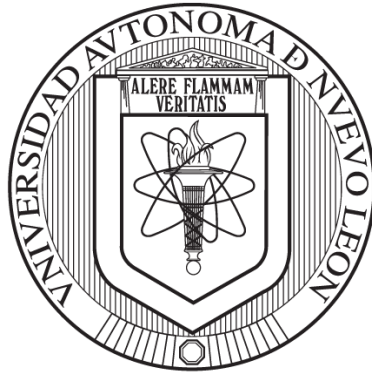


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**IMPACTO DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE PARA LA SOSTENIBILIDAD
URBANA EN MONTERREY: UN ESTUDIO MIXTO SOBRE LA
CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y LA CALIDAD DEL AGUA**

Por

ROGER ABRAHAM ABANTO BAZÁN

**Como requisito parcial para obtener el Grado de DOCTOR EN INGENIERÍA
con Orientación en Ingeniería Ambiental**

Abril, 2024

**IMPACTO DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE PARA LA
SOSTENIBILIDAD URBANA EN MONTERREY: UN ESTUDIO
MIXTO SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y LA CALIDAD
DEL AGUA**

Aprobación de la Tesis:

Dr. René Alberto Dávila Pórcel

Dr. Santiago Iván Suárez Vázquez

Dra. Gloria Lourdes Dimas Rivera

Dra. Simone Sandholz

Dr. Juan Carlos Mansur Garda

Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel

DEDICATORIA

Dedico este paso importante en mi vida a la persona más importante de ella, mi madre Victoria Bazán Cotrina, quien fue mi maestra de vida y fue un pilar fundamental en cada paso que doy en mi formación académica; este trabajo va en tu memoria y sé que desde donde te encuentres siempre estarás conmigo.

Te amaré eternamente.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Civil por permitirme formar parte de su institución durante este periodo, porque estoy seguro de que me ayudará a poseer un razonamiento crítico del conocimiento que me servirá como herramienta para poder aportar a la sociedad parte de este bagaje de conocimientos.

Al Dr. René Alberto Dávila Pórcel, agradecerle sus consejos y enseñanzas y sobre todo por su confianza. Gracias por su asesoría en el trabajo de tesis, y también gracias por la amistad que formamos durante este tiempo.

A los doctores Santiago Suárez Vázquez y Gloria Dimas Rivera por su paciencia, indicaciones y su disposición para llevar a cabo fases experimentales de manera efectiva y entendible.

A los doctores Isaías Juárez Ramírez y Daniel Sánchez Martínez por su apoyo y confianza que depositaron en mí desde el primer día de mi formación en posgrado

RESUMEN

Roger Abraham Abanto Bazán **Fecha de Graduación: Junio, 2022.**

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

**Título del Estudio: IMPACTO DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE
PARA LA SOSTENIBILIDAD URBANA EN
MONTERREY: UN ESTUDIO MIXTO SOBRE LA
CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y LA CALIDAD DEL
AGUA.**

**Número de Páginas: 201 Candidato para el grado de Doctorado en
Ingeniería con Orientación en Ingeniería
Ambiental.**

Área de Estudio: Ingeniería Ambiental.

Propósito y Método de Estudio:

El crecimiento urbano global está en aumento, y se prevé que para el año 2030, aproximadamente el 75% de la población mundial vivirá en áreas urbanas. Este proceso está transformando paisajes naturales, resultando en estrés ambiental y problemas como contaminación del aire, agua y escasez de recursos. La contaminación del aire, especialmente las partículas respirables, representa un riesgo significativo para la salud pública, lo que requiere estrategias de mitigación. Además, la escasez de agua plantea desafíos adicionales para el desarrollo urbano sostenible, subrayando la importancia del suministro y gestión adecuados del agua en las ciudades para garantizar la habitabilidad y la resiliencia. En respuesta a estos desafíos, se está promoviendo el uso de infraestructuras verdes urbanas, como techos verdes y paredes vivas. Estas

infraestructuras no solo filtran contaminantes del aire y controlan el agua de lluvia, sino que también ayudan a mitigar el efecto de isla de calor urbano, mantienen la limpieza del aire y agua, reducen los costos energéticos en edificaciones y embellecen el paisaje urbano.

El trabajo empleó diversas técnicas de investigación para su desarrollo. Se llevó a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica para recopilar información sobre el estado actual del conocimiento y las investigaciones previas relacionadas con el tema de estudio. Además, se recolectaron datos históricos sobre variables ambientales relevantes, como calidad del aire, agua y clima, de fuentes como registros históricos y bases de datos gubernamentales. Se realizaron recolecciones de muestras de agua y hojas in situ, siguiendo protocolos estandarizados para garantizar la calidad de los datos. Estas muestras fueron analizadas en laboratorio utilizando técnicas analíticas como la microscopía electrónica de barrido y espectrofotometría de absorción atómica. Se desarrolló un modelo predictivo digital para simular el comportamiento del sistema ambiental bajo diferentes escenarios y evaluar estrategias de intervención. Además, se crearon modelos digitales tridimensionales de la propuesta de infraestructura verde para visualizar y analizar la información espacial de las especies vegetales en los componentes del sistema.

Contribuciones y Conclusiones:

Este proyecto de investigación se enfoca en evaluar un sistema innovador de infraestructura verde que combina diversos elementos para proporcionar múltiples beneficios ambientales. A diferencia de investigaciones anteriores centradas en partes individuales, este estudio ofrece una visión integral del impacto de la infraestructura verde a nivel local. Se examina cómo esta infraestructura puede mitigar los efectos del cambio climático utilizando especies vegetales nativas para descontaminar el aire y purificar el agua. Los resultados obtenidos podrían tener un impacto importante en la planificación urbana y la gestión ambiental, impulsando la adopción de políticas públicas que promuevan

la implementación generalizada de infraestructuras verdes. Esto no solo mejorarían la calidad de vida en las ciudades, sino que también contribuirían a la lucha contra el cambio climático.

La investigación ha revelado que la infraestructura verde es una solución efectiva para mejorar la calidad ambiental en ciudades ubicadas en climas áridos y semiáridos, como Monterrey. Los resultados clave son: la infraestructura verde demuestra ser eficaz para mejorar la calidad del aire y reducir el impacto del cambio climático, se han identificado especies locales con un alto potencial para purificar el aire, se ha desarrollado un modelo digital para evaluar cómo la infraestructura verde puede gestionar eficientemente el agua en estas zonas.

Dr. René Alberto Dávila Pórcel
Director de Tesis

Dr. Santiago Iván Suárez Vázquez
Co-Director de Tesis

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contexto y motivación	1
1.1.1 Descripción del problema ambiental:	1
1.1.2 Revisión de la literatura	3
1.2 Formulación del problema de investigación.....	7
1.2.1 Pregunta de investigación.....	7
1.2.2 Hipótesis o tesis doctoral	7
1.2.3 Objetivos de investigación	7
1.3 Metodología	8
1.3.1 Enfoque metodológico	8
1.3.2 Diseño de investigación	9
1.3.3 Técnicas de investigación	11
1.4 Aporte y originalidad de la tesis.....	12
1.5 Estructura de la tesis:.....	12
1.5.1 Descripción de los capítulos	12
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	15
2.1. Contaminación Atmosférica	15
2.1.1. Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA).....	16
2.2.2. Partículas en suspensión en el AMM	18
2.2.3. Fuentes de Contaminación Atmosférica	19
2.2. Infraestructura Verde	20
.....	37
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	46
3.1. Introducción	46
3.1.1. Enfoque metodológico	47
3.2. Adquisición de Datos Históricos	49
3.2.1. Datos Climatológicos	50
3.2.2. Ubicación de pozos de agua subterránea	51
3.2.3. Selección de Especies Vegetales	52

3.2.4. Diseño de Sistema de Infraestructura Verde	54
3.3. Experimentación	60
3.3.1. Deposición seca de PM10 en especies de plantas	60
3.4. Limitaciones del proyecto de investigación	74
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	76
4.1. Análisis climatológico	76
4.2. Identificación y caracterización de pozos de agua subterránea.....	78
4.3. Deposición seca de PM10 en las especies de plantas seleccionadas....	85
4.4. Absorción atómica de calcio, sodio y cobre en el agua del sistema	101
4.5. Sistema integrado de infraestructura verde	110
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	117
5.1 Síntesis de los resultados más importantes	117
5.2 Relación con el marco teórico y la investigación previa.....	118
5.3 Implicaciones de los resultados.....	119
5.4 Limitaciones del estudio	120
5.5 Principales contribuciones de la tesis.....	122
5.6 Conclusión	124
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	126
BIBLIOGRAFÍA:.....	129
APENDICES.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ubicación de las estaciones de Monitoreo de Calidad de Aire (SIMA)	16
Figura 2.2. Días que sobrepasan los límites del promedio diario de PM10 en el AMM	18
Figura 2.3. Sección transversal de un extenso sistema de techo verde representativo que incluye las capas utilizadas habitualmente	22
Figura 2.4: a) Diseño típico de techo verde extensivo (Modificado de Connop, 2013). b) Techo verde extensivo en la planta de Ford, Michigan.	26
Figura 2.5: a) Diseño típico de techo verde intensivo. b) Combinación de techo verde extensivo e intensivo en el Ayuntamiento de Chicago.	27
Figura 2.6: Esquema de comparación de un techo verde extensivo e intensivo	27
Figura 2.7: Capas de un techo verde	28
Figura 2.8. a) Pared viva experimental en la Universidad de Australia del Sur. b) Pared viva modular tipo caja en Xi'an, China.	32
Figura 2.9. Clasificación de Paredes verdes.	34
Figura 2.10. humedal artificial de flujo subterráneo.	37
Figura 2.11. Humedal artificial de flujo superficial.	38
Figura 2.12: Modelación Digital de infraestructura verde	41
Figura 2.13. Variables y Ecuaciones para los Bloques de Modelado Hidráulico	42
Figura 2.14. Variables y Ecuaciones para los Bloques de Modelado Hidráulico	44
Figura 2.15. Procesos para el Modelado de Transporte Reactivo acoplado disuelto y asociado a partículas	45
Figura 3.1. Metodología de la investigación	47
Figura 3.2. Metodología de la Fase 2 para las ubicaciones.	50
Figura 3.3. Trabajo en Software de modelación digital 3D.	58
Figura 3.4. Proceso del Proyecto en Modelo Digital 3D.	59
Figura 3.5. Ubicación del área de estudio.	62

Figura 3.6. a) Render de Prototipo de techo verde. b) Render de Prototipo de pared viva. c) Prototipo construido e instalado con las especies vegetales.	63
Figura 3.7. a) Especies vegetales instaladas. b) prototipo de análisis. c) Capas del módulo de prueba.	64
Figura 3.8. a) Toma de datos climáticos con barómetro / anemómetro. b) Pesaje de muestras. c) Muestras en desecador.	65
Figura 3.9. a) Prototipo de infraestructura verde completo (techo, pared y humedal). b) Prototipo de humedal. c) Agua excretada hacia el prototipo de humedal. ..	67
Figura 3.10. a) Toma de muestras. b) Filtrado de muestras. c) Digestión de muestras. d) Muestras listas para espectrofotómetro de absorción atómica. ..	69
Figura 3.11. Relación entre concentración y absorbancia de los estándares. .	72
Figura 3.12. a) Muestras disueltas. b) Estándares. c) Absorción atómica. d) Cálculo de absorbancias	73
Figura 3.13. Metodología de la Fase 3 para la Modelación Digital (Fuente: Creación Propia).....	73
Figura 4.1. Temperaturas Máximas en el AMM de 1968 a 2018	80
Figura 4.2. Temperaturas Mínimas en el AMM de 1968 a 2018	85
Figura 4.3. Precipitación Pluvial en el AMM de 1968 a 2018 (Fuente: Creación Propia con datos de CONAGUA)	89
Figura 4.4. Concentración de PM10 en el AMM de 2010 a 2019.	76
Figura 4.5. Humedad Relativa en el AMM de 2010 a 2019.	77
Figura 4.6. Radiación solar en el AMM de 2010 a 2019	78
Figura 4.7. Distribución geográfica de los 57 pozos de agua subterránea en el Municipio de Monterrey.	80
Figura 4.8. Caracterización de los Pozos de Agua Subterránea en el Municipio de Monterrey.	81
Figura 4.9. Vistas del terreno del pozo Topo Chico 4.	82
Figura 4.10. Vistas en Perspectiva del Modelo Digital 3D – Pozo Topo Chico 4.	83
Figura 4.11. Corte isométrico del Modelo Digital 3D – Pozo Topo Chico 4.	84
Figura 4.12. Vista en planta del Modelo Digital 3D – Pozo Topo Chico 4.	85

Figura 4.13. Concentración de PM10 en las estaciones Sureste, Centro y Norte 2.	86
Figura 4.14. Relación inversa: Humedad Relativa y Concentración de PM10.	87
Figura 4.15. Relación: Retención de partículas y dirección de vientos.	88
Figura 4.16. Pesos en g/cm ² de deposición seca en muestras de plantas. ...	90
Figura 4.17. Micrografías a) Muestra en blanco de <i>Sedum reflexum</i> . b) Muestra con PM10 capturada en <i>Sedum reflexum</i> . c) Muestra en blanco de <i>Aptenia cordifolia</i> . d) Muestra con PM10 capturado en <i>Aptenia cordifolia</i>	91
Figura 4.18. Contenido de partículas en especies vegetales.	92
Figura 4.19. Las micrografías muestran captura de PM a) <i>Sedum reflexum</i> . b) <i>Dalhia</i> <i>pinnata</i>	94
Figura 4.20. Micrografías. a) <i>Aptenia cordifolia</i> , b) <i>Pennisetum setaceum</i> , c) <i>Trachelospermum jasminoides</i> , d) <i>Lavandula angustifolia</i>	95
Figura 4.21. Análisis de espectro de la muestra de <i>Lavandula angustifolia</i>	97
Figura 4.22. Imagen EDS de la muestra de <i>Dalhia Pinnata</i>	98
Figura 4.23. Imagen EDS de la muestra de <i>Trachelospermum jasminoides</i>	99
Figura 4.24. Presencia de Calcio en muestras procedentes de especies vegetales.	104
Figura 4.25. Presencia de Sodio en muestras procedentes de especies vegetales.	108
Figura 4.26. Transporte de partículas de Calcio.	109
Figura 4.27. Prototipo de sistema integrado de infraestructura verde.	111
Figura 4.28. Niveles de dureza del agua en PPM (NOM127 SSA1 1994)...	112
Figura 4.29. Concentraciones de agua de lluvia respecto a las especies de plantas.	114
Figura 4.30. Sistema de modelo con sustrato y capas y simulación de precipitación con datos reales.	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Ubicación de las estaciones de Monitoreo de Calidad de Aire (SIMA)	17
Tabla 3.1. Principales características de las especies vegetales.....	53
Tabla 3.2. Características de Prototipo de análisis.....	62
Tabla 4.1. Temperaturas Máximas en el AMM de 1968 a 2018.....	77
Tabla 4.2. Temperaturas Mínimas en el AMM de 1968 a 2018.....	82
Tabla 4.3. Precipitación pluvial en el AMM de 1968 a 2018.....	87
Tabla 4.4. Pozos de Agua Subterránea en el Municipio de Monterrey.....	78
Tabla 4.5: Elementos presentes en el aire capturados por las especies de plantas.	102
Tabla 4.6: Concentraciones y absorbancia de los estándares de Cobre.....	105

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto y motivación

1.1.1 Descripción del problema ambiental:

La urbanización es una característica importante del mundo actual, se calcula que para el año 2030, cerca de un 75% de la población mundial se ubicará en las ciudades, esto está transformando los paisajes naturales en áreas de pavimento y edificaciones. Su aumento junto con el cambio climático está dando lugar a un mayor estrés urbano que incluyen efectos negativos como la contaminación del agua y el aire y la escasez de recursos, todo lo cual está afectando significativamente la habitabilidad urbana (Lin, Hagler, Baldauf, 2016).

La contaminación del aire es actualmente un riesgo ambiental de gran importancia para las personas que viven en muchas ciudades del mundo. Entre los contaminantes del aire presentes en las zonas urbanas, las partículas respirables (PM) se asocian con problemas graves de salud, como cáncer de pulmón y mortalidad prematura. Por lo tanto, existe la necesidad de estrategias de mitigación dentro de las ciudades. El factor hídrico es también un elemento clave dentro del desarrollo urbano, pues se está viviendo una época en la que el agotamiento del agua es una realidad. Muchos países ya están experimentando condiciones de

escasez de agua generalizadas y probablemente tendrán que hacer frente a una menor disponibilidad de este recurso en las siguientes décadas. El abastecimiento de las redes de agua urbana, así como la gestión de aguas pluviales son piezas fundamentales para un eficiente desarrollo urbano (Leonard, McArthur, Hochuli, 2016).

Frente a esta problemática, las autoridades han comenzado a fomentar el uso de la vegetación urbana para reducir los efectos de la urbanización sobre el medio ambiente. Las infraestructuras verdes urbanas, como los techos verdes y las paredes vivas, pueden ayudar a reducir las concentraciones de diferentes contaminantes del aire a través del mecanismo de fitofiltración. Para el caso de PM, las partículas suspendidas se depositan o acumulan en las superficies de las hojas. Además, las partículas con un tamaño aerodinámico menor a $0.2 \mu\text{m}$ pueden capturarse permanentemente después de ingresar a través de las estomas. La precipitación, por otro lado, arrastra los contaminantes para que entren en contacto con las raíces, donde ocurre un proceso de depuración (Margareth Viecco, 2018).

También se ha utilizado infraestructura verde para el control de la escorrentía de aguas pluviales en áreas altamente urbanizadas, en donde los flujos de entrada y salida de agua marcar una diferencia entre los techos convencionales y los techos verdes, por ejemplo. La infraestructura verde puede contribuir a los objetivos medioambientales y de habitabilidad urbana, para mitigar el efecto de isla de calor urbano, mantener el aire y el agua limpios y reducir los costos de energía en las edificaciones, mientras ecologizan el paisaje urbano (U.S. Environmental Protection Agency, 2018).

En concreto la problemática ambiental es el aumento de la escorrentía pluvial urbana, la contaminación del aire (PM) y la disminución del nivel freático del agua subterránea en zonas urbanas. Que afecta la habitabilidad urbana, el cambio climático y la calidad del agua. Generando en muchas regiones estrés urbano, enfermedades respiratorias, escasez de agua. El cual se evidencia claramente por:

- 75% de la población mundial vivirá en ciudades para el año 2030 (Lin, Hagler, Baldauf, 2016).
- Las PM se asocian con cáncer de pulmón y mortalidad prematura.
- Muchos países ya experimentan escasez de agua.

1.1.2 Revisión de la literatura

Introducción

El crecimiento urbano desenfrenado ha generado una serie de desafíos ambientales en las ciudades, como la contaminación del aire y del agua, la escasez de recursos hídricos y el aumento de las temperaturas. En este contexto, la infraestructura verde emerge como una alternativa sostenible para mitigar estos impactos y mejorar la calidad de vida en las urbes.

