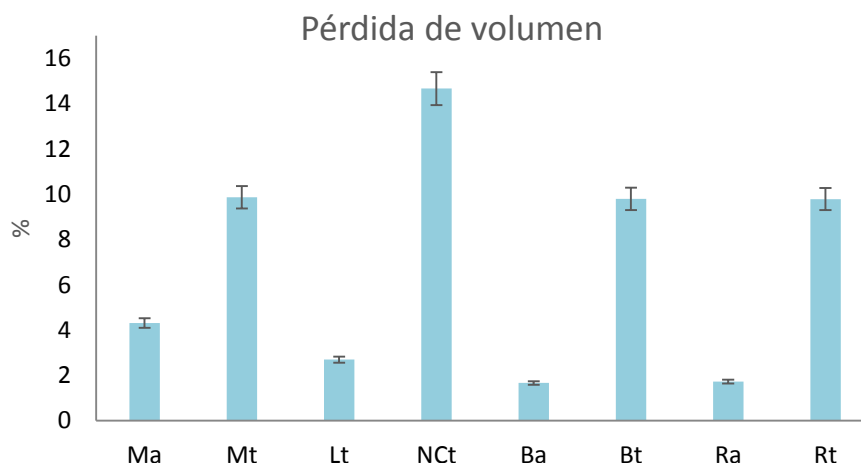


Figura 7.19. Porcentaje de pérdida de volumen total después de ocho meses por cada mezcla. a: condicionado. t: tamizado

7.4 Desarrollo vegetativo

7.4.1 Sobrevivencia

Se colocaron en almácigo 30 semillas de jitomate por cada mezcla (Ma, Lt y NCt) e igualmente 30 semillas de verdolaga para la mezcla Ra. Al cabo de unos días se evaluó la cantidad de semillas germinadas y finalmente la sobrevivencia de cada individuo (Tabla 7.11). Estos mismos se utilizaron en el trasplante para las columnas experimentales.

Tabla 7.11. Sobrevivencia de plántulas en almácigo por especie y mezcla

Especie	Mezcla	Días de germinación	Semillas germinadas	Sobrevivencia (individuos)	Sobrevivencia (%)
Jitomate	Ma	10	18	18	60
	Lt	10	13	13	43.3
	NCt	9	17	17	56.7
Verdolaga	Ra	6	25	22	73.3

La tabla 7.11 indica que en un principio existe la viabilidad de las semillas en cada una de las mezclas por sí mismas. Entre las mezclas Ma y Lt no existen diferencias entre los días de germinación, aunque sí en la sobrevivencia de individuos, con un

17% menos en el último. En el caso de Nct tampoco hay diferencias distinguibles en los días de germinación y en la supervivencia, en comparación con Ma.

Para las verdolagas se logró una supervivencia superior que en el jitomate con poco más del 73% de individuos en la mezcla Ra.

Resulta normal que no se logre la germinación en algunas semillas. Sin embargo, es de notarse que sólo en uno el caso de la mezcla L se sobrepasa una mortalidad del 50%; lo que resulta, posiblemente, en un ambiente más desfavorable que en las otras mezclas.

La diferencia en el porcentaje de supervivencia entre las especies, puede deberse a las características propias de las mismas. Siendo la verdolaga una especie de establecimiento rápido.

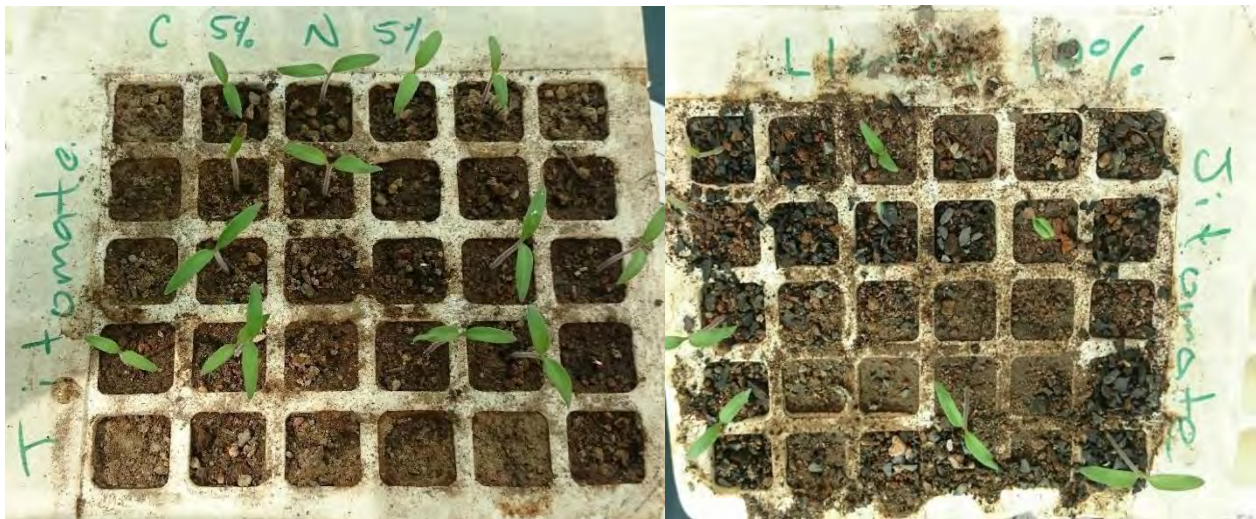


Figura 7.20. Germinación de semillas de jitomate en mezcla CNT (izquierda) y mezcla Lt (derecha)

7.4.2 Altura y diámetro del tallo

Se muestran a continuación los resultados del crecimiento de jitomate a lo largo de ocho meses en las distintas mezclas y los cambios en el diámetro del tallo a nivel de la base.

Se observa que el crecimiento más rápido y más constante se dio en la mezcla Ma, alcanzando casi 80 cm. Para Lt el crecimiento fue más lento, pero igualmente constante, estabilizándose hacia el mes seis; se llegó a los 70 cm. Nct inició con un crecimiento muy por debajo de los otros dos hasta los tres primeros meses, remontando hacia el final y quedando a la par de los de la mezcla Ma, mientras que

la mezcla Mt tuvo el peor desempeño de los cuatro durante el experimento. La composición de Ma y Mt es la misma, pero varía el tamaño de partícula. En estos dos tenemos el mayor crecimiento y el más pobre, respectivamente (fig. 7.19).

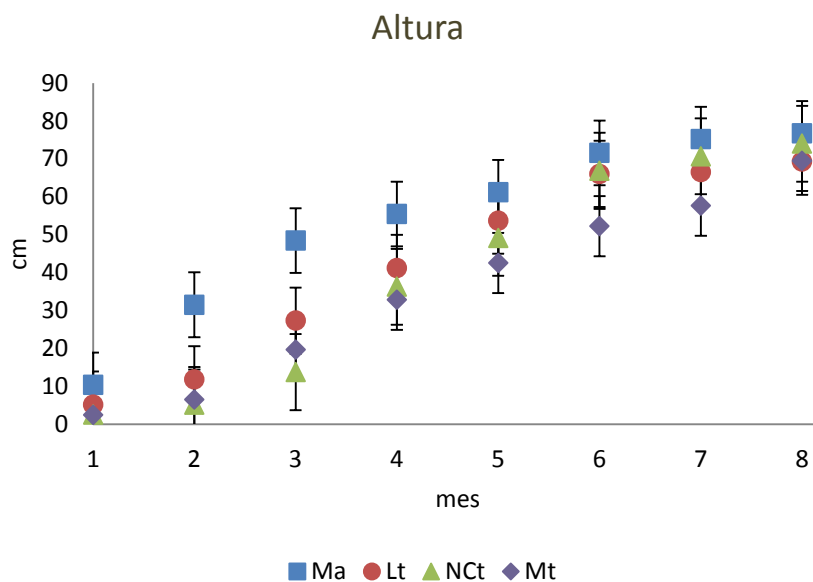


Figura 7.21. Altura de plantas de jitomate en cada mezcla

En la gráfica 7.20 se observa un comportamiento similar al de la altura, Ma muestra el engrosamiento más rápido desde el inicio hasta el final, con casi siete milímetros. La mezcla Mt igualmente presentó el peor rendimiento en los primeros meses, aunque se equilibró con el resto hacia el mes seis. Las plantas en la mezcla Nct tuvieron un engrosamiento del tallo menor que las de otras mezclas, aunque se normalizó con el resto hacia el mes cuatro.

Al final, las plantas de la mezcla Ma tuvieron el mayor engrosamiento, seguido por Lt y Nct, que tuvieron un crecimiento prácticamente igual hacia los últimos meses.

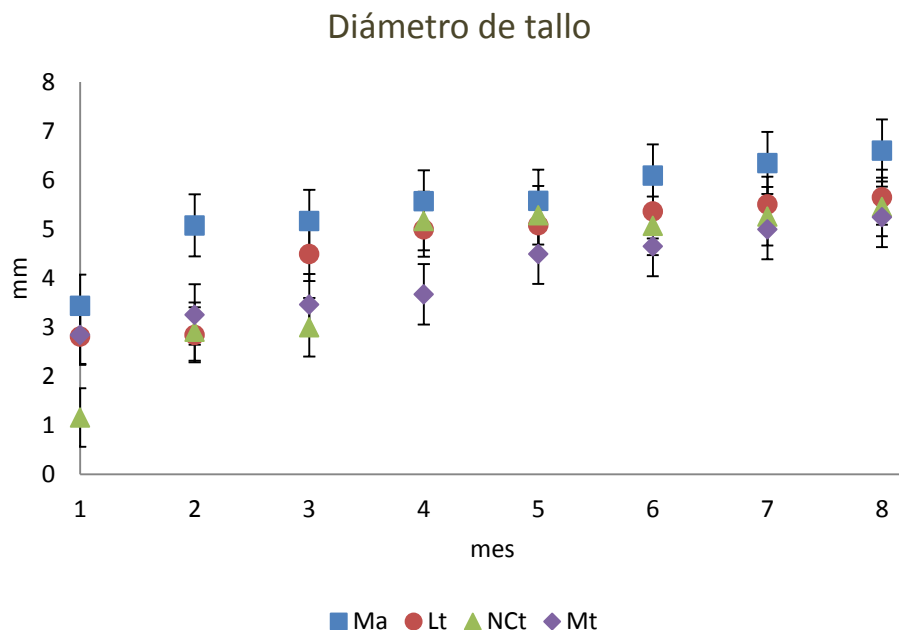


Figura 7.22. Grosor del tallo a la altura de la base por cada mezcla

7.4.3 Número y peso seco de frutos

Se consideró utilizar el número de frutos para conocer las diferencias en la eficiencia de producción de frutos de acuerdo al tratamiento (fig. 7.22). Se obtuvieron los datos del peso seco de cada uno de los frutos producidos en cada una de las mezclas y se compararon con los producidos por plantas de jitomate de la misma edad sobre un vertisol, para evaluar la productividad comparando con un suelo natural (fig. 7.23).



Figura 7.23. Frutos de la mezcla Lt

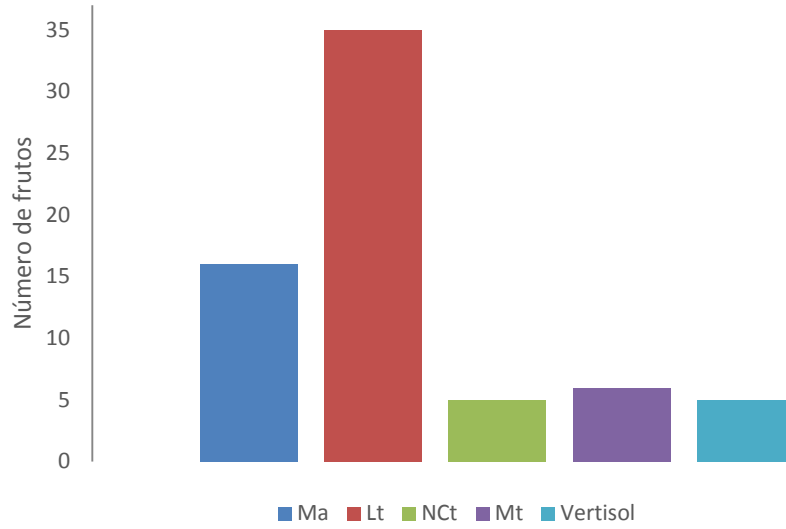


Figura 7.24. Número de frutos totales al cabo de ocho meses de crecimiento en cada mezcla y en un vertisol

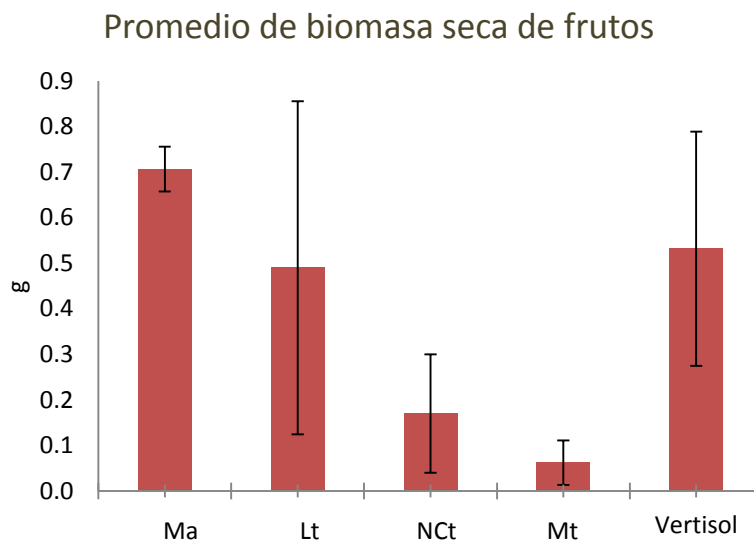


Figura 7.25. Peso promedio de la biomasa seca de frutos de jitomate en cada mezcla y en un vertisol. Se muestra la SD

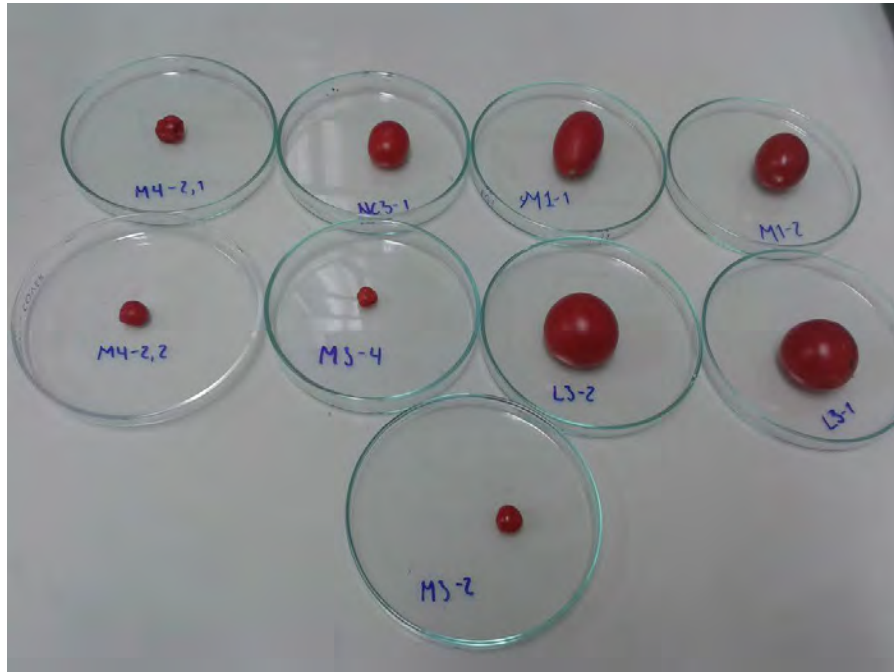


Figura 7.26. Frutos de las mezclas Ma y Lt para obtención de biomasa seca

En cuanto a la cantidad de frutos es predominante el del caso de la mezcla Lt con caucho molido con 35 jitomates en total hasta finalizar los ocho meses del crecimiento, seguido con 16 por la mezcla Ma, que no tiene mejoradores. Es de notar que, bajo condiciones de un vertisol natural (V), el número de frutos totales se iguala con el del menor desempeño de las mezclas que presenta la mezcla NCT, con restos de café y naranja. Hay diferencias de poco más del 85% entre la mezcla con mayor cantidad de frutos producidos (Lt) y la de menor (NCT), incluyendo al suelo natural que presenta el mismo rendimiento que NCT.

Aunque la producción en número es ampliamente dispar, la acumulación de biomasa de cada fruto no presentó diferencias entre las mezclas Ma, Lt y el vertisol. No obstante, es necesario mencionar que, tanto en el número de frutos como con la producción de biomasa, es el caso de NC el que muestra los peores resultados.

En cuanto a los frutos, la ocurrencia es distinta, pues NCT se produjo la menor cantidad de biomasa, mientras que para Ma y Lt no hay diferencias. En comparación con un suelo natural, estas dos últimas presentan, incluso, un mejor rendimiento.

En la mezcla Mt la producción de frutos fue la más disminuida en cuanto a tamaño, mientras que superó por un fruto a la mezcla NCT.

7.4.4 Biomasa seca de plantas de jitomate

A pesar de que, en un principio, el crecimiento más lento fue el de la mezcla NcT, es el que suma en la totalidad la mayor producción de biomasa, seguido por M y, finalmente, la mezcla Lt. Este comportamiento se repite en el caso de las hojas y los tallos, difiriendo en las raíces, donde se colocan como NcT, Lt y Ma en última instancia.

En cuanto a los frutos, la ocurrencia es distinta, pues NcT se produjo la menor cantidad de biomasa, mientras que para Ma y Lt no hay diferencias. En comparación con un suelo natural, estas dos últimas presentan, incluso, un rendimiento similar. En todos los casos, las plantas de la mezcla Mt presentaron el menor rendimiento en cuanto a acumulación de biomasa (fig. 7.25).

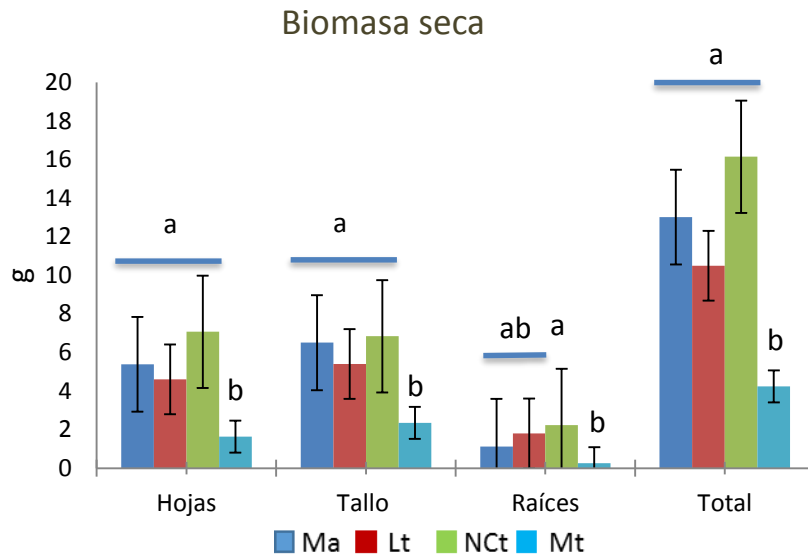


Figura 7.27. Biomasa seca total y de hojas, tallo y raíces por cada mezcla y SD

La ANOVA que se aplicó a la acumulación de biomasa de hojas ($F(3,18) = 6.98$, $p = 0.00259$), tallo y total indican que sólo hay diferencias en el caso de la mezcla Ma. En cuanto a las raíces no hay diferencias entre la mezcla Ma y Mt, mientras que Ma, Lt y NcT no son estadísticamente distintos en ninguno de los casos.

7.6.5 Metales en vías aéreas y raíces de plantas

Hay una fracción de arsénico biodisponible que se concentra únicamente en las raíces de las plantas, la mayor concentración aparece sobre todo en la mezcla NCt. En cuanto al cadmio, hay presencia en todos los tejidos de las plantas, en general se concentra más en las raíces. Este comportamiento se repite en concentraciones 24 veces mayores para el cromo. El níquel se distribuye de distinta según las mezclas: en la mezcla Ma, la mayor concentración se observa en las hojas, mientras que eso ocurre en los tallos de la mezcla Lt (hasta 5 ppm más que en el caso anterior) y en las raíces de la mezcla NCt. Hay retención de plomo en los tejidos de las plantas, en especial en las raíces, esto ocurre en especial en la mezcla Lt, en comparación con las mezclas Ma y NCt, la primera retiene hasta 11 y 6 ppm más, respectivamente. Este comportamiento se repite para el vanadio. En cuanto al zinc, la mayor concentración se presenta en las raíces de las plantas de Ma y NCt y en los tallos de la mezcla Lt. Lo anterior se despliega en la tabla 7.12.