Marco teórico

La infraestructura verde se define como una red interconectada de espacios naturales y seminaturales en el tejido urbano, incluyendo parques, jardines, bosques urbanos, techos verdes y paredes vivas. Estos elementos ofrecen una serie de beneficios ambientales, entre los que se destacan:

- **Mejora de la calidad del aire:** Se demostró que las plantas absorben contaminantes del aire, mejorando la calidad del aire y la salud pública (Viecco, 2021).
- **Control de la escorrentía de agua:** Se evidenció que la infraestructura verde ayuda a absorber y filtrar el agua de lluvia, reduciendo el riesgo de inundaciones y mejorando la calidad del agua (Liu, 2018).
- **Mitigación del efecto isla de calor urbano:** Se corroboró que las superficies vegetadas absorben y evaporan el calor, reduciendo las temperaturas en las ciudades (Wania, 2012).

- **Reducción del consumo de energía:** La infraestructura verde puede ayudar a reducir el consumo de energía en las ciudades al proporcionar sombra y mejorar la ventilación natural.
- **Fomento de la biodiversidad urbana:** La infraestructura verde crea hábitats para diversas especies animales y vegetales, aumentando la biodiversidad en las ciudades.

Impacto de la infraestructura verde en la gestión del agua

Reducción de la escorrentía

Es sabido que la expansión urbana impermeabiliza los suelos, aumentando la escorrentía superficial y reduciendo la recarga de aguas subterráneas. La infraestructura verde, como techos verdes y jardines, reduce la escorrentía al retener y evapotranspirar el agua de lluvia (Mentens, 2006).

Mejora de la calidad del agua

La infraestructura verde pudo mejorar la calidad del agua al filtrar contaminantes y nutrientes del agua de lluvia (Oberndofer, 2007). Sin embargo, su impacto puede variar según el diseño, el mantenimiento y las fuentes locales de contaminación (Hashemi, 2015).

Eficiencia de diferentes tipos de infraestructura verde

Los humedales artificiales son una alternativa eficiente para la gestión del agua, ya que imitan los procesos naturales de los humedales y purifican las aguas residuales (Stefanakis, 2019).

Impacto de la infraestructura verde en la calidad del aire

Retención de partículas contaminantes

Las plantas de la infraestructura verde capturaron partículas contaminantes (PM) y absorben gases nocivos a través de la fitofiltración, la deposición seca y la absorción por las hojas y las raíces (Viecco, 2021).

Mitigación de la contaminación del aire

La infraestructura verde ayudo a mitigar la contaminación del aire urbano al reducir las emisiones de CO₂ y otros contaminantes, y mejorar la calidad del aire (Cohen, 2017).

Importancia de la calidad del aire urbano

La exposición a la contaminación del aire tuvo y tiene graves consecuencias para la salud humana, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La OMS estableció estándares de calidad del aire para proteger la salud pública (OMS, 2018).

Estudio en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM)

El AMM presenta altos niveles de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) en el aire, lo que representa un riesgo para la salud pública y el medio ambiente.

Consideraciones adicionales

Fragmentación del hábitat

La expansión urbana fragmento los hábitats naturales, lo que reduce la biodiversidad. La infraestructura verde puede mitigar este problema al conectar los espacios naturales y crear corredores ecológicos (Meléndez-Jaramillo, 2023).

Importancia de la planificación urbana

La inclusión de la infraestructura verde en la planificación urbana es fundamental para crear ciudades más sostenibles y resilientes.

Conclusiones

La revisión bibliográfica evidencia que la infraestructura verde ofrece una serie de beneficios ambientales que pueden mejorar la calidad de vida en las

ciudades. Se requiere un mayor desarrollo e implementación de la infraestructura verde en las políticas públicas y proyectos urbanos.

Necesidad de investigación:

Como producto de la revisión bibliográfica se logró identificar las áreas que se necesita desarrollar conocimiento científico con el objetivo de lograr un adecuado Desarrollo Urbano Sostenible son:

- 1. Evaluación del impacto a largo plazo:** Se necesitan estudios que evalúen el impacto a largo plazo de la infraestructura verde en diferentes aspectos, como la calidad del aire, el agua y la biodiversidad.
- 2. Desarrollo de indicadores de medición:** Se requiere desarrollar indicadores robustos para medir y monitorear el impacto de la infraestructura verde en el desarrollo urbano sostenible.
- 3. Optimización del diseño y la implementación:** Se necesitan investigaciones que optimicen el diseño, la construcción y el mantenimiento de la infraestructura verde para maximizar sus beneficios y minimizar los costos.
- 4. Integración con la planificación urbana:** Es necesario desarrollar estrategias para integrar la infraestructura verde en la planificación urbana a diferentes escalas, desde el diseño de barrios hasta la planificación regional.
- 5. Investigación en contextos específicos:** Se necesitan estudios que analicen la aplicación de la infraestructura verde en diferentes contextos climáticos, sociales y económicos.
- 6. Desarrollo de soluciones innovadoras:** Se requiere fomentar la investigación y el desarrollo de soluciones innovadoras de infraestructura verde que respondan a los desafíos específicos de cada ciudad.

1.2 Formulación del problema de investigación

1.2.1 Pregunta de investigación

¿Cómo un sistema integrado de infraestructura verde puede contrarrestar los efectos negativos de la contaminación del aire y del agua en las condiciones climatológicas de Monterrey y su impacto en el cambio climático?

1.2.2 Hipótesis o tesis doctoral

Un sistema integrado de infraestructura verde (techos verdes, paredes vivas y humedales) permitirá:

- Capturar partículas suspendidas en el aire.
- Purificar contaminantes del agua tratada.
- Disminuir la escorrentía pluvial urbana.
- Inyectar agua al acuífero para contrarrestar el cambio climático y mejorar la calidad del aire.

1.2.3 Objetivos de investigación

Objetivo General

Analizar el potencial ambiental de un sistema integrado de infraestructura verde completo: techos verdes, paredes vivas y humedales) para contrarrestar los efectos negativos de la contaminación del aire y agua en el Área Metropolitana de Monterrey y su impacto en el cambio climático.

Objetivos Específicos

- Adquirir y procesar datos históricos referentes a concentraciones de PM10 en el aire
 - Recopilar y analizar datos climáticos del Área Metropolitana de Monterrey.
 - Identificar y analizar las especies vegetales locales con potencial descontaminante en techos y paredes verdes.
-

- Analizar datos de deposición seca de contaminantes específicos presentes en el aire del Área Metropolitana de Monterrey.
- Identificar y analizar las especies vegetales locales con potencial descontaminante para humedales.
- Desarrollar modelos digitales tridimensionales de la infraestructura verde propuesta.
- Determinar el impacto que tienen los modelos de infraestructura verde.
- Analizar los resultados obtenidos y su beneficio ambiental.

1.3 Metodología

1.3.1 Enfoque metodológico

Debido a las características propias del problema y al contexto bajo el cual se desarrolla el proyecto, se definió utilizar un enfoque mixto: cuantitativo (datos de PM10, clima y agua) y cualitativo (modelación digital, mapas vectoriales).

El enfoque mixto de la metodología de investigación combina estrategias cuantitativas y cualitativas para obtener una comprensión más completa del fenómeno que se estudia (Creswell, 2014). Este enfoque se basa en la idea de que la triangulación de diferentes tipos de datos puede mejorar la confiabilidad y validez de la investigación (Flick, 2015).

En el caso concreto del presente proyecto de investigación, se definió la combinación de datos cuantitativos, como las mediciones de PM10, clima y calidad del agua, con datos cualitativos, como la modelación digital y los mapas vectoriales. Esta combinación permite realizar un análisis más profundo de la problemática ambiental que se está investigando debido a las características más relevantes del enfoque mixto que son:

- **Complementariedad:** Los datos cuantitativos (PM10, clima, agua) y cualitativos (modelación digital, mapas vectoriales) se integran para brindar una visión completa del problema. Los primeros identifican los principales problemas ambientales, mientras que los segundos profundizan en sus causas y consecuencias.
- **Triangulación:** La convergencia de datos cuantitativos y cualitativos aumenta la confiabilidad de los resultados, verificando su precisión e identificando sesgos.
- **Flexibilidad:** Adaptación a las necesidades del estudio. La combinación de métodos permite abordar la complejidad de los problemas ambientales, facilitando un análisis integral.
- **Profundidad:** Diferentes métodos para una comprensión más profunda del fenómeno. La combinación de datos cuantitativos y cualitativos ayuda a comprender mejor las causas y consecuencias de la contaminación del aire, el cambio climático y la escasez de agua.

1.3.2 Diseño de investigación

Teniendo claro que el diseño de la investigación se define como la estrategia general que se utilizará para recopilar y analizar los datos, con el fin de responder a las preguntas de investigación planteadas se propone un diseño mixto, que combina elementos de investigación experimental y observacional (Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P., 2018).

Enfoque experimental: Se implementarán intervenciones específicas para evaluar su impacto en variables ambientales como la calidad del aire y del agua (Shadish, W. R., Cook, T. D., & Campbell, D. T., 2002). Se utilizarán grupos de control para comparar los resultados de las intervenciones con un escenario sin intervención (Campbell, D. T., & Stanley, J. C., 1966). Se medirán las variables ambientales

antes, durante y después de las intervenciones para evaluar su efecto Finkel, E. J., & Eastwick, P. W., 2020).

Enfoque observacional: Se recopilarán datos preexistentes sobre variables ambientales, como registros históricos de calidad del aire o datos climáticos (Bryman, A., 2016). Se analizarán estos datos para identificar patrones y tendencias ambientales (Miles, M. B., & Huberman, A. M., 1994). Se realizarán estudios de casos para analizar en profundidad la situación ambiental en zonas específicas (Yin, R. K., 2018).

Recolección y análisis de datos: Se utilizarán las siguientes técnicas de recolección de datos toma de muestras de hojas con deposición seca de contaminantes, toma de muestras de agua de lluvia, toma de muestras de agua tratada por el humedal del módulo piloto experimental (Flick, U., 2014). Los datos se analizarán utilizando herramientas de visualización de datos (Tukey, J. W., 1977). Se realizarán análisis comparativos entre diferentes grupos de datos para identificar relaciones significativas (Maxwell, J. A., 2005).

Resultados esperados: Se espera obtener una comprensión más profunda de las causas y consecuencias de los problemas ambientales que genera la calidad deteriorada del aire y del agua de lluvia. Se espera identificar especies vegetales locales efectivas para mejorar la calidad del aire y del agua. Se espera generar recomendaciones para la toma de decisiones en materia de política ambiental.

Consideraciones éticas: Se respetarán los principios éticos de la investigación, como el consentimiento informado (Belmont Report, 1979). Se garantizará que las intervenciones no causen daño al medio ambiente ni a la población circundante al punto de instalación de la estación piloto de investigación (CIOMS, 2016).

Este diseño de investigación mixto permitirá obtener una comprensión más completa de los problemas ambientales e identificar posibles soluciones efectivas para mejorar la calidad del medio ambiente en ciudades con contextos urbanos parecidos al que posee el área Metropolitana de Monterrey.

1.3.3 Técnicas de investigación

Las técnicas de investigación que se emplearon para el desarrollo del presente trabajos se describen a continuación:

Revisión bibliográfica: Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica disponible sobre el tema de estudio, incluyendo artículos de revistas científicas, libros y capítulos de libros, con el objetivo de obtener información sobre el estado actual del conocimiento y las investigaciones previas realizadas (Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P., 2018).

Recolección de datos históricos: Se recopilaron datos históricos sobre las variables ambientales relevantes para el estudio, como la calidad del aire, el agua y el clima, a partir de fuentes como registros históricos, bases de datos gubernamentales y estudios previos (Bryman, A., 2016).

Recolección de muestras: Se recolectaron muestras de agua y hojas del módulo experimental in situ, siguiendo protocolos estandarizados para garantizar la calidad y confiabilidad de los datos (Finkel, E. J., & Eastwick, P. W., 2020).

Análisis de muestras: Las muestras recolectadas fueron analizadas en un laboratorio utilizando técnicas analíticas apropiadas para cada tipo de muestra, con el objetivo de obtener datos precisos sobre las variables ambientales de interés (Flick, U., 2014).

Modelación predictiva digital: Se desarrolló un modelo predictivo digital utilizando herramientas computacionales para simular el comportamiento del sistema ambiental bajo diferentes escenarios, con el objetivo de predecir posibles impactos y evaluar la eficacia de diferentes estrategias de intervención (Tukey, J. W., 1977).

Creación de modelos digitales tridimensionales: Se crearon modelos digitales tridimensionales de la propuesta de infraestructura verde para cada área de estudio para visualizar y analizar la información espacial del emplazamiento de las especies vegetales en los componentes del sistema (Maxwell, J. A., 2005).

1.4 Aporte y originalidad de la tesis

Novedad: Este proyecto de investigación se caracteriza por la evaluación pionera de un sistema integrado de infraestructura verde, el cual combina diferentes elementos de infraestructura verde artificial para brindar múltiples beneficios ambientales (Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N., 2013). A diferencia de estudios previos que se han centrado en componentes individuales, este proyecto ofrece una perspectiva holística del impacto de la infraestructura verde a nivel local.

Valor: La investigación aporta conocimiento crucial sobre la capacidad de la infraestructura verde para mitigar los efectos del cambio climático a nivel local con especies vegetales nativas de la zona, como la descontaminación del aire (Li, H., & Zhou, W., 2020). Además, se analiza la calidad del agua después del tratamiento en la infraestructura verde, lo que permite evaluar su eficacia en la purificación del agua y su potencial para contribuir a la sostenibilidad del recurso hídrico (Wong, T. H. F., & Chen, Y., 2022).

Impacto potencial: Los resultados de la investigación tienen el potencial de generar un impacto significativo en la planificación urbana y la gestión ambiental. La evidencia científica sobre los beneficios de la infraestructura verde puede impulsar la adopción de políticas públicas que fomenten su implementación a gran escala, mejorando la calidad de vida en las ciudades y contribuyendo a la lucha contra el cambio climático (Kabisch, N., & van den Bosch, M., 2017).

1.5 Estructura de la tesis:

1.5.1 Descripción de los capítulos

- **Capítulo 1: Introducción**

- **Contexto y motivación:** Describe la problemática de la contaminación atmosférica y la necesidad de estrategias de recarga de acuíferos, destacando la importancia de la infraestructura verde.
- **Revisión de la literatura:** Presenta investigaciones previas sobre infraestructura verde, su impacto en la calidad del aire y agua, e identifica las brechas de conocimiento.
- **Formulación del problema de investigación:** Plantea la pregunta de investigación, la hipótesis y los objetivos del estudio.
- **Metodología:** Describe el enfoque metodológico, el diseño de investigación y las técnicas a utilizar.
- **Aporte y originalidad:** Expone la novedad de la investigación y su potencial impacto.
- **Estructura de la tesis:** Presenta la organización de los capítulos.
- **Capítulo 2: Marco teórico**
 - **Contaminación atmosférica:** Define el problema, analiza las causas y efectos en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) con base en datos del SIMA, y describe las principales fuentes de emisión.
 - **Infraestructura verde:** Concepto, beneficios ambientales y tipos de sistemas, incluyendo un enfoque de diseño urbano.
- **Capítulo 3: Metodología**
 - **Adquisición de datos históricos:** Detalla la obtención de datos climatológicos, ubicación de pozos de agua y selección de especies vegetales.
 - **Experimentación:** Describe el diseño del sistema de infraestructura verde y la metodología para la medición de la deposición seca de PM10 en las plantas.
- **Capítulo 4: Análisis de resultados**
 - **Análisis climatológico:** Interpretación de los datos del clima relevantes para el estudio.
 - **Caracterización de pozos de agua subterránea:** Identificación y análisis de pozos en el área de estudio.

- **Deposición seca de PM10:** Presentación y análisis de los resultados de la medición en las diferentes especies vegetales.
- **Calidad del agua en el sistema piloto de infraestructura verde:** Calidad del agua, retención de contaminantes y capacidades de depuración del agua del sistema
- **Capítulo 5: Discusión**
 - **Síntesis de resultados:** Resumen de los hallazgos más importantes.
 - **Relación con el marco teórico:** Vinculación de los resultados con la literatura previa.
 - **Implicaciones de los resultados:** Discusión de las consecuencias y aplicaciones prácticas del estudio.
 - **Limitaciones del estudio:** Reconocimiento de las limitaciones y alcances de la investigación.
 - **Contribuciones de la tesis:** Aportes al conocimiento y soluciones al problema planteado.
- **Capítulo 6: Conclusiones**
 - **Conclusiones:** Resumen final de los resultados y su significado.
 - **Recomendaciones:** Propuestas para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Contaminación Atmosférica

La creciente contaminación atmosférica en Monterrey, con graves efectos en la salud humana, exige un análisis urgente. La evidencia científica indica que la ciudad sufre graves problemas de contaminación, con partículas PM10 y PM2.5 que generan irritación en las vías respiratorias, exacerban enfermedades como asma y bronquitis, e incluso aumentan el riesgo de enfermedades cardíacas y cáncer de pulmón (Correia, 2007; Maciejewska, 2020; Khaniabadi, 2019).

Más de dos millones de vehículos circulan en la región, con una alta densidad de tráfico. Los carros predominan (73,4%), lo que refleja la dependencia del automóvil para el transporte diario. Los camiones y furgonetas de carga (23%) también son una parte significativa del parque vehicular (INEGI, 2014).

La calidad del aire en Monterrey es la peor del país por las altas concentraciones de PM, que impactan la salud al penetrar en el tracto respiratorio. Las condiciones socioeconómicas y el crecimiento demográfico de la ciudad han intensificado este problema. La dependencia del consumo de combustibles fósiles para la generación

de energía y el transporte genera contaminantes como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas PM.

Las PM₁₀, con un diámetro menor a 10 micrómetros, se originan por la actividad industrial, de construcción o de transporte. También se forman por la evaporación de aerosoles líquidos, especialmente en áreas con alta actividad industrial o vehicular. El viento, las actividades agrícolas, la deforestación y la erosión del suelo también contribuyen a este proceso. Finalmente, las reacciones químicas de los gases atmosféricos pueden generar PM₁₀.

2.1.1. Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA)

El Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) proporciona información sobre la contaminación ambiental en el Área Metropolitana de Monterrey. Esta información está disponible para la población diariamente.



Figura 2.1 Ubicación de las estaciones de Monitoreo de Calidad de Aire (SIMA)

(Fuente: Creación Propia)

Tabla 2.1. Ubicación de las estaciones de Monitoreo de Calidad de Aire (SIMA)

Estación	Ubicación	Municipio
Sureste	Parque Zoológico “La Pastora”	Guadalupe
Noreste	Col. Unidad Laboral	San Nicolás de los Garza
Centro	Col. Obispado	Monterrey
Noroeste	Col. San Bernabé	Monterrey
Suroeste	Zona Centro	Santa Catarina
Norte	Fraccionamiento Santa Luz	General Escobedo
Noroeste 2	Col. Sierra Real	García
Noreste 2	Col. Centro	Apodaca
Sureste 2	DIF Juárez Col. Centro	Juárez
Suroeste 2	Gimnasio CDI Col. Los Sauces	San Pedro Garza García
Sureste 3	Col. Jerónimo Treviño 2° Sector	Cadereyta
Sur	Centro Comercial Pueblo Serena	Monterrey
Norte 2	Unidad de Posgrado CEDEEM - UANL	San Nicolás de los Garza

Estudios previos identificaron como principales fuentes de PM a las emisiones vehiculares, la actividad industrial y la quema de combustibles fósiles. Un estudio con 60 muestras encontró que el calcio, el carbono orgánico y el sulfato eran

los elementos más presentes en las PM. El SIMA reveló que, en 2014, 2015 y 2016 se sobrepasaron los límites de PM10 en varios días (ver Figura 2.2).