Tabla 7.12. Metales totales en hojas, tallos y raíces por mezcla

Mezcla	Muestra	As	Cd	Cr	Ni	Pb	V	Zn
		ppm						
Ma	Hojas	<LD	0.277	1.98	2.721	1.406	0.658	33.395
	Tallos	<LD	0.227	1.276	1.187	0.977	0.476	74.948
	Raíces	1.446	1.159	19.046	2.101	5.6	7.104	79.132
Lt	Hojas	<LD	0.287	2.763	1.941	7.699	0.892	56.543
	Tallos	<LD	0.196	1.674	4.342	0.82	0.674	86.869
	Raíces	2.584	1.004	24.686	0.335	17.134	6.135	68.571
NCt	Hojas	<LD	0.338	2.864	0.84	3.574	0.825	42.757
	Tallos	<LD	0.158	1.246	1.158	1.017	0.365	46.377
	Raíces	4.632	1.827	17.021	2.096	11.024	14.806	44.84
Mt	Hojas	<LD	0.352	10.971	7.503	3.452	*	51.284
	Tallos	<LD	0.305	16.009	10.113	1.029	*	51.859
	Raíces	<LD	1.056	169.389	94.696	12.596	*	71.890

<LD: Menor al límite de detección. * No analizado

Capítulo 8

Discusión

8.1 Caracterización de materiales

Las densidades reales altas del tepetate y de los residuos de demolición (2.3 y 2.6 g/cm³, respectivamente) mantienen cercanos a la media de otros materiales de desecho de construcción, como el ladrillo rojo con 2.36 g/cm³ (Molineux *et al.*, 2009). Sin embargo, la densidad aparente es menor en el caso de los materiales aquí empleados hasta en 0.6 g/cm³ en comparación con otros estudios de materiales similares (Molineux *et al.*, 2009), lo que implica una mejor aireación y porosidad de las mezclas y, en última instancia, una disminución de la carga neta del sustrato sobre la losa de los edificios.

Algunos estudios y reportes muestran que los materiales minerales utilizados, comúnmente tepojal, tezontle, arcillas expandidas, vermiculita, perlita poseen una densidad de más de 1.2 g/cm³ con porosidades de hasta 48% (Eksi & Rowe, 2016), en comparación, los del caucho molido tienen una densidad de 1.09 g/cm³, lo que lo equipara a los compuestos orgánicos usados en este estudio (café y naranja).

Por otro lado, algunos desechos orgánicos utilizados en la construcción de AV, como peatmoss, restos de poda, fibra de coco, tierra negra y de hoja, entre otros poseen una densidad de entre 1.1 (Rokia, 2014; Carson, *et al.*, 2012) hasta 1.5 g/cm³ (Vijayaraghavan & Raja, 2014). La composta y los residuos de café y naranja añadidos a estas mezclas tienen entre 1.09 y hasta 1.7 g/cm³. Es decir, se encuentran entre los valores promedio reportados.

Lo anterior indica que el caucho molido, la composta de la UNAM, naranja, café y la combinación de estos últimos, poseen propiedades deseables para la implementación de azoteas verdes. Las más destacables son una alta porosidad (FFL, 2008), densidad real y aparente bajas.

En ninguno de los extractos de saturación de los materiales se encontraron concentraciones importantes de metales que reportar, salvo altas concentraciones de estroncio (Sr) sobre todo en el tepetate. No hay estudios concretos sobre la presencia de metales en tepetate. Acerca de los iones mayores, el tepetate posee

altas concentraciones de carbonatos, en concordancia con otros estudios reportados (Gutiérrez y Ortiz, 1992). La composta muestra un enriquecimiento en nitratos, cloro y magnesio, independientemente de su origen este es un comportamiento normal (Vicencio, *et al.*, 2011). Los residuos de demolición y otros residuos de construcción han reportado altas concentraciones de sulfatos (Townsend, *et al.*, 1999)

Es de resaltar el alto pH (11.2) que presentaron los residuos de demolición al inicio, que se correlaciona con altas concentraciones de iones de Na^+ y Ca^{2+} en solución. Esto podría deberse a los componentes individuales del mismo (blocks, concreto, adocreto y tabiques, entre otros. Rokia (2014) también reportan pH superior a 10 para concreto, que es un material similar.

Se arroja en este estudio que el caucho molido, composta, café, naranja, tepetate y residuos de demolición están dentro de los rangos establecidos por la FFL (2008) de porosidad de entre 20 y 65% empleados para la construcción de AV. Sin embargo, en los requerimientos de pH que establece esta misma institución, únicamente el tepetate, composta y caucho molido entran en los rangos válidos de cercanía a la neutralidad. La combinación de la alta acidez del café y la naranja con los residuos de demolición, podrían significar el cumplimiento de las recomendaciones para sustratos de AV. Así lo demuestra un estudio similar en donde la adición de una enmienda orgánica de peatmoss a residuos de block de construcción (Bisceglie *et al.*, 2014). Sin embargo, lo más importante es valorar las características de las mezclas, las cuales se modifican de acuerdo a las proporciones utilizadas.

8.2 Caracterización de las mezclas

Las densidades de las mezclas están fuertemente influidas por el tamaño de partícula de las mismas y los componentes orgánicos añadidos. Así se muestra en la tabla 7.5, donde se comprueba que las menores densidades reales y aparentes son las correspondientes a las mezclas Lt y Nct, siendo Lt la de densidad real menor con 2.04 g/cm^3 seguida de Nct con 9% más, dejando en última instancia a las mezclas Mt, Bt, Rt, cuyas granulometrías son $<3 \text{ mm}$ y aumentando su densidad en un 18.13%. Lo contrario ocurre con la densidad aparente: la mezcla Lt es menor que Nct. Esto se debe a la ligereza de los compuestos orgánicos que conforman a la última.

La porosidad de las mezclas cumple con lo establecido en la FFL (2008), quedando en un punto intermedio entre 20 y 65%. La mayor porosidad la presenta la mezcla Nct, que está compuesta por 29% de MO en conjunto con la composta y los residuos de café y naranja, lo que disminuye por mucho su DA; naturalmente, las

mezclas con granulometría menores (Mt, Bt, Rt) presentan hasta 22% menos porosidad.

En cuanto a la caracterización química, vemos que el Zn es el elemento más abundante en el caucho molido con una concentración de casi 1000 ppm, otros metales importantes se encuentran en bajas concentraciones, como Cd y V están por debajo de los límites de detección, Fe con casi 10 ppm, Ni con poco más de 0.5 ppm y Pb, con casi 1 ppm. La concentración de Zn mayor coincide con la mezcla Lt, que es la adicionada con caucho molido.

Debido a que en este estudio se utilizaron plantas comestibles, es necesario conocer los metales totales de cada mezcla, para así asegurar la inocuidad de los frutos. La norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 establece especificaciones mínimas de fertilidad, toxicidad y clasificación de suelos. En todos los casos, en comparación con la norma, no se sobrepasan los límites recomendables y metales como Cd, Pb y Ni, caen dentro del rango de valores normales para suelo (0.35, 35, 50 mg/kg o ppm, respectivamente). Al mismo tiempo, se alejan de las concentraciones peligrosas, cuyos rangos para los mismos metales son: 3-5, 100-300 y 100 mg/kg. Por otro lado, la NOM-EM-034-FITO-2000 establece otras concentraciones para suelos de vocación agrícola, mismos que no se sobrepasan.

Los límites permisibles de metales en suelo de las normas mexicanas no se sobrepasan en ninguna de las mezclas. Debido a lo anterior, las concentraciones de metales considerados peligrosos (As, Cd, Pb, Ni, Zn) en lixiviados y la solución del suelo deben ser menores a los LP establecidos en aguas y los metales que pudieran estar disponibles para las plantas a través de la solución, no son motivo de alarma.

8.2.1 Comportamiento químico de las mezclas en el tiempo e iones en lixiviados

En ninguno de los casos se cumplen las recomendaciones de la FFL (2008) para el pH de sustratos en AV, que se acercan a la neutralidad, salvo para las mezclas Lt y NCt, mientras que el resto tienden a la basicidad, debido a sus componentes únicamente de residuos de demolición (alcalinidad de pH 11.4), sin otras enmiendas además de la composta (pH 4.3).

El pH de la solución de las mezclas tendió a la alcalinidad en los primeros meses. Consistentemente con las hipótesis, los menores pH los presentó la mezcla NCt, que fue adicionada con café y residuos de naranja; sin embargo, hacia el final del experimento presenta un repunte hacia el pH 8, este mismo comportamiento se observa con el resto de las muestras. A pesar de la variabilidad entre los lixiviados recolectados a lo largo del experimento, se regularizaron todos los pH hacia 8. Las

mezclas que tenían verdolaga establecida (Ra y Rt) mostraron comportamientos similares a las otras mezclas, a pesar de haber perdido la cobertura aproximadamente tres meses después de iniciado el experimento. Durante el experimento hubo desfases en el riego mensual, es decir, que se adelantaron y retrasaron los eventos de riego en algunas ocasiones, por lo que las tendencias del pH podrían tener fluctuaciones asociadas a ello.

Los últimos pH medidos en los lixiviados de las mezclas están dentro de los rangos recomendados (6-8.5) por la FFL (2008). Esta tendencia a la disminución del pH de la solución de las mezclas muestra una mejoría respecto al inicio, esto podría estar asociado al acondicionamiento de las mezclas a través del tiempo, que podría estar ligado a la liberación rápida de iones a través de minerales solubles.

Aunque se controlaba la lixiviación, no se evitó el lavado de sales con el riego, por lo que se observa que la CE de lixiviados en un inicio es alta, sobre todo para las mezclas sin enmiendas, hasta 9 veces más (mezcla Bt) en el caso de la mezcla NCt (2 mS/cm). Con el tiempo la CE disminuyó en todos los casos al cabo de ocho meses. Al inicio, las concentraciones de iones mayores eran Ca, predominantemente, seguido de Mg y K. Las menores fluctuaciones de aniones y cationes se presentan en la mezcla NCt, que tiene la mayor cantidad de materia orgánica añadida como enmienda de café y naranja. Tiene las menores fluctuaciones a pesar de haber servido como sustrato para plantas de jitomate. Este comportamiento no se observa en la mezcla Lt, en la que se movilizan hacia el final más aniones en forma de sulfatos y nitratos, mientras que los cationes varían ligeramente con el magnesio y el potasio. Lo anterior podría deberse a la retención de nutrientes a través de estabilización de la MO. La mezcla Ba, que está acondicionada y funge como blanco sin plantas, tampoco muestra diferencias importantes en la concentración de cationes y aniones entre el inicio y el fin del experimento.

La conductividad eléctrica se ve afectada por la concentración de sales solubles y sus aniones asociados, por lo que se midieron las concentraciones de iones mayores en el agua de riego para comprobar que no había un enriquecimiento particular a través de la misma. Los aniones presentes en el agua en el inicio y final del experimento tienen concentraciones de HCO_3 , Cl, NO_3 y SO_4 , en ese orden.

Aniones en lixiviados iniciales y finales

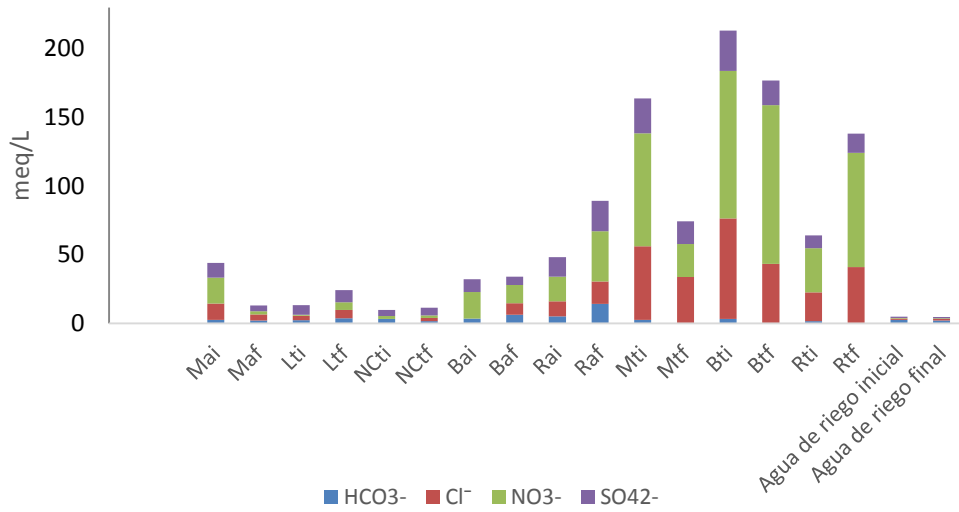


Figura 8.1 Concentración de aniones mayores en lixiviadas iniciales (i) y finales (f)

Cationes en lixiviados iniciales y finales

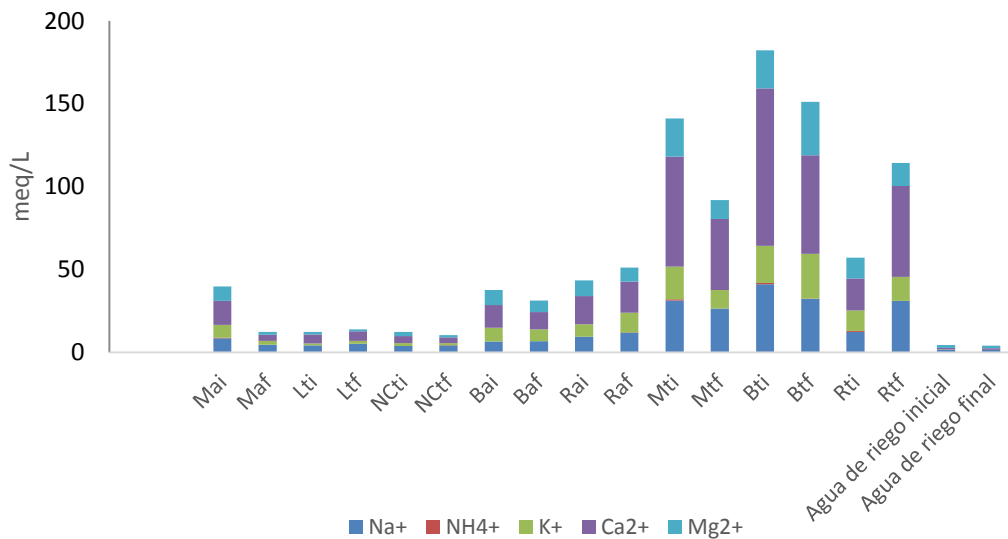


Figura 8.2. Concentración de cationes mayores en lixiviadas iniciales (i) y finales (f)

La CE de la mezcla NCT se mantuvo constante a lo largo de los meses, sin fluctuaciones importantes. En comparación con los análisis, Na, Mg, K y Ca los aniones superiores en esta mezcla son HCO₃, Cl, NO₃ y SO₄. El agua de riego al inicio y final, no contribuye especialmente con la adición de iones a la solución del sustrato.

Este lavado de iones ha sido reportado con anterioridad (Vijayaraghavan, *et al.*, 2012) y podría contribuir al acondicionamiento de las mezclas como sustrato para AV, ya que la disminución de salinidad en la solución es deseable para el desarrollo de las plantas. La variación entre las concentraciones iniciales de iones mayores entre las mezclas Mt, Bt, Rt y sus contrapartes no tamizadas se debe al tiempo de acondicionamiento de diferencia. Es decir, los materiales de las mezclas Ma, Ba y Ra han pasado por un lavado de sales previo, lo que implica la movilización de iones solubles, en comparación con las mezclas más recientes, que no han pasado por ese proceso.

Por otro lado, algunos nutrientes que requiere el cultivo de jitomate incluye nitrógeno, potasio, calcio, magnesio, azufre (FAO, 2013), mismos que en sus formas iónicas se ven disminuidos las mezclas Ma, Lt, NCT y Mt, en las que estaban presentes estas plantas. En los sulfatos se observa un aumento en los tratamientos sin plantas. Se muestra también un aumento en la concentración de HCO₃, que se asocia a la presencia de plantas. Los iones que se lixivian representan la fracción asimilable para las plantas, por lo que podemos asegurar que estos materiales proporcionan concentraciones altas de iones importantes para el crecimiento de las plantas, como Ca, Mg, K y NO₃. La mayor dificultad se observa en la disponibilidad de P, ya que no está de manera aprovechable para las plantas. En este sentido, es importante, seguir evaluando la evolución de estos materiales para conocer las etapas en donde se supera esta dificultad. Mientras tanto, estos materiales pueden ser usados para especies en donde la demanda de P sea baja.

En el caso del cloro, que también es esencial, hay un ligero aumento en las mezclas Lt y NCT, opuesto a las mezclas Ma y Mt (la misma composición). Esto podría indicar que los materiales que conforman las primeras fomentan la liberación del ion cloro.

En cambio, a pesar de encontrarse fósforo en los metales totales de las mezclas, no se detecta en la solución, lo que puede indicar que no se está liberando del material mineral y, por lo tanto, tampoco se moviliza ni parece estar disponible para las plantas.

Por otro lado, además de controlar el pH, la formación de precipitados de carbonatos, fomentan posiblemente un cambio en las condiciones físicas, ya que puede disminuir la microporosidad de los materiales. Washbourne y colaboradores (2012), mostraron que antrosoles provenientes de RDC con altos contenidos de Ca

y Mg y tendencia al pH alcalino, precipitan carbonatos y capturan CO₂ atmosférico abundantemente, lo que puede ser visto como un servicio ecosistémico.

8.2.2 Metales en lixiviados iniciales y finales

En comparación con los primeros lixiviados y los últimos se encontraron diferencias en cuanto a la concentración de algunos metales. Los metales que podrían considerarse de mayor importancia en las mezclas son aquellos que se movilizan en la solución y que podrían quedar biodisponibles, en este caso, en los lixiviados. Los metales en solución son más susceptibles de ser absorbidos por las plantas, es por ello que es necesario conocer la presencia de metales que ponen en riesgo la salud en altas concentraciones, como el arsénico, el cadmio, plomo, vanadio y el zinc.

Es posible que haya habido una adición de As a través del agua de riego, pues en un inicio no se detectaron en los lixiviados y en el agua, pero sí al final. El agua suele tener un contenido mínimo de arsénico que, en este caso, no sobrepasa los límites establecidos para México y Estados Unidos (NOM-EM-034-FITO-2000; EPA, 2012).

En cuanto a cadmio y plomo, las concentraciones no alcanzaron los límites mínimos de detección LD (0.51 y 0.724 mg/Kg, respectivamente); lo anterior no permite conocer el estado real de estos metales en lixiviados, por lo que no es posible determinar si sobrepasan los límites permisibles americanos de la EPA.

El componente más abundante en el caucho molido es el zinc, mismo que no parece estar movilizándose a través de la solución. La combinación del CM con otros materiales minerales arcillosos y porosos, como es el caso del tepetate y la composta inhibe la liberación de Zn (Lorrelly, *et al.*, 2012). Asimismo, la estabilización del pH de la mezcla Lt hacia una ligera alcalinidad permite la retención del metal y la liberación lineal del mismo a través del tiempo (ibíd). Este comportamiento se observa en el zinc de los lixiviados de la mezcla Lt, cuya variación en el tiempo es mínima (0.77 mg/kg) entre el inicial y el final. Otro factor podría ser el aporte a través del agua de riego que en el caso de los lixiviados iniciales y finales, la concentración de zinc en agua sobrepasa a cualquiera de los obtenidos de las mezclas.

8.2.3 Densidad aparente y pérdida de volumen

La densidad aparente es una medida indirecta de la porosidad y, en este sentido expresa los cambios que favorecen o no la compactación de un suelo o, en este

caso, de cada mezcla. Por lo tanto, el cambio de volumen de un tiempo a otro afectará la densidad y, por consiguiente, el espacio poroso.

En un inicio, con las columnas instaladas, la densidad aparente mayor la presentó la mezcla Bt, tamizada <3 mm, con una densidad de 1.31 g/cm³, seguida de las mezclas Ma, Ba y Ra, que tienen la misma composición y no se tamizaron. Las mezclas más ligeras fueron NCt, seguida de la mezcla Lt. Se logró disminuir la densidad de la mezcla Bt con enmiendas orgánicas (mezcla NCt) y la adición de caucho molido (mezcla Lt), hasta en un 29 y 18%, respectivamente (Tabla 8.1).

Tabla 8.1. Densidades aparentes

Densidad aparente (g/cm ³)	Ma	Mt	Lt	NCt	Ra	Rt	Ba	Bt
Inicial	1.21	1.31	1.07	0.93	1.18	1.31	1.21	1.31
Final	1.26	1.39	1.10	1.09	1.23	1.40	1.23	1.41
Porcentaje aumentado (%)	4.13	6.11	2.80	17.20	4.50	6.87	1.65	7.63

a: acondicionar. t: tamizado <3 mm.

Se observó que la densidad aparente tuvo un aumento poco notable después de los ocho meses (fig. 8.3). A excepción de la mezcla NCt, que presentó la mayor diferencia. Es necesario recordar que esta mezcla tenía un tamaño de partícula <3 mm y que la adición de una enmienda orgánica de restos de café y cáscaras de naranja triturada presentaba una granulometría similar, por lo que es posible que se haya fomentado la compactación. Esto se corrobora con la figura 8.3, que ilustra la pérdida de volumen desde el inicio hasta el final del experimento.