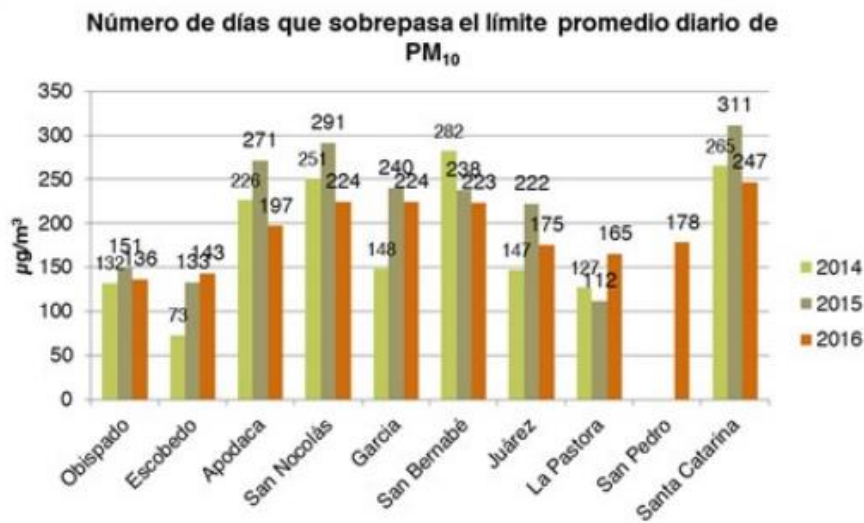


Figura 2.2. Días que sobrepasan los límites del promedio diario de PM10 en el AMM

(Recuperado de: Centro Mario Molina, 2019).

La red de monitoreo atmosférico en Monterrey comenzó en 1970 con 12 equipos manuales. En 1992, se adquirió una red automática con cinco estaciones para medir diversos contaminantes y variables meteorológicas (ProAire, 2016).

2.2.2. Partículas en suspensión en el AMM

Diversos estudios desde la década de 1990 han analizado las PM10 en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM). Un inventario de emisiones de 1995 reveló que las principales fuentes de contaminación en la región son las emisiones vehiculares, la actividad industrial y la quema de combustibles fósiles.

Investigaciones relevantes han encontrado que los niveles de PM10 exceden los límites normativos. Entre 1993 y 1998, esto ocurrió en 217 días (Cardona-Carrizalez, 1999). En 2005, se registraron 68 días con niveles de PM10 por encima de lo permitido, con mayor presencia de partículas pequeñas y HAP's por debajo

del límite de detección (Sánchez-Martínez, 2006). La zona suroeste del AMM es la más afectada por PM10, con mayor concentración en invierno, entre jueves y viernes, y entre las 8:00 y 10:00 horas (González-Santiago, 2011).

Un estudio de 2023 encontró un aumento en PM10 y PM2.5 en las últimas dos décadas, mientras que CO, NO2 y SO2 se mantienen dentro de los límites normativos. Se recomienda un monitoreo constante y medidas para mejorar la calidad del aire.

2.2.3. Fuentes de Contaminación Atmosférica

A. Fuentes Fijas

Las fuentes fijas son responsables de la mayor parte de las emisiones de PM2.5 y SO2. Las actividades que generan estas emisiones incluyen el transporte de carga, los viajes en automóviles, y los procesos de combustión que utilizan carbón. Los sectores que más contaminan son el petrolero y petroquímico, el químico, la construcción, el cemento y la cal, y la extracción de materiales no metálicos. (SEMARNAT, 2018, AIDA, 2020).

B. Fuentes Móviles

Las emisiones de las fuentes móviles dependen del tipo de combustible que usan los vehículos. El diésel produce más PM y SO2, mientras que la gasolina genera más NOx y COVs. Los principales emisores de fuentes móviles son los vehículos de carga, los automóviles particulares y los autobuses. Modernizar la flota de transporte público reduciría su impacto ambiental y mejoraría la calidad del aire. (SEMARNAT, 2018, FAMM, 2020).

C. Emisiones de fuentes de área y fijas en el AMM

Las fuentes de área y fijas también son importantes fuentes de contaminación en el AMM. Las fuentes de área son responsables de la mayor parte de las emisiones de PM10 y COVs, mientras que las fuentes fijas son responsables de la mayor parte de las emisiones de SO2. Los principales responsables de la contaminación por SO2 son la industria del petróleo y la industria química. Los principales responsables de la contaminación por NOx son la industria del vidrio, el asfalto, el petróleo y la química. La construcción y las vialidades urbanas son los principales responsables de la contaminación por PM (SEMARNAT, 2018, FAMM, 2020).

Reducir las emisiones de todas estas fuentes es crucial para mejorar la calidad del aire en el AMM.

2.2. Infraestructura Verde

La infraestructura verde es una red planificada de áreas verdes en las ciudades que mejora la calidad de vida, la biodiversidad y la adaptación al cambio climático. Esta red incluye parques, jardines, bosques urbanos y otros espacios verdes conectados entre sí (Mell, 2008, Lennon, 2014, Wright, 2011, Benedict y McMahon, 2006)

La planificación urbana es crucial para aprovechar al máximo los beneficios de la infraestructura verde. Esto implica crear un sistema de gestión urbana que la integre en todas las etapas del proceso de planificación y desarrollo. También es necesario considerarla como una parte integral del tejido urbano y fomentar la colaboración entre diferentes actores como gobiernos locales, planificadores, desarrolladores, comunidades y sociedad civil (Janiszek, 2023, Defra y Natural England, 2013, Mollinga, 2010, Mell, 2008, Saura, 2014, CE, 2013, CE, 2012).

2.2.1. Nuevo enfoque de diseño urbano

La infraestructura verde en edificios, como techos verdes y muros vivos, es un nuevo enfoque del diseño urbano para resolver problemas en las ciudades. Son claves en sistemas urbanos sensibles al agua y su desarrollo ha aumentado en los últimos años (Beecham, 2018).

La transformación de bosques en zonas urbanas de Australia ha modificado el ciclo del agua. La infraestructura verde busca crear ciudades más habitables, competitivas y resilientes al cambio climático (ANZECC, 2000).

La infraestructura verde se aplica en diferentes escalas del desarrollo urbano, desde viviendas hasta áreas industriales y terrenos públicos. Algunas tecnologías comunes son techos verdes, paredes vivas y humedales. Estas tecnologías mejoran la calidad del agua, disminuyen el riesgo de inundaciones y aumentan la biodiversidad en las ciudades. Algunos de los principales beneficios que trae la infraestructura verde son:

de retención de agua (VanWoert, 2005; Villarreal y Bengtsson, 2005).

A. Reducción de escorrentía de aguas pluvial

La infraestructura verde reduce la escorrentía de aguas pluviales. Una parte del agua se captura en la vegetación y se evapora o se libera a la atmósfera por transpiración. Kolb (2004) indica que hasta un 45% de la lluvia puede reciclarse así. La infraestructura verde puede reducir la escorrentía entre un 60% y un 100%. La capacidad de retención de agua en techos verdes depende de varios factores, como la profundidad del sustrato, la composición y las especies de plantas, la intensidad y la duración de las precipitaciones. Comprender estos factores es clave para optimizar la retención de agua en techos verdes (DeNardo, 2005; Liescke, 1998; Moran, 2004; Rowe, 2003; VanWoert, 2005).

El efecto de la pendiente en la retención de agua en techos verdes no es concluyente. Algunos estudios no encontraron diferencias en la retención

entre diferentes inclinaciones, mientras que otros sugieren que una mayor pendiente aumenta la escorrentía. Esta discrepancia se debe a las variaciones en los patrones de lluvia. Por lo tanto, es importante considerar las condiciones climáticas locales al diseñar techos verdes (Schade, 2000; Liesecke, 1998). La retención de agua en techos verdes es compleja y requiere considerar diversos factores de diseño y ambientales para optimizar su rendimiento. Se necesitan más investigaciones para mejorar las prácticas de diseño y gestión (Connelly y Liu, 2005; Villarreal y Bengtsson, 2005).

Las condiciones del sustrato antes de la lluvia influyen en la retención de agua en techos verdes. Un sustrato seco retiene más agua que uno húmedo. Por lo tanto, es importante gestionar la humedad del sustrato para maximizar la eficiencia

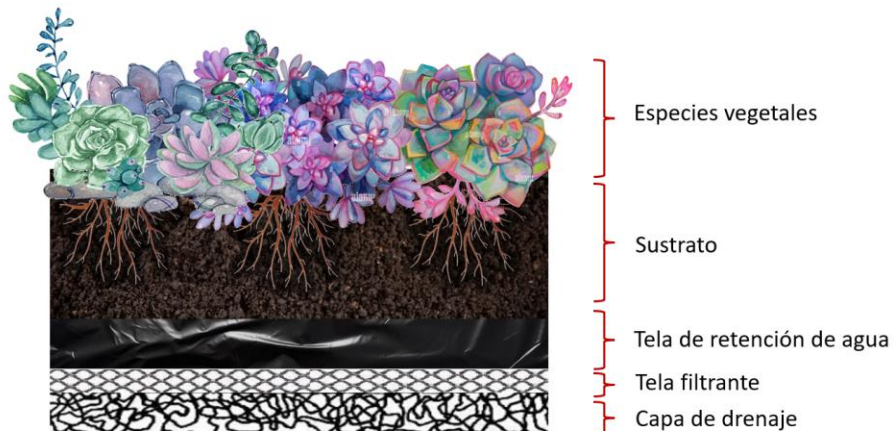


Figura 2.3. Sección transversal de un extenso sistema de techo verde representativo que incluye las capas utilizadas habitualmente

(Modificado de Kristin, 2006)

B. Mitigación de la contaminación del aire

La infraestructura verde ofrece una solución innovadora para combatir la contaminación del aire en entornos urbanos al aprovechar la capacidad

natural de las plantas para filtrar partículas y contaminantes gaseosos. Este proceso comienza cuando las plantas capturan partículas y contaminantes gaseosos del aire a través de sus hojas y tallos durante la fotosíntesis y otros procesos metabólicos. Con el tiempo, estas partículas se depositan en el suelo debido al movimiento del agua de lluvia, mientras que algunos contaminantes son absorbidos por los tejidos vegetales.

También, reduce la contaminación del aire. Un estudio en Alemania encontró que la vegetación reduce la contaminación por motores diésel. Otra investigación reveló una reducción del 37% en dióxido de azufre y del 21% en ácido nítrico sobre un techo verde nuevo (Liesecke y Borgwardt, 1997; Yok Tan y Sia, 2005).

Es una solución sostenible y efectiva para combatir la contaminación atmosférica. Integrar techos verdes en el diseño urbano crea entornos más saludables y sostenibles para las comunidades. Ya que mejora la salud pública al reducir la contaminación del aire. Los techos verdes pueden eliminar hasta 0,2 kg de partículas de polvo por año por metro cuadrado (Peck y Kuhn, 2001).

La contaminación del aire por partículas tiene graves efectos para la salud. Provoca problemas respiratorios, reduce la función pulmonar y aumenta las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Además, aumenta la morbilidad respiratoria y la mortalidad por enfermedades cardiopulmonares (Pope, 1995).

La infraestructura Verde mejora la calidad del aire y la salud pública al reducir las partículas de polvo y otros contaminantes. Contribuyen al bienestar de las comunidades urbanas y son una estrategia efectiva para combatir la contaminación del aire en las ciudades contaminadas.

La infraestructura verde es fundamental para crear ciudades sostenibles. Ofrece funciones y servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación del clima, la purificación del aire y del agua, y la protección de la biodiversidad. Su diversidad determina las funciones que puede ofrecer. Además, contribuye al reciclaje de recursos naturales y mejora la calidad del entorno urbano (Shao, 2022).

C. Valor estético mejorado

La conexión con la naturaleza, especialmente con plantas y entornos naturales, mejora la salud y el bienestar. Reduce el estrés, la presión arterial y la tensión muscular, y aumenta los sentimientos positivos. Esto mejora la salud y la productividad (Ulrich y Simmons, 1986).

Los empleados con vistas a la naturaleza experimentaron menos estrés, mayor satisfacción laboral y menos enfermedades (Kaplan, 1988). Además, los pacientes con vistas a la naturaleza durante la recuperación de una cirugía se recuperaron mejor y más rápido (Ulrich, 1984).

Los entornos verdes tienen beneficios económicos. Los propietarios de edificios con vistas naturales pueden aumentar las tarifas de arrendamiento, y los hoteles pueden cobrar más por habitaciones con vistas panorámicas. Esto refleja el valor que las personas dan a la salud y el bienestar que ofrecen los entornos verdes.

2.2.2. Clasificación de la infraestructura verde

La infraestructura verde se clasifica en techos verdes, paredes vivas y humedales. Cada tipo tiene características únicas que ofrecen beneficios a las ciudades. Los techos verdes regulan la temperatura, las paredes vivas purifican el aire y los humedales filtran el agua. En conjunto, la infraestructura

verde aumenta la sostenibilidad y resiliencia de las ciudades, y aporta beneficios ambientales, sociales y económicos a sus habitantes.

A. Techos verdes

Los techos verdes son una solución innovadora para mejorar el confort térmico en las ciudades. Reducen la carga de refrigeración en los edificios (hasta un 70%) y la temperatura interior (hasta 15 °C) (Mihalakakou, 2013). Además, ofrecen beneficios ambientales como la gestión de aguas pluviales, servicios ecosistémicos, protección de la biodiversidad y mitigación del cambio climático. La investigación científica sobre techos verdes ha aumentado en los últimos años (Ying, 2021).

a. Techos verdes extensivos

Los techos verdes extensivos son una solución versátil para integrar áreas verdes en ciudades. Son estructuras livianas de bajo mantenimiento, con una capa vegetal autóctona y resistente a la sequía que se auto-siembra. Requieren poca o ninguna irrigación (Bemdtsson, 2010; Fassman y Simcock, 2012). Son ideales para cubiertas con pendientes entre 2% y 33%. Son ligeros y fáciles de instalar en estructuras existentes, simplificando el proceso y reduciendo costos e impacto en la infraestructura. La figura 2.4 muestra un ejemplo con cubierta vegetal baja y adaptabilidad a diferentes estructuras.



Figura 2.4: a) Diseño típico de techo verde extensivo (Modificado de Connop, 2013). b) Techo verde extensivo en la planta de Ford, Michigan.

b. Techos verdes intensivos

Los techos verdes intensivos son más robustos y versátiles que los extensivos. Su mayor profundidad de sustrato (más de 150 mm) permite una mayor diversidad de vegetación, incluyendo arbustos, áreas de césped e incluso árboles (FLL, 2002). Requieren un mantenimiento regular (riego, desyerbado y fertilización) para la salud de las plantas. A pesar de esto, ofrecen más posibilidades de diseño y uso que los techos extensivos (Berndtsson, 2008). También ofrecen beneficios ambientales (retención de agua y reducción del efecto isla de calor) y sociales (áreas recreativas para residentes). La figura 2.5 muestra un ejemplo con diversidad de vegetación y uso multifuncional del espacio.

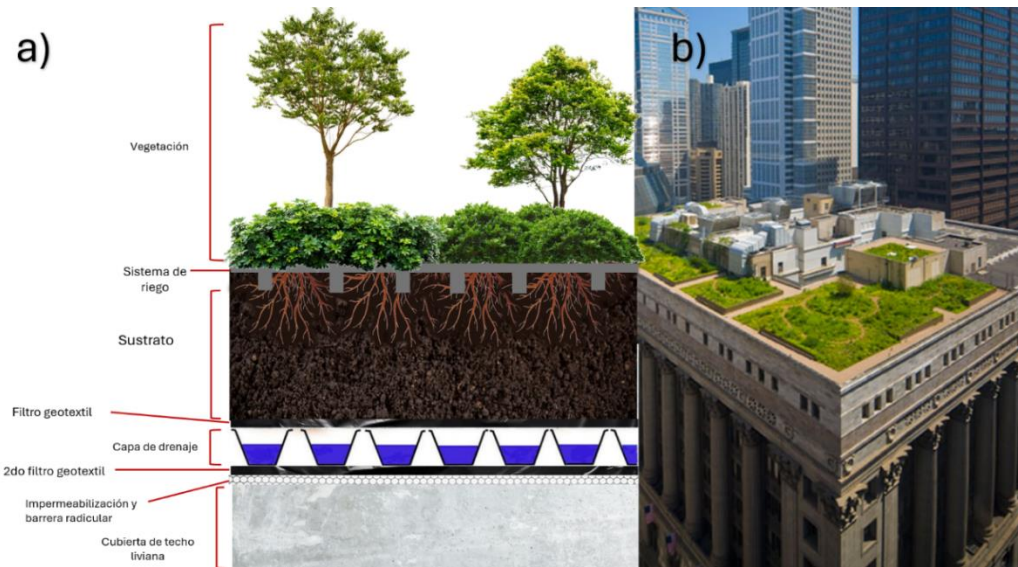


Figura 2.5: a) Diseño típico de techo verde intensivo. b) Combinación de techo verde extensivo e intensivo en el Ayuntamiento de Chicago.

(Modificado de Coutinho, 2021).

La figura 2.6 compara dos tipos de techos verdes: intensivo y extensivo. El intensivo tiene mayor profundidad de sustrato y permite una vegetación más diversa (arbustos, césped, árboles). El extensivo tiene menor profundidad y una vegetación más rala y de bajo mantenimiento.

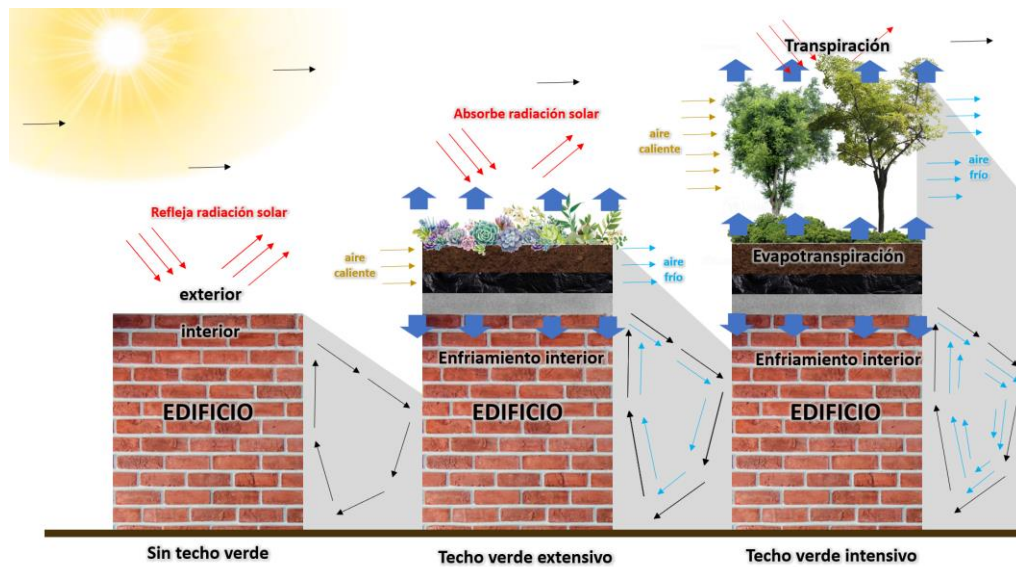


Figura 2.6: Esquema de comparación de un techo verde extensivo e intensivo

(Modificado de Zhang, 2019).