Se observa, también, que finalmente las mezclas más densas fueron Ma, Ra y Ba; mientras que NCt y Lt se igualaron en densidad, aunque el aumento de DA en la mezcla NCt es el más notable de todos, con casi el 15%.

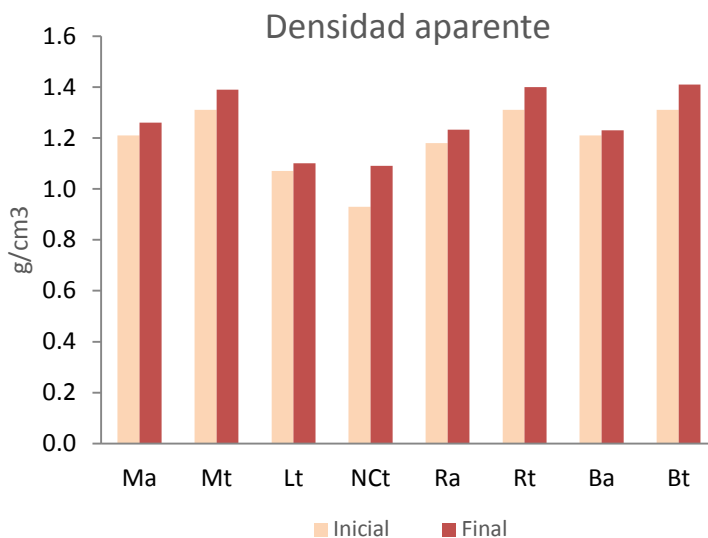


Figura 8.3. Comparación de densidad aparente inicial (con SD) y final por mezcla

Se comprueba que el uso de caucho molido es potencialmente utilizable para disminuir la densidad del sustrato y la carga neta sobre la losa del edificio. Algunos estudios han comprobado la viabilidad del uso de caucho molido como sustituyente de materiales naturales y favorecedor de la retención de humedad, el drenaje, sustrato para el crecimiento de plantas comestibles y la disminución de la densidad total del sistema (Pérez *et al.*, 2011).

La pérdida de volumen se ha reportado en otros sustratos especialmente orgánicos, como en el caso de la mezcla Nct; esto se atribuye a una dinámica física del sustrato, manifestada como compactación, y, por otro lado, a una biológica, que se manifiesta a través de la degradación de la MO (Grard, *et al.*, 2015). Lo anterior coincide con la mayor pérdida de volumen que se presentó en este estudio. Esto puede resultar en un problema a largo plazo, en particular para las plantas, pues limita el espacio poroso a largo plazo. A pesar de ello, la mezcla Nct, por su carácter orgánico podría proveer un mejoramiento en la estructuración de las partículas y un mejoramiento en la capacidad de retención de agua.

Los reportes de la pérdida de volumen en sustratos para AV se hacen especialmente para aquellos enriquecidos con más MO, por lo que, posiblemente, la FFL (2008) sugiere limitar el contenido de MO hasta por debajo del 20%, en el caso de la mezcla Nct, se colocó el 23%. También se menciona que esto previene la pérdida innecesaria de nutrientes a través de la lixiviación a largo plazo. Nagase y Dunnet (2011) reportaron óptimo crecimiento de especies.

Hay pocos estudios a largo plazo (Bates *et al*, 2014; Krawczyk *et al*, 2017) que contemplen la evolución de los sustratos de AV como medio de crecimiento para plantas durante periodos extensos de tiempo. Sin embargo, estos estudios muestran el acondicionamiento de los materiales en términos químicos (cambios de pH, CE, metales en solución, porcentaje de MO) y físicos (cambios paulatinos en la densidad aparente). Del mismo modo, confirman la posibilidad de emplear residuos sólidos de diferentes orígenes para su aprovechamiento como sustratos para el crecimiento de especies nativas, según la región en la que se desarrollan los proyectos. En este caso, se utilizaron satisfactoriamente especies originarias de México, adaptadas a las condiciones climáticas propias del país.

8.3 Desarrollo vegetativo y actividad biológica

8.3.1 Sobrevivencia

En la mezcla Ma, no se necesitó ningún mejorador para asegurar la germinación de las semillas de jitomate. Por el contrario, hubo más del 60% de germinación en esta en contraste con la mezcla Lt que presentaron más del 50% semillas inviables en el sustrato. La mezcla NCt presentó una germinación más pronta y germinación similar a la mezcla Ma. Lo anterior podría deberse a que el aporte de componentes orgánicos es mayor en NCt que en los otros dos. La diferencia de 17.7% de germinación entre Ma y Lt podría indicar un ambiente desfavorable para el establecimiento de la especie. Entre las mezclas no hay diferencia en cuanto al pH inicial, pero sí las hay en cuanto a la CE: el mayor éxito de supervivencia lo tiene la mezcla Lt, que al principio del experimento tenía una CE de 5 mS/cm y cayó hacia los 3 mS/cm. Las mezclas Ma y NCt están por encima y debajo de 5mS/cm, respectivamente y caen hacia 3 ms/cm, al igual que lo hace la CE de la mezcla Lt. Lo anterior podría indicar que la conductividad eléctrica inicial cambia el éxito del establecimiento de *L. esculentum*.

En cuanto a la verdolaga, la supervivencia de las semillas es superior que en el caso del jitomate con un 73.3%, que indicaría una viabilidad aceptable de esta especie en las mezclas. Sin embargo, estas diferencias pueden deberse a sus características de ciclo de vida de estrategia tipo r y establecimiento rápido.

Tabla 8.2. Sobrevivencia al final del experimento

	Ma	Lt	NCt	Mt	Ra	Rt
	Jitomate				Verdolaga	
Sobrevivencia (%)	83.3	100	83.3	25	0	0

No se obtuvieron resultados que comprueben o refuten la hipótesis de sucesión de cultivos con verdolaga (*P. oleracea*) en la mezcla. Esto se debe a que el crecimiento y sobrevivencia de los individuos de esta especie se vio limitado y afectado por los requerimientos distintos entre verdolaga y jitomate, que no se consideraron durante el riego. Sin embargo, Vijayaraghavan & Badavane (2016), lograron un crecimiento óptimo de la especie en un sustrato diseñado para azoteas verdes que incluía en la mezcla 20% de purosil, 30% de vermiculita, 10% arena, 20% arcillas expandidas, 10% fibra de coco y 10% pasto marino (*Sargassum wightii*). Otros autores reportan también crecimientos óptimos de esta especie; por ejemplo, Aloisio *et al.* (2016) utilizaron distintas mezclas, aunque la de mejor resultado fue una mezcla de composta, peatmoss y restos de poda que permitía un alto almacenaje de humedad, concentración alta de nutrientes y poco espacio poroso; la humedad fue controlada.

Por otro lado, la supervivencia de las plantas de jitomate fue buena en general, pues se lograron el 100% de los individuos en la mezcla Lt, mientras que la mezcla Nct, que representaba la mezcla más orgánica, tuvo 16.7% menos; al mismo tiempo, las plantas de la mezcla Rt tuvieron 75% menos sobrevivencia respecto a las primeras mezclas mencionadas. La mezcla Ma, que retenía menos agua también tuvo una sobrevivencia de 83.3%. Las condiciones de alta salinidad y condiciones adversas de la mezcla Rt, mantenían a las plantas en constante estrés. Esto se observaba en la presencia de hojas y color amarillento. Estas condiciones de vulnerabilidad las hicieron menos capaces de sobreponerse al ataque de mosca blanca. Asimismo, la mezcla Nct y su composición altamente orgánica fomentaba la proliferación de plagas nocivas debido a la humedad y la disponibilidad de alimento, esto se tradujo en la aparición de mosco fungoso.

8.3.2 Altura y diámetro de tallo

Sebastián Flores (2016) reporta el crecimiento de tomates cherry (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en mezclas de orígenes similares a las utilizadas en este estudio. Se muestra un crecimiento más bajo de la especie con un sustrato a base de residuos de demolición, en comparación con el obtenido con residuos de excavación. En cuanto a producción de biomasa el resultado corrobora un menor rendimiento de los sustratos de residuos de demolición, con hasta un crecimiento de entre 60 y 70 cm a los tres meses, lo que muestra que se obtuvieron con anterior mejores resultados que los aquí mostrados hasta el mismo periodo (máximo 50 en la mezcla Ma y mínimo 15 cm con la mezcla Nct).

8.3.3 Número y peso seco de frutos

La CE varió constantemente, conforme pasó el tiempo, en las mezclas en las que creció jitomate (Ma, Lt, Nct y Mt). Se ha encontrado que la CE juega un papel fundamental para la producción y el tamaño de los frutos de jitomate (Dorais *et al.*, 2001; Adams & Ho, 1989), el tamaño del fruto es inversamente proporcional a la CE, mientras que la biomasa seca es proporcional. Mayor a 2.3-5.1 mS/cm conduce a una disminución del rendimiento, mientras que 3.5 a 9 mS/cm mejora el rendimiento (Dorais *et al.*, 2001).

El tamaño reducido de los frutos de jitomate y la baja producción se deben a la variabilidad alta de la CE, generalmente este comportamiento se observa entre los 3 y 8 mS/cm (Adams & Ho, 1989).

Por otro lado, la temperatura alta del sustrato afecta negativamente la floración y, por ende, la producción de frutos (FAO, 2002). En relación a la temperatura del sustrato, se observó que la mezcla Lt fue la que presentó las menores temperaturas y el mayor número de frutos, en comparación con las otras mezclas que no tuvieron diferencias entre ellas (fig. 8.4).

Sailor y Hagos (2011) reportaron que la compactación a la que suelen estar sujetos los sustratos de azoteas verdes, incrementa la conductividad térmica. Lo anterior coincide con las mayores temperaturas y las mayores pérdidas de volumen en las mezclas.