La figura 2.7 muestra las capas de un techo verde:

- Capa base impermeable: protege la estructura del techo.
- Capa de drenaje y filtración: elimina el exceso de agua y la purifica.
- Membrana de retención de raíces: evita que las raíces dañen la estructura.
- Sustrato: proporciona soporte y nutrientes a las plantas.
- Capa de vegetación: composta de plantas y/o césped.
- Cada capa cumple una función específica para el crecimiento de la vegetación y la gestión del agua.

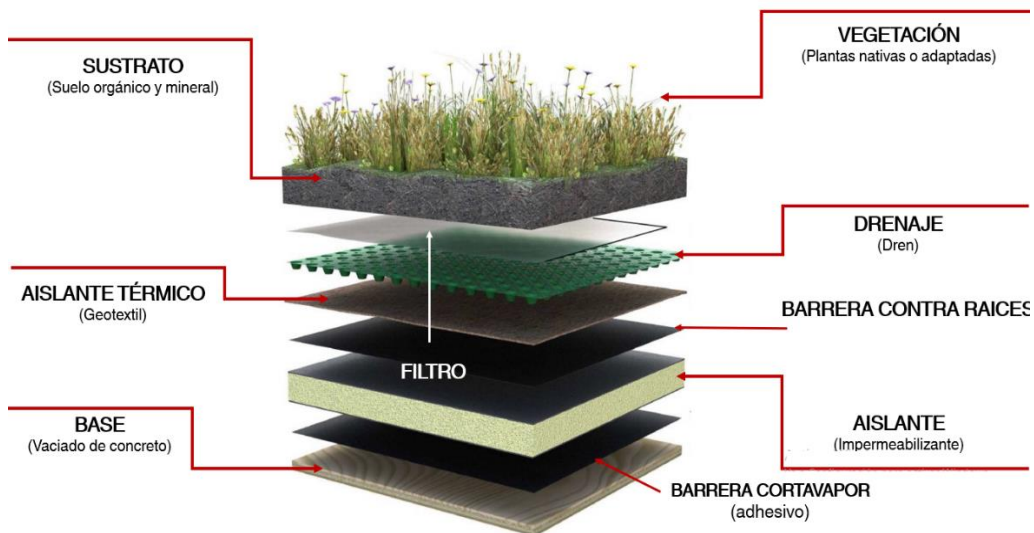


Figura 2.7: Capas de un techo verde

(Modificado de Zhang, 2019).

c. Elementos de los techos verdes

c.1. Vegetación

La capa de vegetación en un techo verde es crucial para su éxito. Esta capa: aporta funcionalidad al techo verde y asegura el éxito del proyecto. Para elegir la vegetación, se debe considerar: el clima regional, el sustrato adecuado y el riego apropiado. (Oberndorfer, 2007; Rowe, 2012) Al elegir plantas para techos verdes, hay que considerar: Estrés del viento por edificios altos. Visibilidad y accesibilidad. Clima. Se puede usar *Sedum* en climas adversos, pero hay muchas otras opciones. Desde 1980, se han probado muchos tipos de plantas en diferentes condiciones de techos (Durhman, 2004; Monterusso, 2005).

Heinze (1985) estudió la vegetación en techos verdes. Analizó diferentes combinaciones de plantas y profundidades de sustrato: El *Sedum* de crecimiento lento prosperó en sustratos delgados. La hierba y las hierbas tuvieron un mejor rendimiento en sustratos más profundos.

c.2. Sustrato

Los sustratos de cultivo son fundamentales para el éxito de los techos verdes. Son la base que soporta la vegetación y deben cumplir con varios requisitos para que las plantas crezcan bien y el sistema funcione a largo plazo. Los sustratos de cultivo ideales para techos verdes son ligeros, tienen buen drenaje y retienen la humedad. También deben resistir la degradación biológica para mantener su estructura (Getter & Rowe, 2006).

Un sustrato ideal para techos verdes se compone de:80-90% de AIL (agregado inorgánico ligero).10-20% de MO (materia orgánica). El AIL: Es un medio poroso. Facilita el intercambio de agua y gases. La MO: Suministra y retiene nutrientes. Promueve una ecología beneficiosa para las raíces (Friedrich, 2005; Fassman & Simcock, 2012).

c.3. Barrera contra raíces

Las barreras contra las raíces son importantes para los techos verdes. Protegen la membrana impermeabilizante del techo al evitar que las raíces de las plantas la dañen. Un tipo común de barrera es una lámina de polietileno. Se coloca sobre la membrana impermeabilizante y crea una barrera física contra las raíces. Las barreras contra las raíces son esenciales para los techos verdes. protegen la estructura del techo, prolongan su vida útil y evitan daños por las raíces.

Las barreras contra las raíces no solo detienen las raíces, también resisten ácidos que se forman cuando las plantas se descomponen. Esto las hace durar más tiempo. A veces se instalan láminas de separación entre la capa de impermeabilización y la barrera contra las raíces. Estas láminas: Protegen aún más la impermeabilización. Evitan que haya problemas entre los materiales (Green Roof Australia, 2010; Carpenter, 2014).

c.4. Capa de drenaje

La capa de drenaje de un techo verde elimina el exceso de agua de lluvia y la reutiliza en el riego. Hay dos tipos de sistemas de drenaje:

- Drenajes agregados: Las capas de drenaje en techos verdes de menos de 100 mm drenan libremente. Las capas más profundas pueden retener agua usando capas de textura. Los materiales utilizados para las capas son: Grava. piedra pómez. arcilla expandida. Pizarra y materiales reciclados (tejas, ladrillos).
- Drenajes geocompuesto: Son diferentes a los agregados. Se componen de dos o más materiales, uno de ellos un geosintético (Carpenter, 2014; Wingfield, 2005). Suelen ser de polietileno de alta densidad, lo que les permite soportar peso y drenar agua. Dependiendo del producto, pueden soportar incluso el tráfico de vehículos. Además, duran hasta 50 años.

Se pueden usar juntos o separados, como indica Wingfield (2005); la capa de drenaje es crucial para los techos verdes. Permite gestionar el agua de lluvia y reutilizarla en el riego. Elegirla e instalarla correctamente es fundamental para que el techo verde funcione y dure.

c.5. Capa de aislamiento o alfombra de protección

Las capas de protección son cruciales para la membrana impermeable de los techos verdes. Protegen la membrana durante la instalación y el mantenimiento, y actúan como barrera contra daños en la estructura del edificio (Pérez, 2020; García, 2022). La capa de protección defiende contra la humedad y daños mecánicos, asegurando la integridad del techo verde y la estructura del edificio. Las fibras sintéticas densas, como el poliéster y el polipropileno, son las más usadas para las capas de protección. Son impermeables y permeables al agua, lo que protege del agua y permite su flujo (Pérez, 2020; García, 2022).

d. Estructura del techo verde

Los techos verdes se pueden instalar en diversos tipos de techos, considerando seguridad y capacidad de carga. Son más comunes en terrazas de concreto por su integridad estructural, facilidad de diseño, durabilidad y comodidad (Carpenter, 2014).

Los techos verdes son versátiles, pero obtener planos estructurales de edificios existentes, especialmente con más de 10 años, puede ser difícil (Munby, 2005). Por eso, se recomienda un estudio estructural para evaluar la capacidad de carga del techo antes de instalar un techo verde (Castleton, 2010). El análisis estructural es fundamental para la seguridad y el éxito de un techo verde. Permite garantizar la seguridad del edificio y la viabilidad del proyecto, maximizando sus beneficios.

B. Paredes vivas

Las paredes vivas son sistemas verticales cubiertos de plantas que integran la naturaleza en las ciudades. Ofrecen beneficios ambientales, como la reducción del efecto isla de calor y la mejora de la calidad del aire. También tienen beneficios sociales, como la creación de espacios verdes y la mejora del bienestar humano. Además, son una alternativa económica para mejorar la estética de las ciudades.

Existen dos tipos de paredes vivas:

- Directas: la vegetación se enraíza en el suelo y crece en la pared.
- Indirectas: las plantas trepadoras crecen en enrejados sin adherirse al edificio.

Las paredes vivas se adaptan a diferentes contextos, desde fachadas verdes en Europa hasta paredes vivas en Asia.

Las paredes vivas son una solución innovadora para mejorar la calidad de vida en las ciudades. Promueven la biodiversidad, la eficiencia energética y el bienestar humano. Su creciente popularidad refleja el interés en integrar la naturaleza en el diseño urbano contemporáneo y abordar los desafíos ambientales globales ((Ying, 2021, Mihalakakou, 2013).

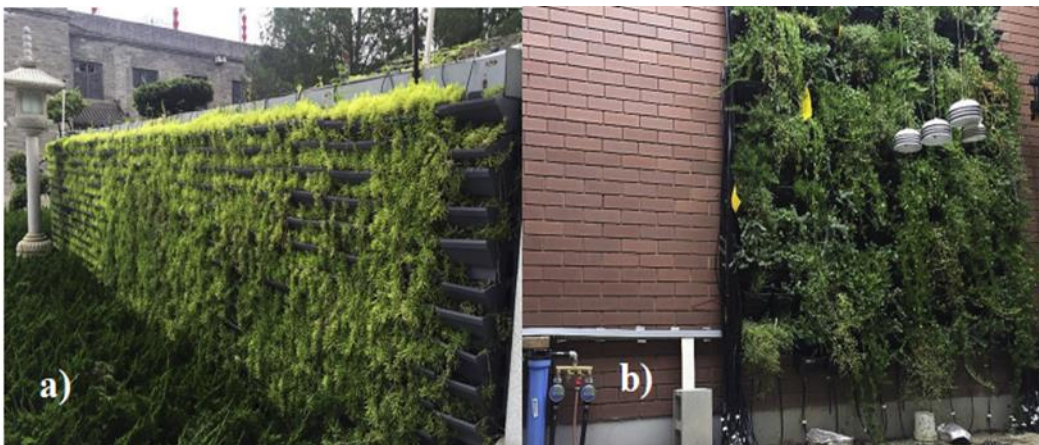


Figura 2.8. a) Pared viva experimental en la Universidad de Australia del Sur. b) Pared viva modular tipo caja en Xi'an, China.

a. Elementos de la pared viva:

Elegir una pared verde en climas secos implica considerar varios factores:

- **Diseño y rendimiento:** Elegir entre fachadas verdes y muros vivos impacta en la estética, la eficiencia energética y los costos.
- **Costos:** La instalación y el mantenimiento de las fachadas verdes son menos complejos que los de los muros vivos. Sin embargo, los beneficios de los muros vivos son inmediatos, mientras que en las fachadas verdes la poda comienza 4 años después de la instalación (Perini & Rosasco, 2013).
- **Elección de plantas y sustratos:** Deben adaptarse al clima y maximizar los beneficios.
- **Necesidades locales:** Considerar las condiciones climáticas, la disponibilidad de agua y los objetivos específicos del proyecto.

Un análisis cuidadoso de estos factores garantiza que la pared verde elegida cumpla con sus objetivos ambientales, estéticos y funcionales de manera efectiva y sostenible.

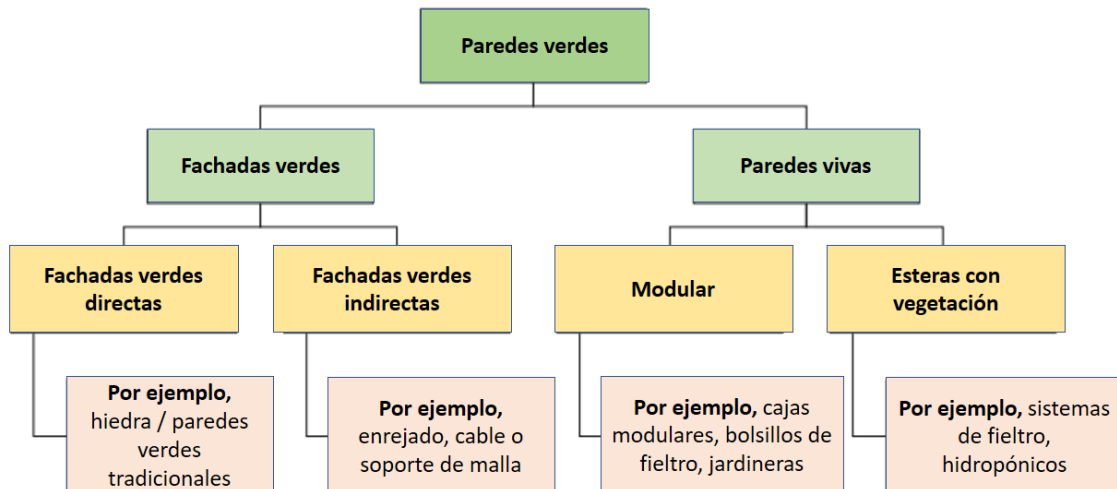


Figura 2.9. Clasificación de Paredes verdes.

b. Vegetación

La vegetación en un muro verde no solo reviste el edificio, sino que también aporta beneficios como la regulación de la temperatura y el microclima mediante procesos de transpiración (Stav y Lawson, 2012).

La elección de plantas para un muro verde depende de la orientación del edificio, el clima local y busca bajo mantenimiento y beneficios de enfriamiento. Se prefieren plantas nativas y de hoja perenne por su bajo mantenimiento y mayor vida útil. La cobertura del dosel, el grosor y la morfología de la planta son clave para obtener los beneficios de enfriamiento deseados (Cameron, 2014; Manso y Castro-Gomes, 2015; Stav y Lawson, 2012).

Además de la selección de plantas, la altura de la vegetación, la reflectividad y la emisividad de las hojas también aportan beneficios de enfriamiento. La flexibilidad en la elección de plantas permite crear diseños atractivos, lo que hace que estos sistemas sean populares entre diseñadores y residentes de edificios (Manso y Castro-Gomes, 2015).

Las paredes vivas ofrecen mayor variedad de métodos de cultivo y plantas que las fachadas verdes, limitadas a plantas trepadoras (Perini y Rosasco, 2013; Mårtensson, 2014). Las plantas perennes y nativas minimizan el mantenimiento y el consumo de agua, siendo una mejor opción a largo plazo (Natarajan, 2014).

c. Sustrato de cultivo:

La investigación sobre sustratos para paredes vivas es limitada, pero crucial para el crecimiento de las plantas y el desarrollo del sistema. Se necesita más investigación para optimizar el rendimiento de las paredes vivas.

Los sustratos más comunes para paredes vivas son lana de roca, bonote, turba, tierra para macetas y medios hidropónicos. Se prefieren materiales ligeros por el peso que añade la vegetación (Jørgensen, 2014; Weinmaster, 2009).

La selección de un sustrato adecuado es crucial para el crecimiento de las plantas y la estabilidad de la pared viva. Se necesitan nuevos materiales y técnicas para mejorar el rendimiento de los sustratos.

C. Humedales

Los humedales artificiales son una alternativa efectiva, sostenible y económica para la purificación del agua. Eliminan contaminantes mediante procesos físicos, biológicos y químicos, mejorando significativamente la calidad del agua (Stefanakis, 2014).

Ofrecen beneficios económicos y ecológicos en la purificación del agua, siendo útiles para el tratamiento de aguas residuales. Replican la función purificadora de los humedales naturales y son más eficientes en el control de inundaciones, aguas pluviales y la restauración de la biodiversidad (Mander, 2002 (Masi, 2018; Stefanakis, 2014; Knight, 2001; Masi, 2016).

Su diseño flexible los hace adaptables a las necesidades de cada entorno, integrándose fácilmente en entornos urbanos. Son una herramienta atractiva para planificadores, ingenieros y arquitectos paisajistas (Masi, 2018; Stefanakis, 2014; Knight, 2001; Masi, 2016).

Los humedales artificiales representan un avance en la ingeniería ecológica, ofreciendo una solución viable para los desafíos del agua. (Masi, 2018; Stefanakis, 2014; Knight, 2001; Masi, 2016).

a. Humedales de flujo subterráneo

Los humedales de flujo subterráneo son una solución innovadora para el tratamiento de aguas residuales. Se basan en un sustrato de grava o arena con plantas apropiadas. El agua fluye por debajo del suelo, donde se purifica por filtración y biopelículas.

Los humedales de flujo subterráneo purifican el agua mediante dos mecanismos principales:

- Filtración física: El agua atraviesa grava o arena, reteniendo partículas y contaminantes.
- Biopelículas: Microorganismos en las biopelículas descomponen la materia orgánica y metabolizan contaminantes, mejorando la calidad del agua.

Los humedales de flujo subterráneo son una alternativa natural y eficaz para el tratamiento de aguas residuales. Utilizan procesos biológicos y físicos para purificar el agua antes de reintegrarla al medio ambiente.

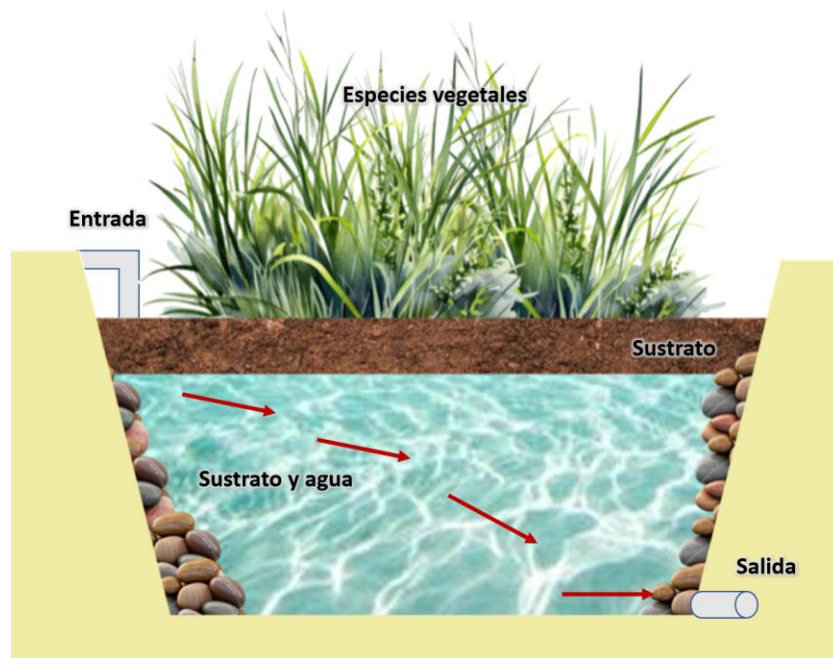


Figura 2.10. humedal artificial de flujo subterráneo.

(Modificado de: Li, 2014).

Los humedales de flujo subterráneo se dividen ampliamente en dos grupos:

a.1. Humedales subterráneos de flujo horizontal

Los humedales subterráneos de flujo horizontal (HF-SSWs) son una forma efectiva de tratar aguas residuales (Masi & Stefanakis, 2016). El agua fluye a través de una cuenca de grava plantada, donde se purifica naturalmente antes de ser liberada al medio ambiente (Vymazal, 2005).

Los humedales de flujo horizontal limpian y descontaminan el agua (Kadlec & Wallace, 2009). El agua contaminada se distribuye en una cuenca de grava con plantas. A medida que fluye, se limpia por procesos físicos, químicos y biológicos (Cooper et al., 2009).

La grava en los HF-SSWs filtra el agua, reteniendo partículas y sedimentos (Vymazal, 2005). Las plantas y sus biopelículas descomponen los contaminantes (Masi & Stefanakis, 2016). El flujo horizontal aumenta el contacto del agua con el sustrato, mejorando la limpieza (García & Mujeriego, 2007). El agua tratada se libera al medio ambiente con mejor calidad, reduciendo el impacto ambiental de los efluentes (Kadlec & Wallace, 2009).

a.2. Humedales subterráneos de flujo vertical

Los humedales de flujo vertical (VF-CWs) son una forma eficaz de tratar aguas residuales (Kadlec & Wallace, 2009). El agua fluye de arriba abajo por una cuenca de grava plantada, donde se purifica naturalmente (Vymazal, 2015).

La grava en los VF-CWs retiene sólidos y sedimentos (García & Mujeriego, 2007), mientras que las plantas y sus biopelículas descomponen los contaminantes

(Brix, 1994). El flujo vertical permite una mayor exposición al tratamiento y una distribución uniforme del agua (Kadlec & Wallace, 2009).

El agua tratada en los VF-CWs se libera al medio ambiente con una calidad mejorada (García & Mujeriego, 2007). Este sistema es rentable y sostenible, ya que aprovecha los procesos naturales para mejorar la calidad del agua (Cooper et al., 2009).

b. Humedales de flujo superficial

Los humedales de flujo superficial (SF-CWs) son una forma eficaz y natural de tratar aguas residuales y pluviales (Kadlec & Wallace, 2009). Se basan en una densa cobertura de plantas y procesos biológicos para mejorar la calidad del agua (Vymazal, 2015). El agua fluye entre las plantas, donde las bacterias y otros microorganismos descomponen los contaminantes (Mitsch & Gosselink, 2007).

Este sistema es sostenible, rentable y beneficioso para el medio ambiente (Cooper et al., 2009). Además de limpiar el agua, crea hábitats para la vida silvestre y mejora el paisaje (García & Mujeriego, 2007).

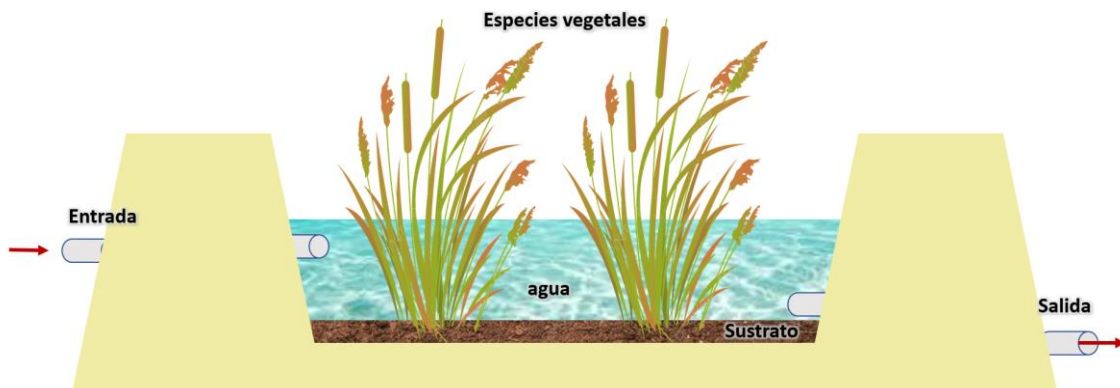


Figura 2.11. Humedal artificial de flujo superficial.

(Modificado de: Li, 2014).

c. Descontaminación con humedales

Los humedales son una solución efectiva y sostenible para descontaminar agua. Combinando plantas y controlando el flujo del agua, los humedales reducen la concentración de contaminantes en aguas residuales, pluviales y desechos agrícolas. Estudios científicos han demostrado la eficacia de los humedales para eliminar contaminantes. Un estudio de dos años sobre un humedal para el tratamiento de aguas residuales de una fábrica de papel mostró una reducción del 32% en DBO, 46% en TSS, 70% en amoníaco, 35% en nitrógeno orgánico y 19% en fósforo (Obarska-Pempkowiak et al., 2015). Otro estudio sobre humedales artificiales demostró que eliminan el 50% de la materia orgánica y reducen la demanda química de oxígeno. En otro estudio sobre humedales artificiales demostró que: Eliminan el 50% de la materia orgánica. Reducen la demanda química de oxígeno. Estos resultados indican que los humedales son eficaces para eliminar contaminantes del agua y mejorar su calidad (Romero, 2007).

Estos resultados demuestran la eficacia de los humedales para eliminar contaminantes del agua residual (Obarska-Pempkowiak, Gajewska, Wojciechowska, Pempkowiak, 2015)

Los humedales artificiales son una buena opción para el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, para que funcionen bien, es importante considerar los regímenes hidrológicos locales (Guntenspergen, Keough, Allen, 1993).

Los humedales artificiales son una herramienta versátil para descontaminar y tratar agua de forma sostenible. e pueden usar para proteger el medio ambiente y conservar el agua.

2.3. Modelo Flexible de Infraestructura Verde (GifMood):

El Modelo Flexible de Infraestructura Verde (GifMood) es una herramienta fundamental para evaluar el rendimiento de la infraestructura verde en la gestión de aguas pluviales (García-Jaramillo et al., 2019). Se basa en tres niveles

interconectados: el sistema hidráulico, el transporte de partículas y el destino y transporte de los componentes (Montalbán-Arboleda & Restrepo-Betancur, 2020).

Para construir el modelo GifMood, se consideran variables como estanques, corrientes, flujo terrestre, suelo no saturado, medios saturados y almacenamiento (Restrepo et al., 2018). El modelo se compone de bloques que representan cada componente, como tuberías o estanques. Estos bloques se interconectan, permitiendo flexibilidad para adaptar el modelo a diferentes áreas urbanas (Montalbán-Arboleda & Restrepo-Betancur, 2020).

El GifMood tiene tres componentes principales:

- Sistema hidráulico: Simula el movimiento del agua en la infraestructura verde (Villarreal-Lizcano & Restrepo-Betancur, 2021).
- Transporte de partículas: Evalúa cómo se mueven los sedimentos y contaminantes en el sistema.
- Destino y transporte de componentes: Analiza la distribución y el comportamiento de los elementos químicos en el agua (García-Jaramillo et al., 2019).

El GifMood es una herramienta poderosa para la gestión de aguas pluviales en ciudades (Restrepo et al., 2018). Permite evaluar y optimizar la infraestructura verde para mitigar los impactos de las lluvias y mejorar la calidad del agua (Montalbán-Arboleda & Restrepo-Betancur, 2020). Con el GifMood, los profesionales pueden tomar decisiones informadas y diseñar intervenciones efectivas para promover la sostenibilidad hídrica urbana (Villarreal-Lizcano & Restrepo-Betancur, 2021).

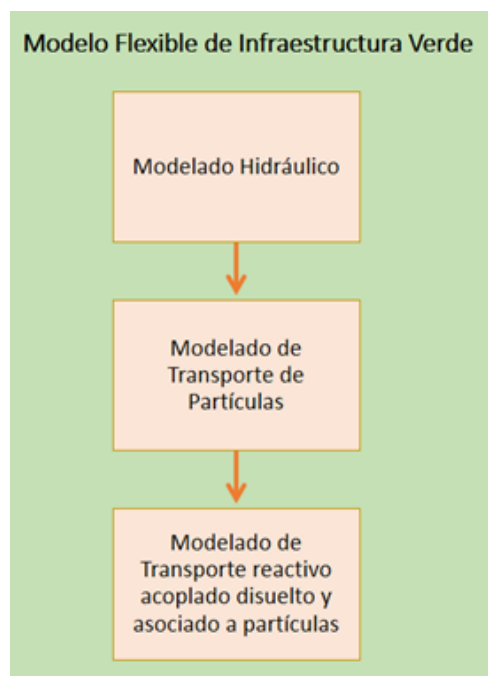


Figura 2.12: Modelación Digital de infraestructura verde

(Fuente: Creación Propia).

A. Modelado Hidráulico

El modelado hidráulico es una herramienta fundamental para evaluar el rendimiento de la infraestructura verde en la gestión de aguas pluviales (García-Jaramillo et al., 2019). Este método utiliza ecuaciones de equilibrio de agua y teorías constitutivas para describir el almacenamiento y el flujo del agua en cada componente del sistema (Montalbán-Arboleda & Restrepo-Betancur, 2020).

Las ecuaciones de equilibrio de agua, basadas en la conservación de masa y energía, permiten calcular cómo se mueve el agua en la infraestructura verde (Restrepo et al., 2018). Estas ecuaciones consideran factores como la precipitación, la evaporación, la infiltración, el escurrimiento superficial y la recarga de acuíferos (Chin et al., 2016).

Las teorías constitutivas describen cómo se almacena y fluye el agua en cada componente de la infraestructura verde (Villarreal-Lizcano & Restrepo-Betancur, 2021). Estas teorías consideran la porosidad del suelo, la capacidad de retención de agua, la velocidad de flujo y otras características específicas de cada componente (Fletcher et al., 2015).

El modelado hidráulico combina ecuaciones y teorías para simular el movimiento del agua en la infraestructura verde. Esta información permite tomar decisiones sobre el diseño, la gestión y la optimización de la infraestructura verde en ciudades (García-Jaramillo et al., 2019). El modelado hidráulico ayuda a mitigar los impactos de las lluvias y a mejorar la calidad del agua (Restrepo et al., 2018).

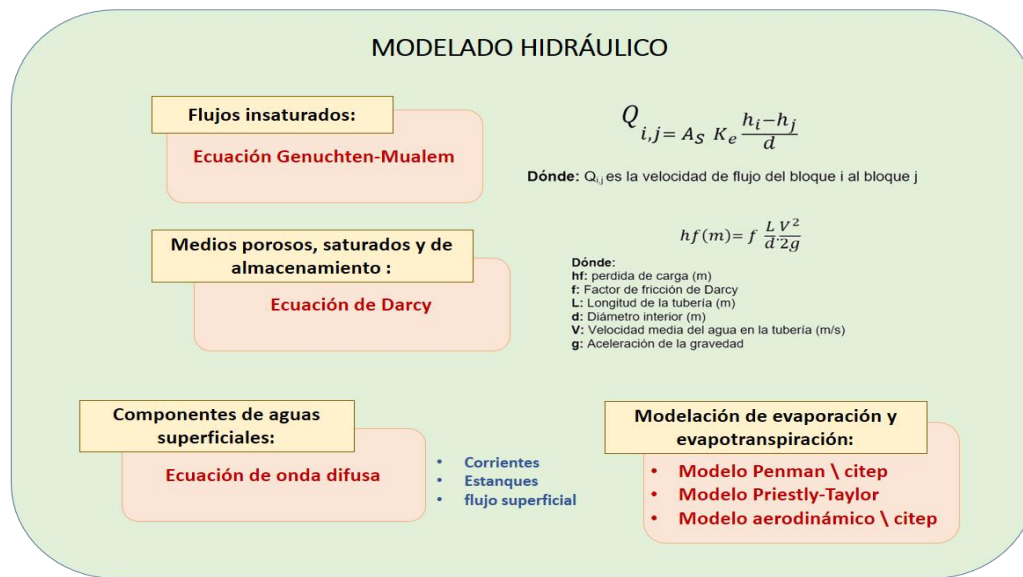


Figura 2.13. Variables y Ecuaciones para los Bloques de Modelado Hidráulico

(Fuente: Creación Propia, con datos de: C.Nietch, 2017).

B. Modelado de Transporte de Partículas

El modelado de transporte de partículas es una herramienta fundamental para evaluar la eficacia de la infraestructura verde en la gestión de aguas pluviales

(García-Jaramillo et al., 2019). Este modelado ayuda a comprender y predecir el movimiento y la distribución de las partículas en la infraestructura verde, lo que permite tomar decisiones informadas sobre su diseño y gestión (Montalbán-Arboleda & Restrepo-Betancur, 2020).

Diversos factores afectan el transporte de partículas en la infraestructura verde (Restrepo et al., 2018). Entre ellos, el asentamiento por gravedad deposita las partículas más pesadas en el suelo, mientras que la fijación a la matriz del suelo las retiene durante un tiempo (Villarreal-Lizcano & Restrepo-Betancur, 2021).

Los procesos de liberación de partículas del suelo son importantes para la calidad del agua en la infraestructura verde (Chin et al., 2016). Estos procesos determinan cómo las partículas se movilizan dentro del sistema y su impacto en la calidad del agua (Fletcher et al., 2015).

Para modelar el transporte de partículas en la infraestructura verde, se utilizan diferentes modelos que simulan el comportamiento de las partículas en medios porosos (Li & Davis, 2014). Estos modelos consideran las características de cada tipo de partícula, como tamaño, densidad, forma y capacidad de adsorción (Zhang & Liu, 2019).

El modelado de transporte de partículas es una herramienta poderosa para comprender y predecir el movimiento y la distribución de las partículas en la infraestructura verde. Esta información permite tomar decisiones informadas sobre su diseño y gestión para mitigar la contaminación y mejorar la calidad del agua en las ciudades (García-Jaramillo et al., 2019).

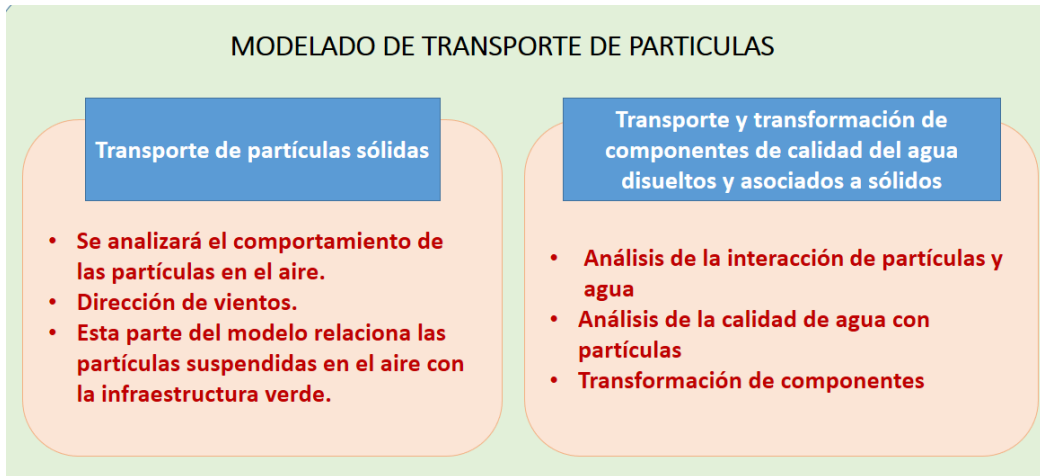


Figura 2.14. Variables y Ecuaciones para los Bloques de Modelado Hidráulico

(Fuente: Creación Propia, con datos de: C.Nietch, 2017).

C. Modelado de transporte reactivo acoplado disuelto y asociado a partículas

El modelado permite evaluar la eficacia a largo plazo de la infraestructura verde para reducir la carga de agua y nutrientes en un sistema de drenaje de escorrentía (García-Jaramillo et al., 2019). Esta herramienta permite predecir cómo la infraestructura verde afectará la calidad del agua en el sistema de drenaje a lo largo del tiempo (Montalbán-Arboleda & Restrepo-Betancur, 2020).

El modelo considera el transporte reactivo de contaminantes disueltos y asociados a partículas, incluyendo su disolución, transporte e interacción con las partículas del sistema (Restrepo et al., 2018). El acoplamiento de los procesos de transporte disuelto y asociado a partículas permite comprender mejor el comportamiento de los contaminantes en la infraestructura verde (Villarreal-Lizcano & Restrepo-Betancur, 2021).

Esta información permite optimizar el diseño y la gestión de la infraestructura verde para mitigar la contaminación y mejorar la calidad del agua en las ciudades (Chin et al., 2016). Podemos simular cómo la lluvia intensa afecta la movilización de

contaminantes y cómo la vegetación y el sustrato influyen en su retención y transformación (Fletcher et al., 2015).

El modelado de transporte reactivo acoplado es una herramienta poderosa para comprender el comportamiento de los contaminantes en la infraestructura verde (Li & Davis, 2014). Se pueden usar modelos como el GifMood para evaluar la eficacia de la infraestructura verde en la reducción de la carga de contaminantes en el sistema de drenaje (Zhang & Liu, 2019).

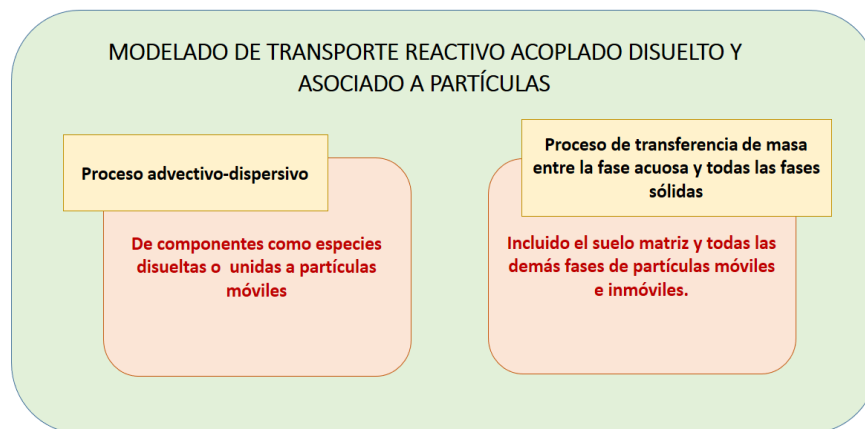


Figura 2.15. Procesos para el Modelado de Transporte Reactivo acoplado disuelto y asociado a partículas

(Fuente: Creación Propia, con datos de: C.Nietch, 2020).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Introducción

Este capítulo describe la metodología para analizar el potencial de un sistema integrado de infraestructura verde en Monterrey (Gómez-Hernández et al., 2023). El estudio tiene un enfoque relacional, buscando identificar, estudiar y describir las relaciones entre variables clave en el Área Metropolitana de Monterrey durante la última década (Ramírez-Lozano et al., 2022).

Las variables a considerar son:

- **Clima:** Temperatura máxima y mínima, precipitación, radiación solar y concentración de partículas menores a 10 micrómetros (PM10) (Martínez-Suárez et al., 2021).
- **Calidad de agua:** Presencia de contaminantes como nitratos, fosfatos y metales pesados (Hernández-Antonio et al., 2020).
- **Infraestructura verde:** Tipo de especies vegetales, cantidad de flujos de agua pluvial, tipo de sustrato y diseño de las estructuras (Escobedo-Ríos et al., 2019).

La metodología se organiza en fases con actividades específicas. La Figura 3.1 muestra un diagrama de flujo con los detalles de cada fase. Este proceso permitirá realizar la investigación de manera sistemática y estructurada (Gómez-Hernández et al., 2023).

Esta metodología robusta y completa permitirá alcanzar los objetivos de la investigación y contribuir al conocimiento sobre el potencial de la infraestructura

verde para mejorar la calidad ambiental en ciudades como Monterrey (Ramírez-Lozano et al., 2022).