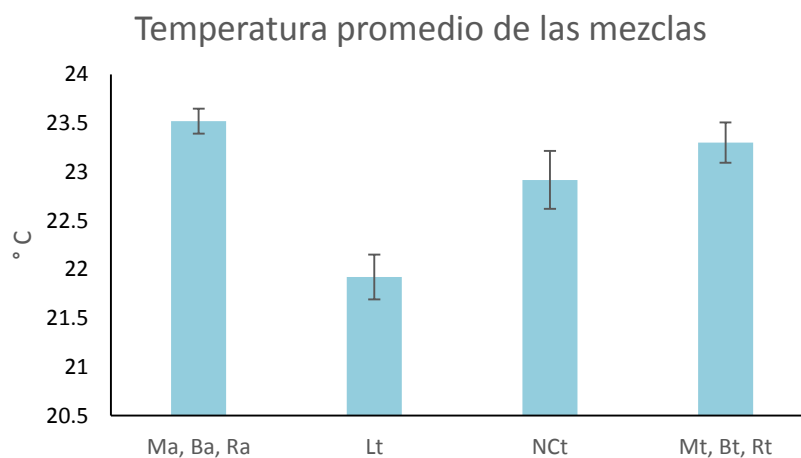


Figura 8.4. Temperaturas promedio en las mezclas y SD

El peor rendimiento en cuanto a biomasa y número de frutos se presentó en la mezcla Nct, que, aunque mantuvo una CE más o menos constante (alrededor de 2.0 mS/cm), reportó diferencias en cuanto a biomasa de frutos, respecto a las otras

mezclas. Debido a lo anterior, se afirma que las diferencias en cuanto a los frutos sólo se presentaron precisamente en esta mezcla.

Aunque la mayor biomasa promedio se presentó en la mezcla Ma, la CE de esta mezcla fue de mayor a menor, empezando por 9.98 hasta 1.77 mS/cm, se infiere que durante los meses de floración.

Por otro lado, la Bióloga Ana Hernández (com. pers.) sugiere que el tipo de crecimiento indeterminado de las plantas de jitomate utilizadas en este estudio pudo haber ocasionado una producción baja debido a que no se realizaron las podas que se requerían.

Sin embargo, la FAO (2002) ha reportado deficiencias asociadas a la falta de fósforo, entre las que se encuentran el crecimiento lento, maduración lenta, frutos deformes. Se observó en el apartado 7. Tal que hay bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo totales. La asimilación del nitrógeno depende de la presencia de fósforo, por lo que su falta disminuye la absorción de nitrógeno (FAO, 2013). Ambas deficiencias pueden derivar en disminución de crecimiento, floración y, en consecuencia, peso y cantidad de frutos.

8.3.4 Biomasa seca y metales en plantas de jitomate

De acuerdo a la ASTDR (2016), las mayores concentraciones de cadmio se encuentran en las hojas de las verduras, sin embargo, esto contrasta con lo encontrado en el análisis de las vías aéreas de las plantas de jitomate, donde las mayores concentraciones las encontramos en las raíces de las plantas. Esto podría deberse a su cercanía con el medio sólido que lo contiene. Estudios revelan que el contenido de ladrillos que se encuentra en los desechos de demolición es rico en este elemento (Jianjun *et al.*, 2013).

8.4 Inocuidad de frutos

Las normas mexicanas no regulan la concentración de metales pesados en hortalizas, como el jitomate, sin embargo, se regulan las condiciones para su crecimiento, con límites máximos permisibles de metales pesados en suelos y agua de riego (ver Resultados).

Tabla 8.3 Metales de interés en frutos de jitomate en cada mezcla.

Muestra	As	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
	ppm					
Ma	<LD	0.135	2.866	10.453	<LD	51.494
Lt	<LD	<LD	0.271	0.613	<LD	44.356
NCt	<LD	<LD	0.291	0.697	<LD	44.122
LMP	-	0.05	2.3	1.5	0.05	60

<LD: menor al límite de detección. LMP: Límites Máximos Permisibles (CODEX, 1993, 2001, 2007, 2015)

La calidad de los frutos no fue medida, pues ello tendría que regularse con la normatividad vigente para la producción de frutos que se refiere a la apariencia del producto.

Por otro lado, no se abordó en este estudio el análisis de PAHs y COVs, asociados a la presencia de caucho molido, en el caso de la mezcla Lt. Sin embargo, Gomes y colaboradores (2011) reportaron que no había movilidad peligrosa de esos compuestos en pepinos, salvo acumulación de partículas de caucho en las raíces.

8.5 Carga por unidad de área

Es necesario comparar, en la teoría, la carga que ejerce cada mezcla sobre la losa de un edificio. La NADF-013-RNAT-2007 establece valores máximos para las cargas de los sistemas de naturación de azoteas verdes extensivas, intensivas y semi-intensivas en términos del sustrato a saturación. En la tabla 8.4 se exponen los resultados calculados de cada una de las mezclas en comparación con lo establecido en la legislación.

Tabla 8.4. Comparación de carga por unidad de área con la legislación vigente

	Mezclas								NADF-013-RNAT-2007		
	Ma	Mt	Lt	NCt	Ra	Rt	Ba	Bt	Extensiva	Intensiva	Semi-intensiva
Carga por unidad de área (kg/m ²)	108.6	111.6	94.3	103.5	108.6	111.6	108.6	111.6	110-140	250	150-250
Profundidad (cm)	15	15	15	15	15	15	15	15	<18	>20	>15

a: acondicionada. t: tamizada

Hay que considerar que la legislación no toma en cuenta el peso de la vegetación ni de las capas que constituyen el sistema estructural de naturación de azoteas verdes.

En ninguno de los casos se sobrepasan los límites permisibles para la carga sobre la losa en condiciones saturadas, por lo que es posible decir que cumplen con los requerimientos mínimos para una azotea verde de uso extensivo y semi-intensivo. Los mejores resultados en cuanto a ligereza del sustrato se obtuvieron con las mezclas Lt y Nct.

Por la naturaleza de la estrategia de cultivo, este estudio entraría en la categoría semi-intensiva, acorde a la legislación mexicana vigente. No se han realizado en México, hasta ahora, estudios respecto al sustrato utilizado en AV, así como de otras alternativas para sustituir los materiales comúnmente utilizados para proveer un sustrato ligero y las condiciones necesarias para el establecimiento de plantas.

Capítulo 9

Conclusiones

En conclusión, se probaron distintas mezclas de desechos de demolición, que funcionaron satisfactoriamente para el crecimiento del jitomate.

1. Los mejoradores añadidos a las mezclas de sustratos de desechos de demolición cumplen sus funciones para aligerar la carga de las mezclas y también para el establecimiento de plantas comestibles. Lo anterior confirma que son potencialmente utilizables como sustratos para azoteas verdes.
2. El crecimiento de jitomate (altura y diámetro de tallo) más consistente se presentó en la mezcla Ma, seguido de Lt, Nct y Mt. La mayor producción de frutos está en Lt, pero la mezcla acondicionada logró mayor acumulación de biomasa.
3. Tras el análisis de metales en frutos es posible decir que su consumo no representa un riesgo para la salud, de acuerdo a la legislación internacional.
4. El desarrollo limitado y sobrevivencia baja de las plantas de jitomate en la mezcla Mt, respecto a su contraparte (Ma), indican que es necesario un acondicionamiento previo de los materiales para lavar sales. La mezcla acondicionada previamente (Ma) mostró no necesitar mejoradores para sostener el crecimiento de plantas de jitomate. Ello a pesar de la limitación de nutrientes como el fósforo, que parece no estar disponible.
5. La adición de caucho molido en una proporción de 9.1% del peso a la mezcla de tepetate, desechos de demolición y composta, disminuye la densidad aparente y aumenta ligeramente la porosidad. Además, logra disminuir notoriamente el efecto de compactación (a través de la pérdida de volumen), en comparación con las otras mezclas y promueve la disponibilidad de agua para las plantas.
6. La adición de caucho molido a las mezclas y la utilización de una mezcla previamente acondicionada, generan el mismo efecto que la adición de enmiendas orgánicas ácidas (café y naranja) para disminuir el pH alcalino de los residuos de demolición.
7. El desarrollo y sobrevivencia de plantas de verdolaga se vio limitado debido a que se aplicó el mismo régimen de riego que en el caso del jitomate y no se logró comprobar la hipótesis de sucesión de cultivos.

Capítulo 10

Perspectivas a futuro

A pesar de haber logrado producir distintos sustratos con características deseables para utilizar en la construcción de AV, es importante escalar el experimento fuera de invernadero para someter a condiciones atmosféricas y ambientales normales en una azotea verde en la Ciudad de México. Esto incluye la instalación de la sucesión de membranas habituales en las AV.

Los residuos sólidos urbanos que se producen en la Ciudad de México tienen muy variados orígenes y materiales composicionales, por lo que hay materiales de desecho (i.e. gel para pañales, plásticos) que podrían utilizarse potencialmente como mejoradores o sustitutos. En México es necesario que se realicen más investigaciones respecto a los materiales reciclados que se pueden utilizar como sustitutos de los sustratos naturales empleados actualmente para AV extensivas.

Es importante estudiar la evolución de estos materiales, particularmente debido a los metales que podrían movilizarse a través de la solución.

Es necesario probar otras especies vegetales que requieran condiciones ambientales distintas, con el fin de verificar la viabilidad de materiales reciclados como sustrato para un rango más amplio de plantas, que pudieran, posiblemente, no necesitar de sistema de riego o que funcionaran como ornamento. También otras especies, cuyos requerimientos nutrimentales sean menores, especialmente en cuanto al fósforo.

A pesar de que hoy en día el uso de tecnosoles y la construcción de AV son importantes alternativas a la falta de áreas verdes urbanas, no sustituyen las funciones ecológicas que son inherentes a los suelos naturales, por lo que su conservación se debería ponderar por encima del remedio que representan las estrategias como las AV.

Capítulo 11

Bibliografía y referencias

- Adams, P. & Ho, L. (1989). Effects of constant and fluctuating salinity on the yield, quality and calcium status of tomatoes. *Journal of Horticultural Science*. 64: 6. 725-732.
- Aloisio, J.M., Ruininga, A., Lewis, J. D. (2016) Crop species selection effects on stormwater runoff and edible biomass in an agricultural green roof microcosm. *Ecological Engineering*. 88. 20-27.
- Alvarado, A. (2014). Identificación de la problemática y propuesta de soluciones en la explotación de la mina El Potrero, ubicada en el municipio de Ixtapaluca, Estado de México. Tesina. Ingeniería en Minas y Metalurgia. UNAM. México.
- ANEFA (2016). Revista anual. 58. Recuperado el 25 de octubre de 2017, de http://www.aridos.org/wpcontent/uploads/2017/05/ANEFA_RevistAnual_16_17.pdf#page=13
- Arellano, E. (2012). Capacidad de retención de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados en una azotea verde extensiva (Tesis de Licenciatura). UNAM, Ciudad de México.
- Arosemena, Graciela (2012). Urban agriculture: spaces of cultivation for a sustainable city. Recuperado el 13 de septiembre de 2017, de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/unam/reader.action?docID=3209519>
- Ávila, H. (2001). La agricultura y la industria en la estructuración territorial de Morelos. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias. UNAM. 61 pp.
- Bates, A., Sadler, J., Gresswell, R. & Mackay, R. (2015) Effects of recycled aggregate growth substrate on Green roof vegetation development: a six-year experiment. *Landscape and Urban Planning*. 135. 22-31.
- Bedoya, M. (2003). El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles. "La sociedad como ecosistema semicerrado, una utopía cultural. Tesis. Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 97 pp.
- Bianchini, E. (2012). Influence of construction and demolition (C&D) waste on green roof performance (Tesis de maestría). University of British Columbia. Okanagan.
- Bisceglie, F., Gigante, E., Bergonzoni, M. (2014). Utilization of waste Autoclaved Aerated Concrete as lighting material in the structure of a green roof. *Construction and Building materials* 69: 351-361
- Bonneau, M. y Soucier, P (1982). Constituents and properties of soil. Academia de Londres.
- Brady, N. y Weil, R. (2002). The Nature and Properties of soils. Prentice Hall. 13° edición. EUA.
- Burés, S. (1997). Manejo de sustratos. Barcelona. Recuperado de <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/8073>

_I_CURSO_DE_GESTION_DE_VIVEROS_FORESTALES/80-373/7_MANEJO_DE_SUSTRATOS.PDF

- Cabeza, L. F., Fernández, A. I., Solé, C., Pérez, G., Villa, A. (2012). Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental Green roofs. *Building and Environment*. 48: 101-106.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (2013). Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición. Recuperado el 4 de enero de 2018, de <http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf>
- CEESCO (2016). La industria de la construcción impulsada por un solo motor: La edificación. Recuperado de <http://www.cmic.org.mx/cmhc/ceesco/2016/Art%C3%ADculo%2001092016.pdf>
- Codex (1995). Norma General del Codex para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos. Recuperado 25 de octubre de 2017, de http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/livestockgov/documents/CXS_193s.pdf
- Cohen, B. (2005). Urbanization in developing countries: Current trends, future projections, and key challenges for sustainability. *Technology in Society*. 28:63-80.
- Cram, S., Cotler, H., Morales, L. M., Sommer, I. y Carmona, E. (2008). Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Investigaciones Geográficas*, 66.
- Dominati, E., Patterson, M. & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils.
- Doni, S., Macci, C., Peruzzi, E. (2013). Decontamination and functional reclamation of dredged brackish sediments. *Biodegradation*. US National Library of Medicine National Institutes of Health. 24: 499.
- Dorais, M., Papadopoulos, A., Gosselin, A. (2001). Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews*. 239-319.
- Edgerton, S. A., Bian, X., Doran, J. C., Fast, J. D., Hubbe, J. M., Malone, E. L., Shaw, W.J., Whiteman, C.D., Zhong, S., Arriaga, J.L., Ortiz, E., Ruiz, M., Sosa, G., Vega, E., Limon, T., Guzman, F., Archuleta, J., Bossert, J.E., Elliot, S.M., Lee, J.T., McNair, L.A., Chow, J.C., Watson, J. G., Coulter, R.L., Doskey, P.V., Gaffney, J.S., Marley, N.A., Neff, W. & Petty, R. (2011). Particulate Air Pollution in Mexico City: A Collaborative Research Project. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 49:1999
- Eksi, M. y Rowe, B. (2016). Green roof substrates: effect of recycled crushed porcelain and foamed glass on plant growth and water retention. *Urban Forestry and Urban Greening*, EUA.
- Eksi, M., Rowe, B., Fernández-Cañero, R., Cregg, B. (2015). Effect of substrate compost percentage on green roof vegetable production. *Urban Forestry and Urban Greening*. 14: 315-322.
- Ellis, S. y Mellor, A. (1995). *Soils and Environment*. Routledge.
- European Commission—DG ENV (2010) Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. Recuperado el 16 de febrero de 2018, de <http://ec.europa.eu/environment/soil/biodiversity.htm>
- Evans, C., Fanning, D. y Short, J. (2000). Human-influenced soils. En *Managing Soils in an Urban Environment*.

- FAO (2013). El Cultivo De Tomate Con Buenas Prácticas Agrícolas En La Agricultura Urbana Y Periurbana. 70 p.
- FAO (2013). El cultivo de tomate con buenas prácticas agrícolas en la agricultura urbana y periurbana. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i3359s.pdf>
- FAO (2015). Las funciones del suelo. Recuperado el 17 de febrero de 2018, de <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/294325/>
- FAO (2015). Status of the World's Soil Resources: Technical Report. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- FLL-guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing (2008). Green Roofing Guideline. The Landscape Development and Landscaping Research Society (FLL).
- Flores, L. & Alcalá, J. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. Departamento de Edafología, Instituto de Geología. UNAM. Distrito Federal, México.
- Flores, S. (2017). Generación de sustratos como soporte de plantas para áreas verdes urbanas utilizando residuos de construcción (Tesis de Maestría). UNAM, Ciudad de México.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal (2015). NADF-007-RNAT-2013, sobre la clasificación y especificaciones de manejo para los residuos de construcción y demolición. Recuperado de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Estatal/Distrito%20Federal/wo101947.pdf>
- Getter, K. y Rowe, D.B. (2006). The role of extensive Green roofs in sustainable development. Hort Science. 41(5). 1276-1285.
- Getter, K.L., Rowe, D. B., Robertson, G.P., Cregg, B.M., Andresen, J.A. (2009). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. Environment Science and Technology. 43(19): 7564-7570.
- Gomes, J., Mota, H., Bordado, M., Sarmiento, J., Fernandes, V., Veloso, I. (2011). Design of a new test chamber for evaluation of the toxicity of rubber infill. Informa Healthcare. EUA. 21(8): 622-627
- González, R. (2007). Opera nuevo esquema para proteger recursos naturales en Cuajimalpa. En La Jornada en línea. Recuperado de <http://www.jornada.unam.mx/2007/02/12/index.php?section=capital&article=039n1cap>
- Grard B.J.P., Bel, N., Marchal, N., Madre, F., Castell J.F., Cambier P., Houot, S., Manouchehri, N., Besancon, S., Michel, J.C., Chenu, C., Frascaria-Lacoste y N., Aubry, C. (2015). Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden. Future of food. Journal on Food, Agriculture and Society. 3 (1). 21-34
- Gregoire, B.G., Clausen, J.C. (2011). Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. Ecol Eng 37: 963-9.
- GRO (2011). The GRO Green Roof Code. Green Roof Code of Best Practice for the UK 2011. Environment Agency.
- GRO (2014). The GRO Green Roof Code Best Practice for the UK 2014. Environmental Agency
- Gubiani, P. I., Reinert, D. J. y Reichert, J. M. (2006) Alternative method to measure the soil particle density: exactness, precision, and processing time. Rural Science. Vol. 36. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000200049>.
- ICOMANTH (2005) Circular letter, Vol. 6. International Committee for Anthropogenic Soils. Recuperado de http://clic.cses.vt.edu/icomanth/circlet6_rev.

- ISRIC (1992). Procedures for soil analysis. Third Edition. Ed.: L.P. van Reeuwijk. Technical Paper No. 9, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.
- Jianjun, Y., Chuanyini, L. Zichao, Z., Yugil, L. Shixiao, Y. (2013). Heavy metals in plants and substrate from simulated extensive Green roofs. *Ecological Engineering*. 55. 29-34.
- Jujnovsky, J., González, T., Cantoral, E., Almeida, L. (2012). Assessment of water supply as an ecosystem service in a rural-urban watershed in Southwestern Mexico City. *Environmental Management*. 49: 690-702
- Kasmin, H., Ummiah, S.N., Syafira, N., Azizi, N., Kassim, R., Ahmad, H., Sayuti, Z. (2016). The potential of Recycled Locally-Sourced Waste Materials for Green Roof Soil Mixtures. *Key Engineering Materials*. 730: 445-451.
- Krawczik, A., Domagala-Świątkiewicz, I., Lis-Krzyścin, A., Daraż, M. (2016). Waste Silica as a Valuable Component of Extensive Green-Roof Substrates. *Journal of Environmental Studies*. 26 (2). Krakow, Polonia.
- Laiseca, H. (2016). Ventajas y desventajas del manejo de materiales y residuos de la construcción en el Distrito Federal. Tesis. Especialista en Construcción de edificación y vivienda. UNAM.
- López, R. (2015). Pobreza alimentaria, seguridad alimentaria y consumo alimentario: una aproximación para el caso de México. *Revista Chilena de Economía y Sociedad*. 21 pp.
- Luna, D. (2012). Reuso de residuos de construcción y demolición. Enfoque ambiental y sustentable. Tesis. Ingeniería Civil. UNAM.
- Lynch, K., Maconachie, R., Binns, T., Tengbe, P., Bangura, K. (2013). Meeting the urban challenge? Urban agriculture and food security in post-conflict Freetown, Sierra Leone. *Applied Geography*. 36: 31-39.
- Maechling, P., Cooke, H y Bockheim, J. (1974). Nature and Properties of Highly Disturbed Urban Soils. *Agronomy abstracts*. EUA.
- Martínez, N. (2013). Sistema modular en azoteas verdes para el establecimiento de especies vegetales comestibles en la Ciudad de México (Tesis de Licenciatura). UNAM, Ciudad de México.
- McPhearson, T. (2011). Toward a sustainable New York city: greening through urban forest restoration. En: Slavin MI (ed) *Sustainability in America's cities: creating the green metropolis*.
- Meuser, H. (2010). *Contaminated Urban Soils*. Springer. Recuperado de <http://eds.a.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=1&sid=6592f0bc-6d84-44f5-b644-feef24c27070%40sessionmgr4008&hid=4105&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbG12ZQ%3d%3d#AN=lib.MX001001275584&db=cat02025a>
- Moghaddasi, S., Hossein Khoshgoftarmane (2015). Fate and effect of tire rubber ash nanoparticles (RANPs) in cucumber. *Ecotoxicology and environmental safety*. Elsevier. EUA. 137-143. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651315000640>
- Mohamad, R., Daniel, A.C., Grard, B., Juvin, A., Besacon, S., Bosch, A., Aubry, C. y Cambier, P. (2016). Edible production on rooftop gardens in Paris. Assessment of heavy metals contamination in vegetables growing on recycled organic wastes substrates in 5 experimental roofgardens. Ires 26th International Conference. Recuperado de http://www.worldresearchlibrary.org/up_proc/pdf/182-145516880914-17.pdf