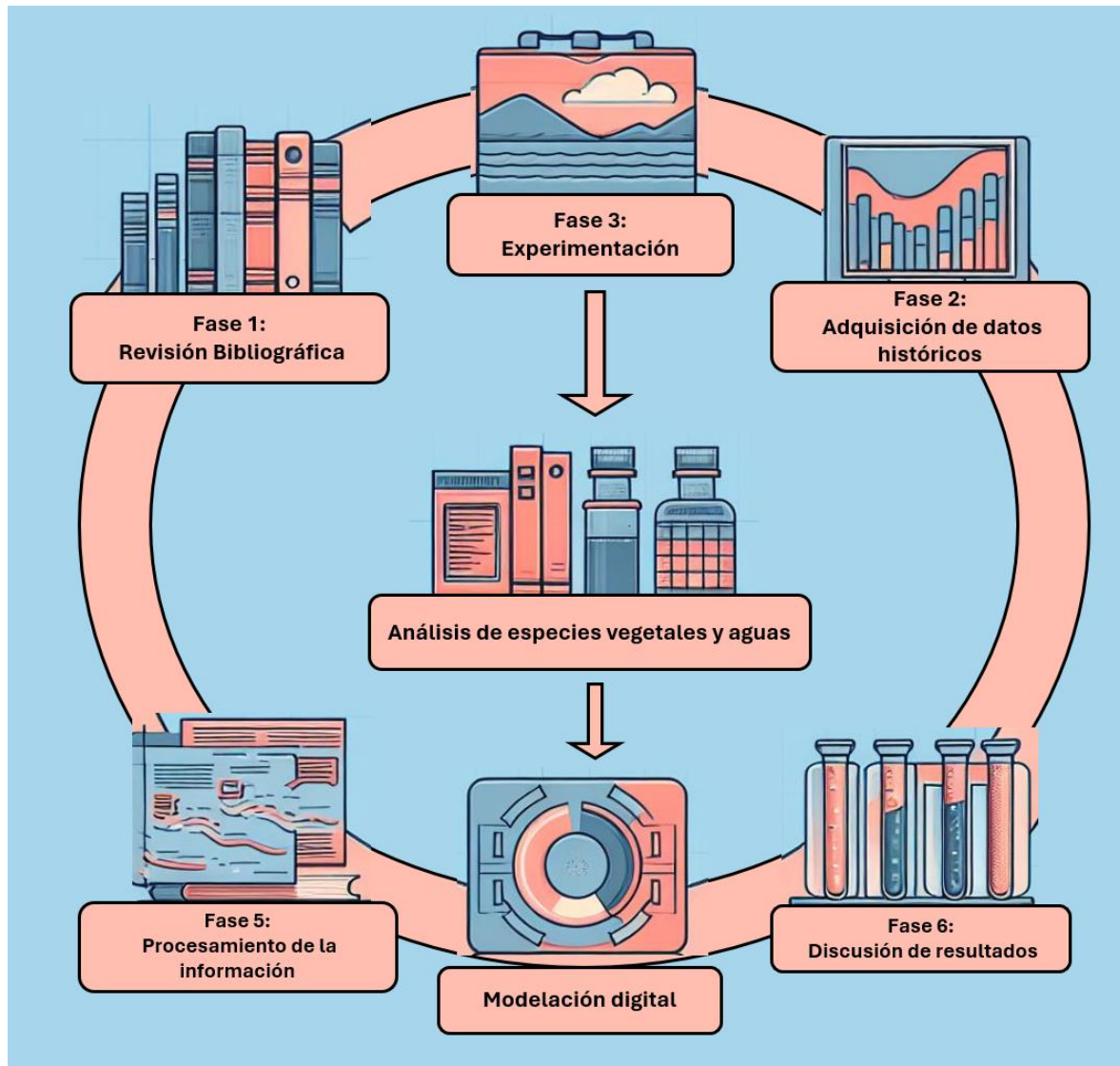


Figura 3.1. Metodología de la investigación

(Fuente: Creación Propia).

3.1.1. Enfoque metodológico

El enfoque mixto de la metodología de investigación combina estrategias cuantitativas y cualitativas para obtener una comprensión más completa del

fenómeno que se estudia (Flick, 2015). Este enfoque se basa en la idea de que la triangulación de diferentes tipos de datos puede mejorar la confiabilidad y validez de la investigación (Jick, 1979).

En el caso concreto del presente proyecto de investigación, se definió la combinación de datos cuantitativos, como las mediciones de PM10, clima y calidad del agua, con datos cualitativos, como la modelación digital y los mapas vectoriales. Esta combinación permite realizar un análisis más profundo de la problemática ambiental que se está investigando debido a las características más relevantes del enfoque mixto que son:

- **Complementariedad:** Los datos cuantitativos (PM10, clima, agua) y cualitativos (modelación digital, mapas vectoriales) se integran para brindar una visión completa del problema. Los primeros identifican los principales problemas ambientales, mientras que los segundos profundizan en sus causas y consecuencias.
- **Triangulación:** La convergencia de datos cuantitativos y cualitativos aumenta la confiabilidad de los resultados, verificando su precisión e identificando sesgos.
- **Flexibilidad:** Adaptación a las necesidades del estudio. La combinación de métodos permite abordar la complejidad de los problemas ambientales, facilitando un análisis integral.
- **Profundidad:** Diferentes métodos para una comprensión más profunda del fenómeno. La combinación de datos cuantitativos y cualitativos ayuda a comprender mejor las causas y consecuencias de la contaminación del aire, el cambio climático y la escasez de agua.

Diseño de investigación

El Diseño de la investigación definido para esta investigación es el mixto, que combina elementos de investigación experimental y observacional (Creswell, 2014).

Técnicas de investigación:

- Revisión bibliográfica.
- Recolección de datos históricos.
- Recolección de muestras.
- Análisis de muestras.
- Modelación predictiva digital.
- Creación de modelos digitales tridimensionales.

3.2. Adquisición de Datos Históricos

Para la adquisición de datos históricos de calidad del aire en Monterrey: Primero, se identificaron las estaciones de monitoreo de la ciudad, para obtener una lista completa y actualizada de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Monterrey.

Luego, se recolectó información detallada sobre los datos históricos de calidad del aire en esas áreas. Se solicitaron datos específicos de PM10, incluyendo:

- Rango de fechas: Se seleccionaron datos entre el 2010-2019 para obtener una perspectiva amplia de la calidad del aire en Monterrey.
- Frecuencia de medición: Se obtuvieron datos con una frecuencia horaria para realizar análisis más precisos.
- Control de calidad: Se verificó que los datos contaran con los controles de calidad y validación adecuados para garantizar su confiabilidad.

Este paso fue crucial para obtener un conjunto completo y confiable de datos para el análisis posterior. La información recopilada permitió realizar un análisis detallado de la calidad del aire en Monterrey, identificar patrones y tendencias, y evaluar la eficacia de las estrategias de control de la contaminación del aire implementadas en la ciudad.

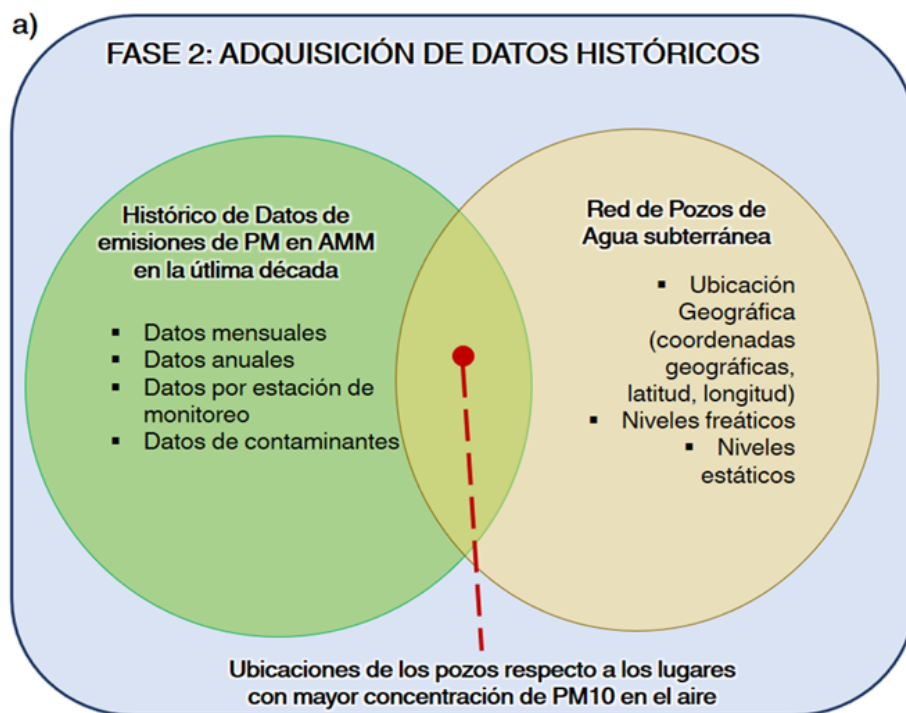


Figura 3.2. Metodología de la Fase 2 para las ubicaciones.

(Fuente: Creación Propia).

3.2.1. Datos Climatológicos

Se realizó un análisis exhaustivo de datos climáticos en el Área Metropolitana de Monterrey con el objetivo de comprender mejor los patrones climáticos y su impacto en la región. El estudio se dividió en dos fases:

Fase 1: Análisis de datos climáticos históricos (1968-2018)

Tipo de datos climatológicos:

- Temperatura máxima y mínima
- Precipitación

Fuente de los datos: Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México

Periodo de tiempo de los datos: 1968-2018 (50 años)

Metodología de procesamiento de datos: Control de calidad y homogenización de datos

Análisis estadístico: cálculo de medias, promedios, tendencias, etc.

Visualización de datos: gráficos, mapas, etc.

Fase 2: Análisis de datos de calidad del aire (2010-2019)

Tipo de datos: PM10 (partículas menores a 10 micrómetros), Radiación solar, Humedad relativa

Fuente de los datos: Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA)

Periodo de tiempo de los datos: 2010-2019 (10 años)

Metodología de procesamiento de datos: Recopilación y limpieza de datos

Evaluación de la calidad del aire

Identificación de patrones y relaciones entre variables

Los resultados de este análisis integral proporcionaron información crucial sobre:

- Los patrones climáticos históricos y recientes en Monterrey
- La evolución de la calidad del aire en la última década
- La influencia del clima en la calidad del aire
- La vulnerabilidad de la región al cambio climático

3.2.2. Ubicación de pozos de agua subterránea

Se estudiaron 57 pozos de agua subterránea en el Área Metropolitana de Monterrey (CONAGUA, 2023). Los pozos fueron seleccionados debido a que en los últimos años no se extrae agua de los mismos, lo cual los convierte en áreas idóneas para la construcción de infraestructura verde (Gómez-Hernández et al., 2023).

Para analizar estos datos, se creó una base de datos en Microsoft Excel. Esta herramienta permitió:

- Almacenar y gestionar de forma eficiente la información de los pozos.
- Resumir y analizar los datos para identificar tendencias y patrones.
- Visualizar la información espacialmente mediante mapas y gráficos.
- Facilitar el diseño de la infraestructura verde en cada sitio, considerando sus características y entorno.

Utilizando un equipo GPS de alta precisión, se registraron las coordenadas geográficas de cada pozo (Ramírez-Lozano et al., 2022). También se determinó la profundidad total del pozo desde la superficie del terreno. A cada pozo se le asignó un código único para facilitar su identificación y gestión en la base de datos.

Se midió y caracterizó el entorno de los predios donde se encuentran ubicados los pozos. Se describió la cobertura vegetal, el tipo de suelo, la topografía y la presencia de infraestructura urbana (Escobedo-Ríos et al., 2019). Esta información permitió:

- Evaluar el potencial de cada sitio para la construcción de infraestructura verde.
- Seleccionar las especies vegetales más adecuadas para cada sitio.
- Diseñar espacios verdes que se integren armoniosamente con el entorno.

La información recolectada y organizada en la base de datos permitió diseñar espacios verdes específicos para cada pozo, teniendo en cuenta sus características espaciales y su entorno físico (Martínez-Suárez et al., 2021).

3.2.3. Selección de Especies Vegetales

Tras analizar los datos climáticos de Monterrey, se seleccionaron las plantas más adaptables al clima de la ciudad para los espacios verdes del proyecto (Martínez-Suárez et al., 2021). Esto garantiza su supervivencia y crecimiento saludable en todas las estaciones.

Para la selección de las plantas, se creó la Tabla 3.1. Esta tabla describe las características de las plantas elegidas para los espacios verdes, especialmente para techos verdes y paredes vivas. La información incluye:

- Resistencia al clima: Se consideraron la temperatura, la precipitación, la radiación solar y la humedad relativa de Monterrey.
- Necesidades de agua: Se seleccionaron plantas con diferentes necesidades de riego para optimizar el uso del agua.
- Necesidades de luz: Se consideraron las condiciones de luz solar en cada sitio para elegir las plantas adecuadas.
- Otros datos importantes: Se incluyó información sobre la altura, el color de las flores, la textura de las hojas y la época de floración.

Elegir las plantas adecuadas es clave para crear espacios verdes sostenibles, bonitos y que beneficien al medio ambiente urbano (Escobedo-Ríos et al., 2019). Las plantas adaptables garantizarán el éxito a largo plazo de estos espacios, promoviendo la biodiversidad y mejorando la calidad de vida en la ciudad.

Tabla 3.1. Principales características de las especies vegetales.

Tipo de Infraestructura verde	Nombre Científico	Características
Techo verde	<i>Lavandula angustifolia</i>	Climas cálidos y moderadamente secos, veranos soleados, temperatura común 35°C la planta tolera temperaturas bajas
	<i>Sedum reflexum</i>	Origen: México, Luz: pleno sol. Temperaturas: resiste -3°C. Suelo: toda clase de terrenos, incluso calizos, no requiere riego frecuente

	<i>Dahlia pinnata</i>	Originaria de México y cuenta con características como ser herbácea y perenne. Clima caluroso y ambiente iluminado.
	<i>Pennisetum setaceum</i>	Muy buena resistencia a las heladas y climas cálidos, originaria de México y cuenta con características como ser herbácea y perenne.
Pared Viva	<i>Aptenia cordifolia</i>	Lugares con sol directo y ventilados, aguanta sequías, resiste altas temperaturas y climas tropicales
	<i>Trachelospermum jasminoides</i>	Resiste hasta -10°C y es adaptable al sol fuerte, alcanza alturas de hasta 10 metros.

3.2.4. Diseño de Sistema de Infraestructura Verde

Tras analizar los 57 pozos de agua subterránea, se eligió el "Pozo Topo Chico 4" para el diseño del prototipo del sistema de infraestructura verde. El predio donde se encuentra ubicado este pozo tiene un área de 882 metros cuadrados, lo que lo convierte en un espacio ideal para un proyecto de esta magnitud.

Las principales razones para la selección del Pozo Topo Chico 4 fueron:

- Superficie adecuada: El área del predio es suficiente para la implementación de un sistema de infraestructura verde completo, incluyendo áreas verdes, techos verdes y paredes vivas.
- Ubicación estratégica: El pozo se encuentra en una zona urbana con alta densidad de población, lo que maximiza el impacto del proyecto en la mejora del medio ambiente.

- Disponibilidad de datos: Se cuenta con información completa sobre el pozo y su entorno, lo que facilita el diseño y la evaluación del proyecto.

El diseño del sistema de infraestructura verde para el "Pozo Topo Chico 4" consideró las características del predio para asegurar su eficacia y sostenibilidad. Entre estas características se destacan:

- Topografía del terreno: Se consideró la pendiente del terreno para el diseño del sistema de riego y drenaje, evitando la erosión y la acumulación de agua.
- Presencia de infraestructura urbana: Se tomó en cuenta la presencia de edificios, postes de luz y otros elementos para adaptar el diseño del sistema a las condiciones del entorno.

Techos Verdes

Se diseñó un sistema de techos verdes de bajo peso (50-60 kg/m²) que permite la ventilación de las raíces, el drenaje rápido y una fácil instalación en techos inclinados livianos (Gómez-Hernández et al., 2023). Con una pendiente de diseño del 2%, este sistema es ideal para la instalación de techos extensivos.

Las principales características del sistema de techo verde ligero son:

- Bajo peso: El sistema está diseñado para ser ligero, lo que lo hace ideal para techos con capacidad de carga limitada.
- Ventilación de las raíces: El sistema permite la ventilación de las raíces de las plantas, lo que es esencial para su crecimiento saludable.
- Drenaje rápido: El sistema tiene un sistema de drenaje rápido que evita la acumulación de agua y posibles daños al techo.

- Fácil instalación: El sistema está diseñado para una fácil instalación, lo que reduce los costos y el tiempo de construcción.
- Pendiente de diseño del 2%: La pendiente del 2% es ideal para techos extensivos, que son los más comunes en zonas urbanas.

Este sistema de techo verde ligero ofrece una serie de beneficios, incluyendo:

- Mejora de la calidad del aire: Los techos verdes ayudan a mejorar la calidad del aire al filtrar los contaminantes y producir oxígeno.
- Reducción de la temperatura ambiente: Los techos verdes ayudan a reducir la temperatura ambiente, lo que puede ayudar a reducir el consumo de energía en los edificios.
- Retención de agua de lluvia: Los techos verdes ayudan a retener el agua de lluvia, lo que puede reducir la escorrentía y las inundaciones.
- Mejora de la biodiversidad: Los techos verdes proporcionan un hábitat para plantas y animales, lo que puede mejorar la biodiversidad en las zonas urbanas.

Paredes Vivas

Las paredes vivas se diseñaron con un espesor de 12 a 15 cm (Pérez-Urrestarazu et al., 2018). La estructura y la cobertura vegetal pesan alrededor de 70 kg por m². Este diseño permite un buen aislamiento térmico.

Las principales características del diseño de las paredes vivas son:

- Espesor: El espesor de 12 a 15 cm es suficiente para proporcionar un buen aislamiento térmico y acústico.
- Peso: El peso de 70 kg por m² es relativamente ligero, lo que facilita la instalación y reduce la carga estructural.
- Aislamiento térmico: El diseño de la pared viva permite atrapar aire entre las plantas y el sustrato, lo que proporciona un buen aislamiento térmico.

- **Facilidad de instalación:** Las paredes vivas se instalan en una estructura metálica que se coloca previamente, lo que facilita el montaje y las hace más eficientes.

Humedales

Se diseñó un humedal artificial de aproximadamente 60 m² para tratar el agua de lluvia que es captada por los techos verdes y paredes vivas. Este humedal tendrá una trampa para retener partículas gruesas, una capa de grava y arena de 200 mm para filtrar y purificar el agua antes de reutilizarla, inyectarla al acuífero o desecharla, según la calidad final obtenida.

Las principales características del humedal artificial son:

- **Superficie:** 60 m², lo que es suficiente para tratar el agua de lluvia captada por los techos verdes y paredes vivas del proyecto.
- **Trampa de sedimentos:** Retiene las partículas gruesas del agua de lluvia, evitando que obstruyan el sistema de tratamiento.
- **Capa de grava y arena:** Filtra y purifica el agua de lluvia, eliminando contaminantes y mejorando su calidad.
- **Reutilización del agua:** El agua tratada se puede reutilizar para riego, limpieza o descarga al alcantarillado, dependiendo de su calidad final.
- **Inyección al acuífero:** El agua tratada con alta calidad se puede inyectar al acuífero para recargarlo.