- Molineaux, C.J., Fentiman, C.H., Gange, A.C. (2009). Characterizing alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the UK. *Ecol Eng.* 35:507.
- Møller, L. y Bergen, M. (2017). Benefits of Green roofs: a systematic review of the evidence for three ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening.* 28. 167-176.
- Morel, J.L., Chenu, C. y Lorenz K. (2015). Ecosystems services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining and military areas (SUITMAs). *Soils and sediments in urban and mining areas.* 15 (8).1659-1666.
- Morikawa, C. K. y Saigusa, M. (2007). Recycling coffee and tea wastes to increase plant available Fe in alkaline soils. Springer Science.
- Munera, G. & Meza, D. (2015). El fósforo, elemento indispensable para la vida vegetal. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Nagase, A. & Dunnet, N. (2010). Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and biodiversity. *Landscape and Urban Planning.* 97: 318-327.
- Nagase, A. & Dunnet, N. (2011). The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning.* 103: 230-236.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Connelly, M., Coffman, R., Doshi, H., Dunnet, N., Gaffin, S., Köhler, M., Lui, K., Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *Bioscience* 57 (10).
- Palomino, B. (2012). Aplicaciones paisajísticas del género sedum para el aligeramiento de sustratos para el aligeramiento de azoteas verdes. Tesis. Arquitectura. UNAM. México.
- Panamerican Seeds (2017). Pursana Toucan Series. Recuperado de file:///C:/Users/Mainbit/Downloads/Toucan_Purslane_GrowerFacts-1.pdf
- PAOT (2010). Estudio de zonas impactadas por tiraderos clandestinos de residuos de la construcción en el Distrito Federal. Pp 103. <http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/EOT-02-2010.pdf>
- Parizotto, S. Lamberts, R. (2011) Investigation of green roof thermal performance in temperate climate. A case study of an experimental building in Florianopolis city, Southern Brazil. *Energy Build;* 43: 1712–22.
- Pavao-Zuckerman, M. (2012). Urbanization, Soils, and Ecosystem Services. En *Soils, Ecology and Ecosystemservices.* 12 pp.
- Pérez, G., Vila, a., Rincón, L., Solé, C., Cabeza, L. (2011). Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material. *Applied Energy.* 97. España.
- Peri, G., Traverson, M., Finkbeiner, M., Rizzo, G. (2012). Embedding substrate in environmental assessment of green roofs life cycle: evidences from an application to the whole chain in a Mediterranean site. *Journal of cleaner production.* 35.
- PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2000), Annual Review, Nairobi, Kenia.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson,

- K., Crutzen, P., Foley, J.A. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*. 461. 472–475
- Rojas, C. (2006). Interpretación de la disponibilidad de fósforo en los suelos de Chile. En *Manejo de los recursos naturales en el tema de incentivos para la recuperación de los suelos degradados de la araucanía*. Ministerio de Agricultura. Chile.
- Rokia, S., Sére, G., Schwartz, C., Deeb, M., Fournier, F., Nehls, T., Damas, O., Vidal, L. (2014). Modelling agronomic properties of technosols constructed with urban wastes. *Waste Management*.
- Roldán, A., Calva, G., Rojas, N., Díaz, M.D. y Rodríguez, R. (2006). Solid culture amended with small amounts of raw coffee beans for the removal of petroleum hydrocarbon from weathered contaminated soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Elsevier.
- Roldán, A., Esparza, F., Calva, G. y Rodríguez, R. (2007). Effects of Mixing Low Amounts of Orange Peel (*Citrus reticulata*) with Hydrocarbon-Contaminated Soil in Solid Culture to Promote Remediation. *Journal of Environmental Science and Health*.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, M., (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.
- SAGARPA (2000). Normas Oficiales Mexicanas, NOM-EM-034-FITO-2000. *Diario Oficial de la Federación*. México
- SAGARPA (2010). Monografía de Cultivos: Jitomate. Recuperado de <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/Documentos/Monografias/Jitomate.pdf>
- Sailor, D., Hagos, M. (2011). An updated and expanded set of thermal property data for Green roof growing media. *Energy and Building*. 43(9). 2298-2303
- Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B., Pressnail, K. (2006). Comparative life cycle assessment of standard and Green roofs. *Environmental Science and Technology*. 40 (13). pp 4312-4316.
- SEDEMA (2008). Norma ambiental para el Distrito Federal, NADF-013-RNAT-2007. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. Distrito Federal. México.
- SEDEMA (2014). Inventario de Residuos Sólidos: CDMX-2014. Recuperado de <http://www.sedema.CDMX.gob.mx/storage/app/media/programas/residuos-solidos/inventario-residuos-solidos-2014/IRS-2014.pdf>
- SEDEMA (2015). Inventario de Residuos Sólidos: Ciudad de México 2015. Recuperado de <http://www.cms.sedema.CDMX.gob.mx/storage/app/media/IRS-2015-14-dic-2016.compressed.pdf>
- SEDEMA (s.a.). Azoteas Verdes. Recuperado el 18 de febrero de 2018, de <http://www.sedema.CDMX.gob.mx/programas/programa/azoteas-verdes>
- SEDESOL (2009). Manual Técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales. 145.
- Seki, K. (2007). SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 4: 407-437.
- SEMARNAT (2003). Normas Oficiales Mexicanas. NOM-083- SEMARNAT-2003. Recuperado el 3 de septiembre de 2017, de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004

- SEMARNAT (2004). Normas Oficiales Mexicanas. NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004. Recuperado el 3 de septiembre de 2017, de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/204
- SEMARNAT (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004. Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
- Sére, G. Schwartz, C. Ouvrard, S., Renat, J-C., Watteau, F., Villemin, G. y Morel, J. L. (2010). Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *J Soils Sediments*, vol. 10, pp. 1246-1254.
- FAO (2002). Los fertilizantes y su uso. 76 p
- Séré. G., Schwartz, Ouvrard, S., Sauvage y Morel, J. (2008). Soil Construction: A step for ecological Reclamation of derelict lands. *Soil Construction. Soil sediments*. 8 (2). 130-136.
- Shaver, R. (1993). Field vs. lab alkalinity and pH: effects on ion balance and Calcite saturation index. *Groundwater monitoring & remediation*, 13: 104-112.
- SIAP (2015). Avance Mensual Nacional por Cultivo: Jitomate 2015
- SIAP (2017). Avance Mensual Nacional por Cultivo: Jitomate 2017. Primer bimestre. Recuperado de http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinPrograma.do
- Soberanes, M.J. (2013). Arquitectura sustentable: La hospitalidad y la quinta fachada. *Hospitalidad ESDAI*, 24. 41-53.
- Stevenson, F.J. (1994). *Humus chemistry: Genesys, composition, reactions*. (2ª edición). John Wiley & Sons.
- Sutton, R. 2015. *Green Roof Ecosystems*. Springer. EUA. 441 pp.
- Torres, P. (2000). *Procesos metropolitanos y agricultura urbana*. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco/Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). México.
- Torres, P., Rodríguez, L. (2005). Dinámica agroambiental en áreas periurbanas de México. Los casos de Guadalajara y Distrito Federal Pablo Torres Lima Investigaciones Geográficas, *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611*, Núm. 60, 2006, pp. 62-82.
- United Nations (2011). *World population prospect. The 2010 revision*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, Volume I.
- Velasco, E., Nieto, R., Navarro. E. (2011). *Cultivo del tomate en hidroponía e invernadero*. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. 3a. edición. México. 128 pp.
- Vijayaraghavan, K. Joshi, U.M., Balasubramanian, R. (2012). A field study to evaluate runoff quality from green roofs. *Waters Res*. 46(4). 1337-45.
- Vijayaraghavan, K., Badavane, A. (2016). Preparation of growth substrate to improve runoff quality from green roofs: physic-chemical characterization, sorption and plant-support experiments. *Urban Water Journal*. 804-810.
- Vijayaraghavan, K., Joshi, U.M. (2014). Can Green Roof act as a Sink for Contaminants? A Methodological Study to Evaluate Runoff from Green Roofs. *Environment Pollution*. 194: 121-129.

- Von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E. & Marschner, B. (2007). SOM fractionation methods. Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*. 39 (9). 2183-2207.
- Wagner, H. (2014) Extracción ilegal de tierra de hoja, daño irremediable a la naturaleza. En Inforural. Recuperado de <http://www.inforural.com.mx/extraccion-ilegal-de-tierra-de-hoja-dano-irremediable-a-la-naturaleza/>
- Washbourne, C., Renforth, P., Manniga, A. (2012). Investigating carbonate formation in urban soils as a method for capture and storage of atmospheric carbon. *Science of The Total Environment*. 43. 166-175.
- White, R. (2006). Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource. UK: Blackwell.
- Wild, A. (1995). Soils and the environment: an introduction. Cambridge University Press. Gran Bretaña.
- WRB (2007). World Reference Base for Soil Resources 2006. IUSS Working Group WRB. World Soil Resources Report, No. 103, Roma.
- Yao, F., Macías, F., Santesteban, A., Virgel, S., Blanco, F., Jiag, X., Campos, M. (2009). Influence of the acid buffering capacity of different types of Technosoils on the chemistry of their leachates. *Chemosphere*. 74. 250-258
- Yazici, I., Askim, T., Sekmen, H., Demiral, T. (2007). Salinity tolerance of purslane (*Portulaca oleracea* L.) is achieved by enhanced antioxidative system, lower level of lipid peroxidation and proline accumulation. *Environmental and Experimental Botany*. 61 (1). 49-57.
- Zinzi, M., Agnoli, S. (2012). Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy Build*. 55. 66–76

Capítulo 12

ANEXOS

Anexo a. Límites de detección de ICP-OES, correspondientes a nebulizador ultrasónico

Elemento	LD (mg/kg)	Elemento	LD (mg/kg)
Al	0,368	Mg	0,837
As	0,190	Mn	0,030
Ba	0,045	Mo	0,239
Be	0,045	Na	7,311
Ca	1,955	Ni	0,053
Cd	0,097	P	0,049
Co	0,019	Pb	0,141
Cr	0,102	Sn	0,015
Cu	0,833	Sr	0,043
Fe	0,305	Ti	0,066
K	21,992	V	0,025
Li	0,075	Zn	0,287

LD: Límite de detección

Anexo b. Límites de detección de cromatógrafo WATERS 1525

Ion	LD (mg/L)
F ⁻	5
Cl ⁻	0.6
Br ⁻	0.8
NO ₃ ⁻	1.5
PO ₄ ³⁻	10
SO ₄ ²⁻	10
HCO ₃ ⁻	15.9
Na ⁺	0.4
K ⁺	0.3
Ca ₂ ⁺	0.4
Mg ₂ ⁺	0.2
NH ₄ ⁺	0.2

Anexo c. Condiciones de lectura de carbono y nitrógeno

Gas acarreador	Helio
Temperatura de combustión	980° C
Temperatura de reducción	640° C
Detector	Conductividad térmica
Compuesto de calibración	Acetanilida
Material de referencia	LECO soil calibration sample for CNS part 502-309