Modelado Digital Tridimensional

d.1. Modelado de áreas verdes efectivas:

Se diseñaron tres áreas verdes para el terreno utilizando el software SketchUp. El objetivo era capturar PM₁₀ y gestionar el flujo pluvial. El terreno tiene

21 metros de ancho por 42 metros de largo. Los tres diseños tenían paredes de 6 metros y un humedal central para distribuir el agua. El primer diseño tenía la mayor área verde efectiva entre techos y paredes verdes. Se seleccionó el primer diseño como base para el diseño final. Se modificó para optimizar la distribución de las áreas verdes, aumentar la captura de contaminantes y mejorar la gestión del flujo pluvial.

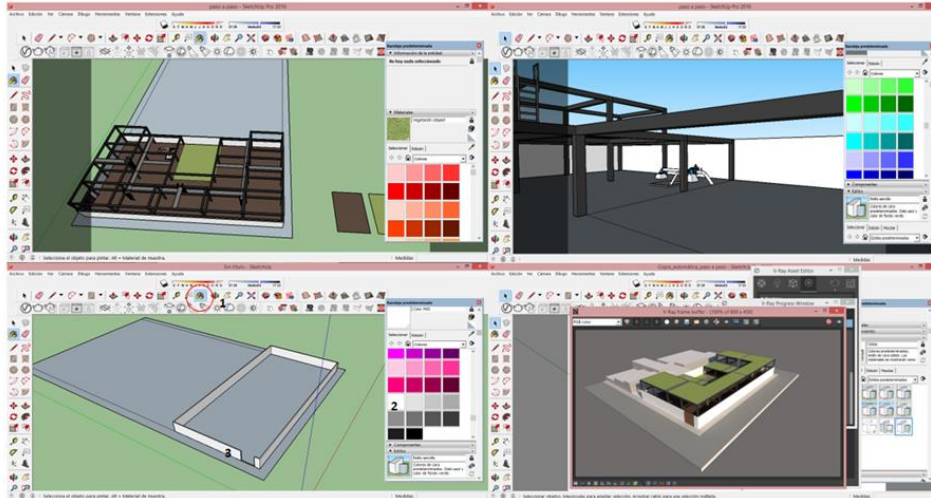


Figura 3.3. Trabajo en Software de modelación digital 3D.

(Fuente: Creación Propia).

La Figura 3.3 muestra cómo se construyó el modelo 3D paso a paso. Se empezó por esbozar los contornos del diseño, incluyendo los techos verdes, las paredes vivas y el humedal. Luego, se refinaron los detalles y se agregaron elementos adicionales para mejorar la precisión y la estética del modelo.

La Figura 3.4 muestra el modelo 3D final listo para implementarse. Su elaboración demuestra la planificación y ejecución meticulosa que requiere un diseño efectivo y funcional para cumplir con los objetivos del proyecto.

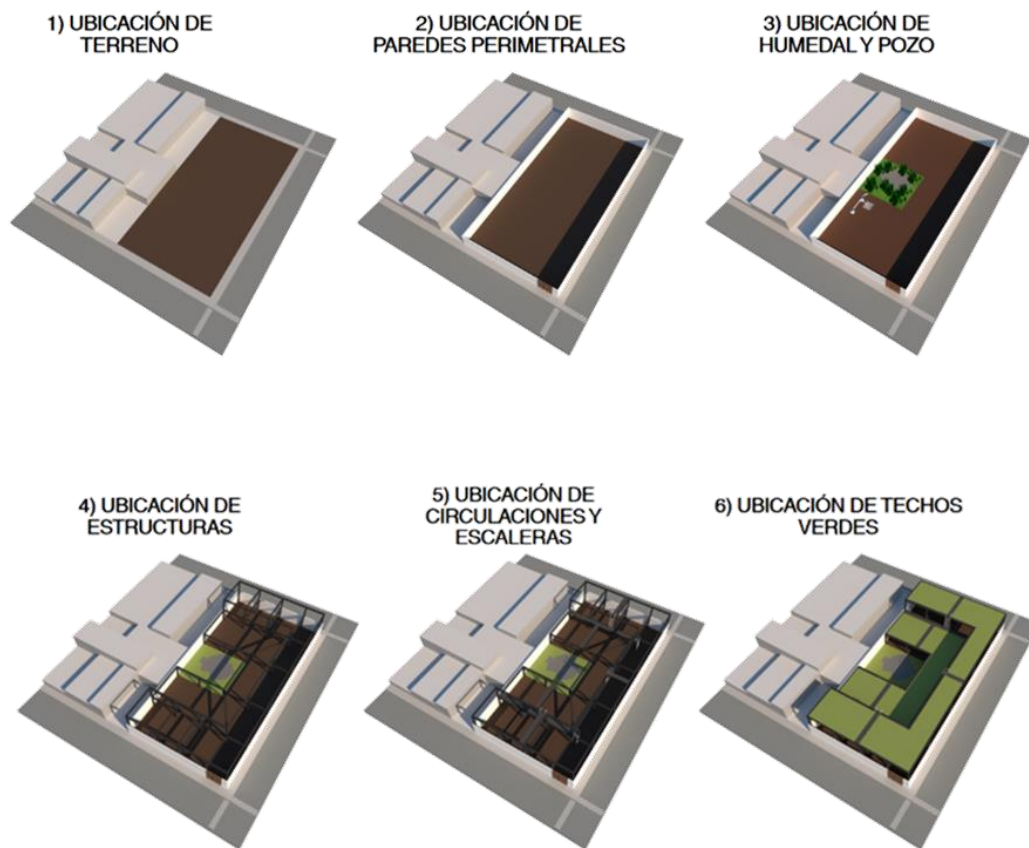


Figura 3.4. Proceso del Proyecto en Modelo Digital 3D.

(Fuente: Creación Propia).

El diseño del "Pozo Topo Chico 4" se implementó en los demás pozos del Municipio de Monterrey. Se evaluó cada pozo individualmente, considerando sus características y condiciones. El diseño se adaptó a las características de cada pozo. Se ajustaron los techos verdes, las paredes vivas y los humedales para que funcionen mejor en cada ubicación.

3.3. Experimentación

En el contexto del diseño de infraestructura verde, la experimentación científica se puede definir como un proceso sistemático y controlado para evaluar la eficacia de diferentes estrategias y soluciones. Este proceso implica la implementación de experimentos cuidadosamente diseñados para medir y comparar el impacto de diferentes variables en el rendimiento de la infraestructura verde. Bunge (2010) define la experimentación científica como "un proceso en el que se ponen a prueba hipótesis mediante la observación y la medición".

3.3.1. Deposición seca de PM10 en especies de plantas

Se estudió la capacidad de las plantas para retener PM10 (partículas menores a 10 micrómetros de diámetro) mediante un experimento de campo en un techo verde de Monterrey, México.

Metodología de medición de PM10:

- Las muestras de las hojas de cada especie vegetal se analizaron con gravimetría (Pérez-Urrestarazu et al., 2018) para determinar la masa de PM10 retenida por las plantas.
- Se utilizó microscopía electrónica (Escobedo-Ríos et al., 2019) para identificar y cuantificar las diferentes partículas de PM10 retenidas en las hojas de las diferentes especies vegetales instaladas en el módulo de medición.

Se construyó un módulo de medición con una superficie de 1 metro cuadrado sobre un techo de una vivienda de Monterrey.

Se midieron las siguientes variables en las muestras obtenidas del módulo experimental de medición: La masa de PM10 retenida por las plantas y el amaño y composición química de las partículas de PM10 retenidas por las plantas.

3.2.1.1 Área de estudio

El lugar donde se instaló el módulo experimental de monitoreo está ubicado en el municipio de Guadalupe, en el Área Metropolitana de Monterrey, se encuentra a 25°40' 45" latitud norte y 100°14'6" longitud oeste. Está a 490 metros sobre el nivel del mar. Su clima es cálido semiárido, con una temperatura media anual de 22,1°C y una precipitación media anual de 640 mm. Las lluvias son más frecuentes en septiembre. (Kottek, 2006)

La estación de monitoreo "La Pastora" está cerca de áreas residenciales, parques, espacios verdes y carreteras de alto tránsito. Registra un promedio de 53,44 $\mu\text{g.m}^{-3}$ de PM10 en los últimos diez años 2010 a 2019 (Gobierno del Estado de Nuevo León, 2023).

El prototipo de estación de análisis se instaló en el techo de una casa a 4 metros de altura, en un vecindario residencial de Guadalupe. Está a una cuadra de la Avenida Benito Juárez. La Figura 3.5 muestra la ubicación exacta del área de estudio.

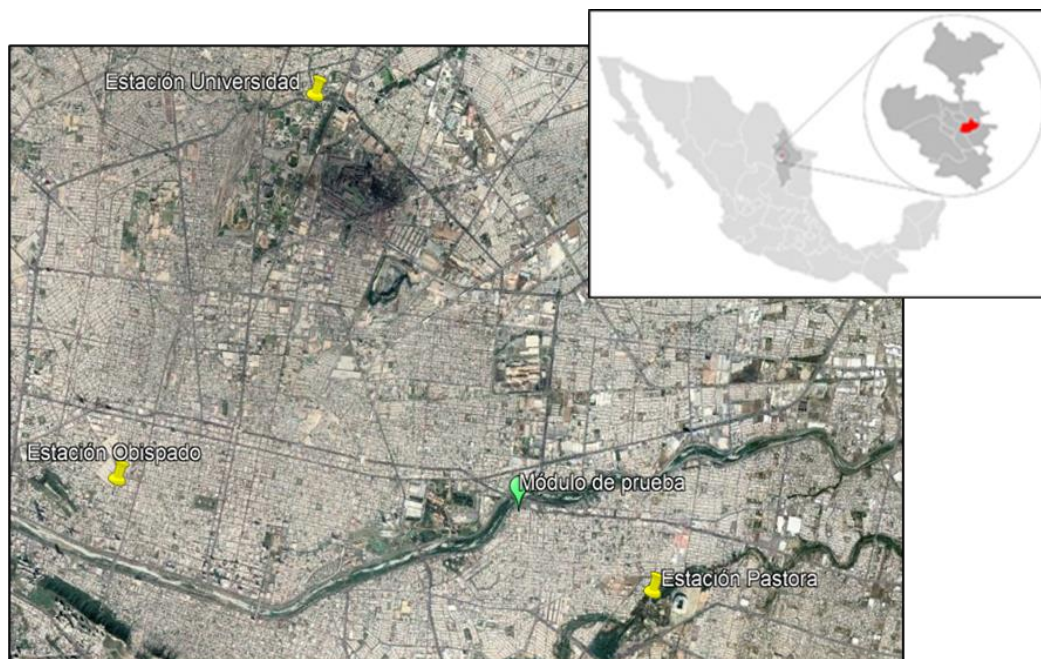


Figura 3.5. Ubicación del área de estudio.

(Modificado de: Google Earth).

3.2.1.2 Paleta Vegetal

El módulo experimental de medición de análisis tiene dos niveles: uno para techos verdes y otro para paredes vivas. La Tabla 3.2 detalla las medidas específicas de cada nivel.

Tabla 3.2. Características de Prototipo de análisis.

Prototipo de análisis de infraestructura verde		
Prototipo de techo verde	Largo	1.2 m
	Profundidad	0.3 m
	Alto	0.45 m
Prototipo de pared viva	Largo	1.2 m
	Profundidad	0.3 m

	Alto	1.5 m
--	------	-------



Figura 3.6. a) Render de Prototipo de techo verde. b) Render de Prototipo de pared viva. c) Prototipo construido e instalado con las especies vegetales.

El prototipo de techo verde tiene tres capas, como se ve en la Figura 3.7:

- Geotextil: una tela que permite el paso del agua.
- Grava: una capa de piedras que ayuda a drenar el agua.
- Sustrato: una mezcla de tierra y otros materiales donde crecen las plantas. Se seleccionaron seis especies: *Aptenia cordifolia*, *Sedum reflexum*, *Trachelospermum jasminoides*, *Pennisetum setaceum*, *Lavandula angustifolia* y *Dahlia pinnata*.



Figura 3.7. a) Especies vegetales instaladas. b) prototipo de análisis. c) Capas del módulo de prueba.

Muestreo

Cada semana, se recolectaron tres hojas de cada especie vegetal en el mismo día y horario. Se seleccionaron las hojas más maduras, que han estado expuestas al aire por más tiempo.

También se registraron datos climáticos como temperatura, humedad, viento, punto de rocío y nubosidad. Para ello, se utilizó un anemómetro/barómetro con medidor de humedad y temperatura (Lutron AJ.36740). Para asegurar la precisión de los datos, se verificaron con el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), el sistema oficial de monitoreo de la ciudad y las estaciones de monitoreo Sureste, Centro y Norte 2.

Las muestras se colocaron en envases plásticos individuales para evitar su deterioro o contaminación durante el transporte al laboratorio. Los envases se etiquetaron con la fecha, hora, especie vegetal y ubicación de la muestra.

A Determinación cuantitativa de PM10 en plantas mediante análisis gravimétrico

c1. Muestras de blancos

Las muestras se cortaron a 1 cm² y se pesaron. Luego se lavaron con agua destilada en un baño de ultrasonidos durante 20 minutos para eliminar partículas. Se secaron en un desecador con gel de sílice durante siete días para eliminar la humedad. Se pesaron nuevamente para determinar la pérdida de humedad. Se midieron al menos tres muestras en blanco para cada medición.

c2. Muestras de especímenes

Las muestras se cortaron a 1 cm² y se pesaron. Luego se lavaron con agua destilada en un baño de ultrasonidos durante 20 minutos para eliminar partículas. Se secaron en un desecador con gel de sílice durante siete días para eliminar la humedad. Se pesaron nuevamente para determinar la pérdida de humedad. Se midieron al menos tres muestras en blanco para cada medición.

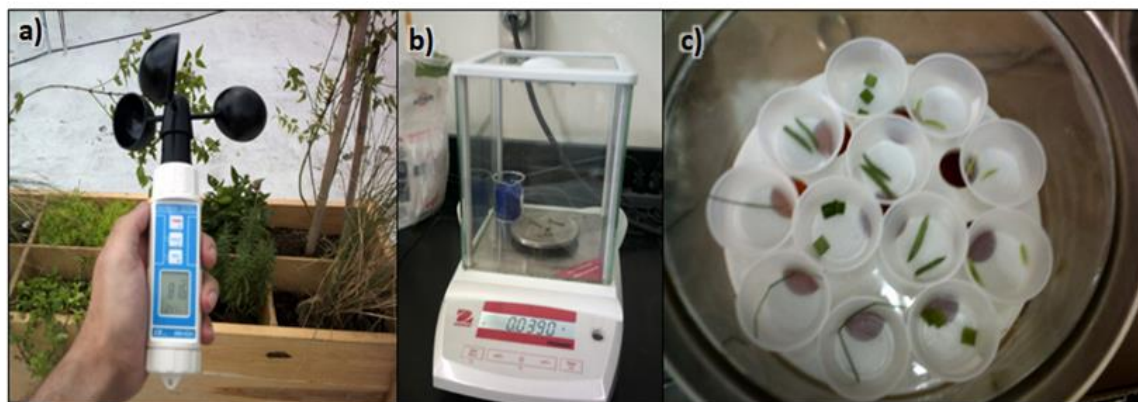


Figura 3.8. a) Toma de datos climáticos con barómetro / anemómetro. b) Pesaje de muestras. c) Muestras en desecador.

c3. Microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS)

Las partículas retenidas en las hojas se analizaron con un microscopio electrónico JEOL JSM-6510LV, Este tipo de microscopio permite observar las partículas con un alto grado de detalle y determinar su composición química.

Metodología de medición de contaminantes:

Se analizaron tanto las muestras en blanco como las que contenían la medición de las partículas. Para una mejor visualización, se pulverizó oro y platino sobre las muestras. Se utilizó un detector EDS para mapear los elementos y evaluar la composición química de las partículas. Este análisis permitió comprender la naturaleza y composición de las partículas retenidas en las hojas.

Diseño del experimento:

Se seleccionaron al azar hojas de diferentes especies vegetal del módulo experimental. Se secaron las hojas y se analizaron con el microscopio electrónico.

Variables a medir:

- Tamaño de las partículas: Se determinó el tamaño de las partículas en micrómetros.
- Composición química de las partículas: Se identificaron los elementos presentes en las partículas.
- Presencia de contaminantes: Se determinó la presencia de contaminantes en las partículas.

B Análisis de agua procedente del sistema**Implementación de prototipo de humedal**

Se instaló un humedal al prototipo de infraestructura verde. El humedal purifica el agua de los techos y paredes verdes. Se usó la planta *Eichhornia crassipes* por su capacidad para limpiar el agua, esta planta tiene la capacidad de absorber nutrientes, contaminantes y metales pesados del agua. También se agregó un sistema de tuberías para recolectar muestras de agua, esto permite un mejor monitoreo del agua tratada. Estas mejoras hacen que el sistema de infraestructura verde sea más efectivo en el proceso de medición del agua descontaminada.



Figura 3.9. a) Prototipo de infraestructura verde completo (techo, pared y humedal). b) Prototipo de humedal. c) Agua excretada hacia el prototipo de humedal.

En esta etapa, se analiza el agua que ha pasado por el prototipo. Se compararán los contaminantes del aire con los del agua. El objetivo es determinar qué plantas filtran mejor los contaminantes del agua de lluvia. Este análisis permitirá comprender mejor el papel de las plantas en la purificación del agua y qué especies son más eficientes.

Espectrometría de absorción atómica

a. Muestreo

El muestreo de agua se realizó siguiendo la norma NMX-AA-051-SCFI-2001 (Norma Oficial Mexicana, 2001). Esta norma establece los requisitos para la toma de muestras de agua para análisis físico-químicos. Se tomaron seis muestras de techos verdes, seis de paredes vivas y una del humedal. También se tomaron tres muestras de agua de lluvia. Todas las muestras se recogieron en frascos de polietileno y se refrigeraron a 4°C. Se agregó ácido nítrico para conservar las muestras. Este proceso asegura la precisión de los resultados del análisis. Este proceso de muestreo y análisis asegura la precisión de los resultados y permite

determinar la eficacia del sistema de infraestructura verde en la purificación del agua.

b. Digestión de la muestra

En el laboratorio, las muestras se filtraron con una membrana de 0,45 micras para eliminar partículas, esto es necesario para obtener una medición precisa de los contaminantes disueltos en el agua. Luego, se calentaron 0.05 litros de muestra con 0.003 litros de ácido nítrico en vasos de vidrio, el ácido nítrico ayuda a digerir el material presente en las muestras y a liberar los contaminantes para su análisis. El calor digirió el material presente en las muestras. Cuando las muestras se evaporaron a 0.002 litros, se les agregó ácido clorhídrico y agua, el ácido clorhídrico ayuda a redissolver cualquier precipitado que se haya formado durante la evaporación. Se calentaron durante 15 minutos para redissolver cualquier precipitado, esto asegura que todos los contaminantes estén en solución y puedan ser medidos con precisión. Se calibró el espectrofotómetro para analizar las muestras. La calibración asegura la precisión en la medición de los contaminantes del agua. Este proceso permite una evaluación precisa de la calidad del agua.



Figura 3.10. a) Toma de muestras. b) Filtrado de muestras. c) Digestión de muestras. d) Muestras listas para espectrofotómetro de absorción atómica.

c. Preparación de estándares

Para garantizar la precisión, se prepararon estándares para cada elemento. Se usaron ecuaciones de partes por millón para determinar el volumen necesario. Esto asegura que la absorbancia de las muestras esté dentro de un rango específico. Los estándares se prepararon con cuidado, siguiendo las proporciones y concentraciones correctas. Se ajustaron para reflejar las condiciones de las muestras reales. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Donde:

C = Concentración V = Volumen

Estándares de Calcio:**0.5 ppm**

$$V_1 = \frac{(0.5\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 2.5\text{ mL} \cong 0.0025\text{ L}$$

1 ppm

$$V_1 = \frac{(1\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 5\text{ mL} \cong 0.005\text{ L}$$

2 ppm

$$V_1 = \frac{(2\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 10\text{ mL} \cong 0.01\text{ L}$$

3 ppm

$$V_1 = \frac{(3\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 15\text{ mL} \cong 0.015\text{ L}$$

4 ppm

$$V_1 = \frac{(4\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 20\text{ mL} \cong 0.02\text{ L}$$

5 ppm

$$V_1 = \frac{(5\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 25\text{ mL} \cong 0.025\text{ L}$$

Estándares de Cobre:**0.2 ppm**

$$V_1 = \frac{(0.2\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 1\text{ mL} \cong 0.001\text{ L}$$

0.4 ppm

$$V_1 = \frac{(0.4\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 2\text{ mL} \cong 0.002\text{ L}$$

0.6 ppm

$$V_1 = \frac{(0.6\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 3\text{ mL} \cong 0.003\text{ L}$$

0.8 ppm

$$V_1 = \frac{(0.8\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 4\text{ mL} \cong 0.004\text{ L}$$

1 ppm

$$V_1 = \frac{(1\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 5\text{ mL} \cong 0.005\text{ L}$$

1.2 ppm

$$V_1 = \frac{(1.2\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 6\text{ mL} \cong 0.006\text{ L}$$

Estándares de Sodio:

4 ppm

$$V_1 = \frac{(4\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 20\text{ mL} \cong \mathbf{0.02\text{ L}}$$

8 ppm

$$V_1 = \frac{(8\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 40\text{ mL} \cong \mathbf{0.04\text{ L}}$$

12 ppm

$$V_1 = \frac{(12\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 60\text{ mL} \cong \mathbf{0.06\text{ L}}$$

16 ppm

$$V_1 = \frac{(16\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 80\text{ mL} \cong \mathbf{0.08\text{ L}}$$

20 ppm

$$V_1 = \frac{(20\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 100\text{ mL} \cong \mathbf{0.1\text{ L}}$$

24 ppm

$$V_1 = \frac{(24\text{ppm})(50\text{ mL})}{10\text{ppm}}$$

$$V_1 = 120\text{ mL} \cong \mathbf{0.12\text{ L}}$$

La relación entre absorbancia y concentración de los estándares es clave para la calibración. Una buena relación (cercana a 1) asegura la confiabilidad de las lecturas de las muestras.

La Figura N°3.11 muestra la relación entre absorbancia y concentración para Calcio, Cobre y Sodio. Los valores son cercanos a 1: 0.9942, 0.9952 y 0.9995, respectivamente. Estos resultados indican una excelente correlación entre la absorbancia y las concentraciones de los estándares.

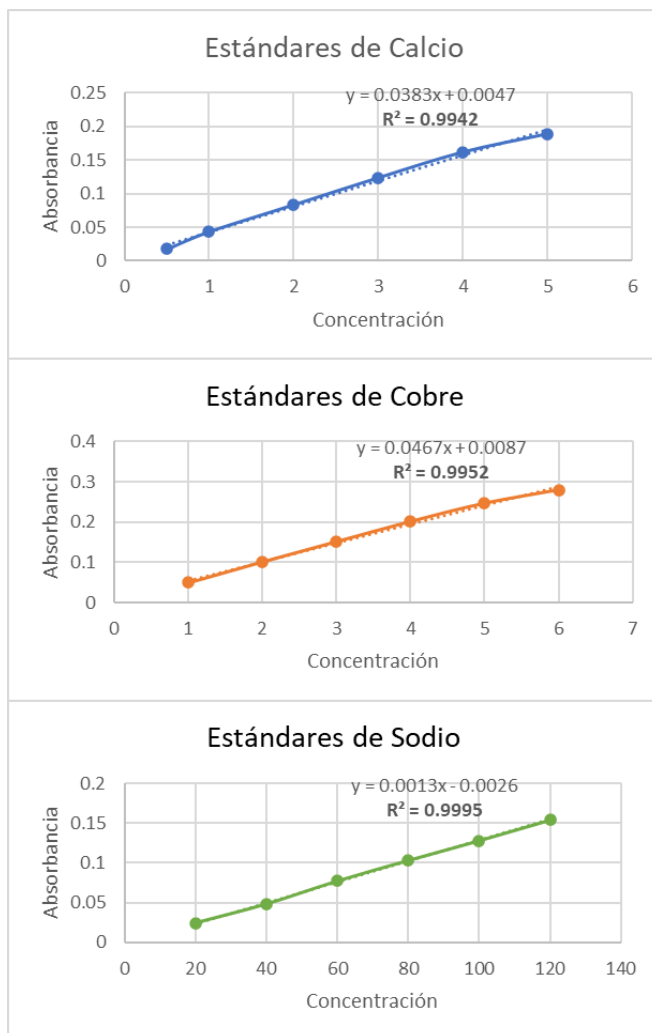


Figura 3.11. Relación entre concentración y absorbancia de los estándares.

Se calibró el espectrofotómetro para analizar las muestras. La calibración asegura la precisión de las mediciones. Este paso es crucial para obtener resultados confiables.

Se calibró el espectrofotómetro en dos rondas de muestreo. Esto permitió verificar y ajustar los parámetros para cada conjunto de muestras. La calibración asegura resultados precisos y confiables en cada análisis.

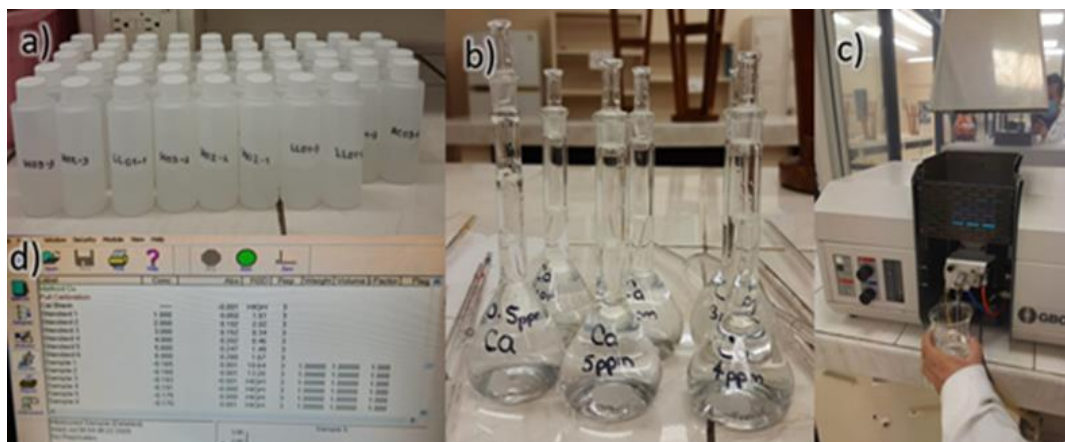


Figura 3.12. a) Muestras disueltas. b) Estándares. c) Absorción atómica. d) Cálculo de absorbancias

B Modelado del Sistema de infraestructura verde

El software GifMod permitirá modelar el sistema de infraestructura verde. Esto ayudará a comprender cómo interactúan sus componentes y cómo afectan al medio ambiente.

Se creará un modelo predictivo de infraestructura verde para Monterrey. El modelo integrará datos de 57 pozos de agua subterránea. Permitirá predecir el rendimiento del sistema en diferentes escenarios. Esta información ayudará a tomar mejores decisiones sobre su diseño y gestión.

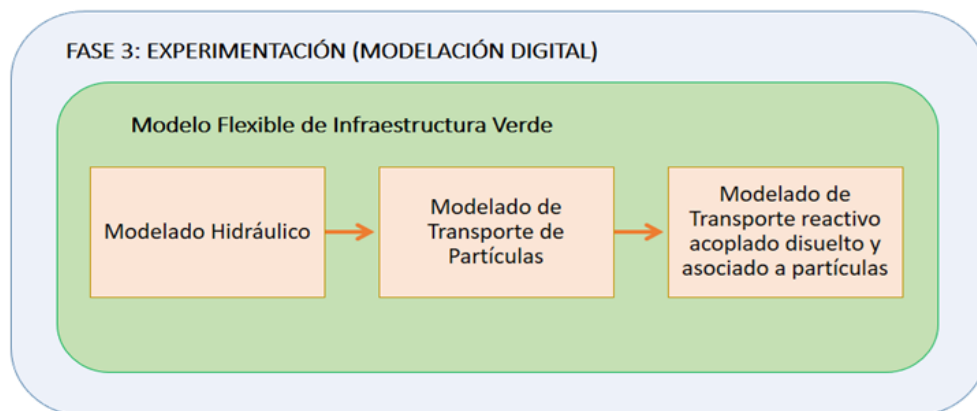


Figura 3.13. Metodología de la Fase 3 para la Modelación Digital (Fuente: Creación Propia).

El modelo flexible de infraestructura verde permite evaluar la gestión de aguas pluviales. Se basa en tres niveles: sistema hidráulico, transporte de partículas y destino de los componentes. Considera variables como estanques, corrientes, suelo y almacenamiento.

El Modelo Flexible de Infraestructura Verde evaluará la capacidad del sistema para:

- Reducir la carga de agua y nutrientes en el drenaje.
- Tratar las aguas y reinyectarlas al pozo subterráneo.

La fase 4 del proyecto creará una base de datos digital. Esta base de datos tendrá información de:

- 56 pozos de agua subterránea.
- Infraestructura verde asociada a cada pozo.
- Se usarán mapas para visualizar la información.

En la fase 5 se analizará la información de los modelos. El objetivo es determinar su impacto en el cambio climático. En la fase 6 se analizará toda la información. Se elaborarán recomendaciones para la gestión de la infraestructura verde.

3.4. Limitaciones del proyecto de investigación

Limitaciones técnicas:

- Escalabilidad del prototipo: El prototipo de infraestructura verde es pequeño y no se ha probado a gran escala. Es posible que su eficacia no sea la misma cuando se implemente en un área más grande.
-

- **Precisión del modelo predictivo:** El modelo predictivo digital aún está en desarrollo y su precisión aún no se ha probado. Es posible que los resultados del modelo no sean completamente confiables.
- **Disponibilidad de datos:** La cantidad de datos disponibles para el modelado es limitada. Esto puede afectar la precisión del modelo.

Limitaciones temporales:

- **Duración del proyecto:** El proyecto tiene una duración limitada, lo que puede limitar la cantidad de investigación que se puede realizar.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Análisis climatológico

4.1.1. Temperaturas máximas

La tabla muestra las temperaturas máximas en Monterrey durante 50 años (1968-2018). Estos datos permiten observar la variación de la temperatura y comprender los patrones climáticos (CONAGUA, 2020, Garza-López & García-Cueto, 2020). Esta información es valiosa para crear estrategias para enfrentar el cambio climático en la región (IPCC, 2021).

Tabla 4.1. Temperaturas Máximas en el AMM de 1968 a 2018.

TEMPERATURAS MÁXIMAS (°C)													
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	PROMEDIO
1968	17.52	18.70	27.50	27.51	30.77	31.86	31.36	32.68	29.43	27.18	21.71	20.91	26.43
1969	21.64	21.43	22.30	29.03	29.87	32.67	36.03	33.38	29.44	25.64	20.98	21.99	27.03
1970	17.71	19.83	24.61	30.56	29.32	32.59	32.43	33.90	28.87	25.79	23.99	24.10	26.98
1971	24.74	23.95	28.76	30.48	32.05	32.39	32.82	30.32	28.56	25.51	22.95	21.50	27.83
1972	21.96	22.65	26.77	30.53	27.01	30.35	30.97	32.31	31.44	27.22	20.12	20.36	26.81
1973	17.32	17.91	28.27	28.96	31.37	30.65	31.61	29.66	29.95	26.47	25.58	22.02	26.65
1974	21.12	25.21	27.83	29.05	33.97	35.03	34.90	36.52	30.17	26.52	31.34	26.65	29.86
1975	22.26	27.61	32.29	31.03	32.55	35.00	32.39	31.68	29.47	28.52	26.33	12.16	28.44
1976	20.71	27.45	26.55	28.73	29.91	34.40	34.87	31.91	29.64	23.52	17.45	17.65	26.90
1977	16.32	21.54	27.39	28.77	31.29	36.47	37.87	38.16	34.67	28.29	27.43	25.71	29.49
1978	18.74	20.07	28.06	31.80	35.74	36.57	38.42	36.81	29.87	25.13	23.77	22.23	28.93
1979	19.11	22.28	26.88	30.76	32.32	33.10	34.33	32.33	29.34	31.08	21.97	19.46	27.75
1980	23.11	22.73	28.16	29.09	33.80	35.46	34.80	31.90	31.61	25.72	21.18	20.36	28.16
1981	16.79	20.60	24.61	28.41	32.06	31.97	32.43	32.15	29.85	28.56	26.33	22.60	27.20
1982	23.96	21.19	29.20	30.31	28.54	35.13	36.62	36.94	33.24	26.48	22.78	20.19	28.71
1983	19.12	21.63	26.61	29.59	32.35	32.36	32.57	33.67	29.36	26.15	26.48	18.39	27.36
1984	15.04	23.34	27.27	33.27	32.15	32.74	33.13	34.14	28.24	26.95	23.75	22.27	27.69
1985	16.70	20.21	27.71	30.42	33.06	33.13	34.70	36.20	33.61	28.49	27.53	19.87	28.47
1986	22.55	26.55	29.69	32.40	33.13	33.07	36.32	36.27	31.98	25.95	23.23	16.67	28.98
1987	19.53	21.59	22.76	26.42	31.06	32.31	33.37	35.38	31.01	27.98	22.98	22.31	27.23
1988	16.23	20.97	27.16	31.77	31.41	34.27	35.45	33.53	30.40	26.96	27.57	21.10	28.07
1989	21.47	22.64	30.13	30.90	36.01	36.21	36.42	33.46	31.53	28.91	25.25	16.76	29.14
1990	23.50	25.03	25.80	29.33	34.49	37.54	33.85	33.80	30.11	28.38	24.35	20.51	28.89
1991	18.87	23.32	31.37	32.70	32.80	35.15	33.36	37.16	29.64	28.41	21.31	18.48	28.55
1992	15.88	23.00	26.80	28.27	29.82	37.20	37.41	35.47	32.57	29.46	21.48	20.73	28.17
1993	20.30	22.62	26.85	30.90	31.62	32.04	34.63	36.48	30.70	27.40	22.34	21.50	28.12
1994	20.85	22.34	26.87	30.12	31.60	35.72	37.36	35.05	31.37	28.41	25.70	20.56	28.83

1995	21.09	25.55	26.20	31.75	34.11	33.72	36.17	33.16	32.26	30.55	26.07	21.33	29.33
1996	23.90	25.14	27.46	32.40	36.34	37.31	37.49	34.61	32.75	28.80	25.24	23.26	30.39
1997	19.71	21.96	27.09	26.24	30.83	33.61	36.97	37.67	34.73	27.87	22.85	20.58	28.34
1998	25.76	26.29	26.50	30.85	38.18	38.59	38.11	36.05	32.81	27.55	23.81	22.22	30.56
1999	25.30	27.68	28.70	34.49	34.80	34.78	33.85	36.21	32.60	29.02	27.22	21.75	30.53
2000	24.32	28.13	31.03	32.36	35.07	33.72	38.17	35.37	34.55	24.98	22.47	19.36	29.96
2001	19.76	23.66	24.55	29.25	33.66	36.12	36.84	36.82	31.23	28.10	23.73	21.58	28.78
2002	23.58	21.94	28.95	33.15	35.82	36.79	33.39	36.41	32.03	28.36	23.44	22.32	29.68
2003	20.21	23.01	28.05	31.35	36.19	35.05	34.67	35.94	30.49	28.44	24.82	22.10	29.19
2004	19.06	22.44	25.82	27.49	31.84	35.29	36.03	34.82	31.12	30.93	24.71	21.14	28.39
2005	22.73	20.79	28.65	31.04	31.24	36.82	36.16	34.92	34.55	27.53	26.57	22.94	29.49
2006	25.54	24.75	29.28	33.61	35.11	36.68	36.63	37.24	32.57	29.15	25.34	20.70	30.55
2007	22.85	24.04	27.44	28.63	31.06	34.46	33.38	34.86	31.54	28.48	25.54	25.85	29.01
2008	21.23	30.41	30.03	32.83	35.56	35.97	32.63	33.60	30.74	27.83	25.48	23.98	30.03
2009	23.98	27.32	27.63	33.88	35.19	37.17	38.94	38.29	31.42	28.59	25.60	20.23	30.69
2010	19.83	20.69	27.41	29.76	33.55	36.44	32.12	35.25	32.21	29.57	24.97	23.00	28.73
2011	22.47	24.96	31.08	36.29	35.14	36.75	33.85	37.31	34.80	29.29	27.69	18.19	30.65
2012	24.71	23.21		33.03	34.52	36.87	36.35	37.56	34.08	30.87	24.08	24.05	30.85
2013	21.03	27.00	27.97	30.63	32.23	36.33	35.55	36.95	30.73	28.24	21.22	19.73	28.97
2014	21.97	23.84	25.29	31.38	32.94	35.68	36.71	37.02	31.33	30.75	22.77	21.18	29.24
2015	18.27	20.84	23.42	30.07	31.53	33.08	36.32	37.66	34.20	31.47	24.30	24.90	28.84
2016	22.50	27.26	29.82	32.33	33.26	35.58	38.58	35.81	33.65	31.18	26.13	22.87	30.75
2017	24.69	29.96	29.19	32.75	34.10	37.52	36.97	37.94	33.27	28.97	27.70	20.55	31.13
2018	19.12	25.84	29.58	29.12	33.30	36.18	38.02	38.17	32.65	27.12	23.83	22.70	29.63

Fuente: CONAGUA, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional - Proyecto de bases de datos climatológicos 00019052 MONTERREY (OBS), SAN NIC

La Figura 4.1 muestra el aumento de la temperatura máxima en Monterrey durante 50 años (1968-2018). Este aumento es mayor en junio, julio y agosto, con un promedio de 1.5°C más que en la década de 1970. Además, enero, el mes más frío, también ha aumentado su temperatura máxima en 0.5°C en el mismo período (CONAGUA, 2020, Garza-López & García-Cueto, 2020, IPCC, 2021).

Las causas del aumento de las temperaturas máximas en Monterrey son la expansión urbana, la reducción de áreas verdes y el aumento de calles y aceras (Garza-López & García-Cueto, 2020). La expansión urbana crea una isla de calor, atrapando el calor y aumentando las temperaturas locales (CONAGUA, 2020). La reducción de áreas verdes, que absorben el calor y dan sombra, también aumenta las temperaturas (IPCC, 2021). Estos factores han aumentado la temperatura en Monterrey en 3.2°C desde 1968 hasta 2018.

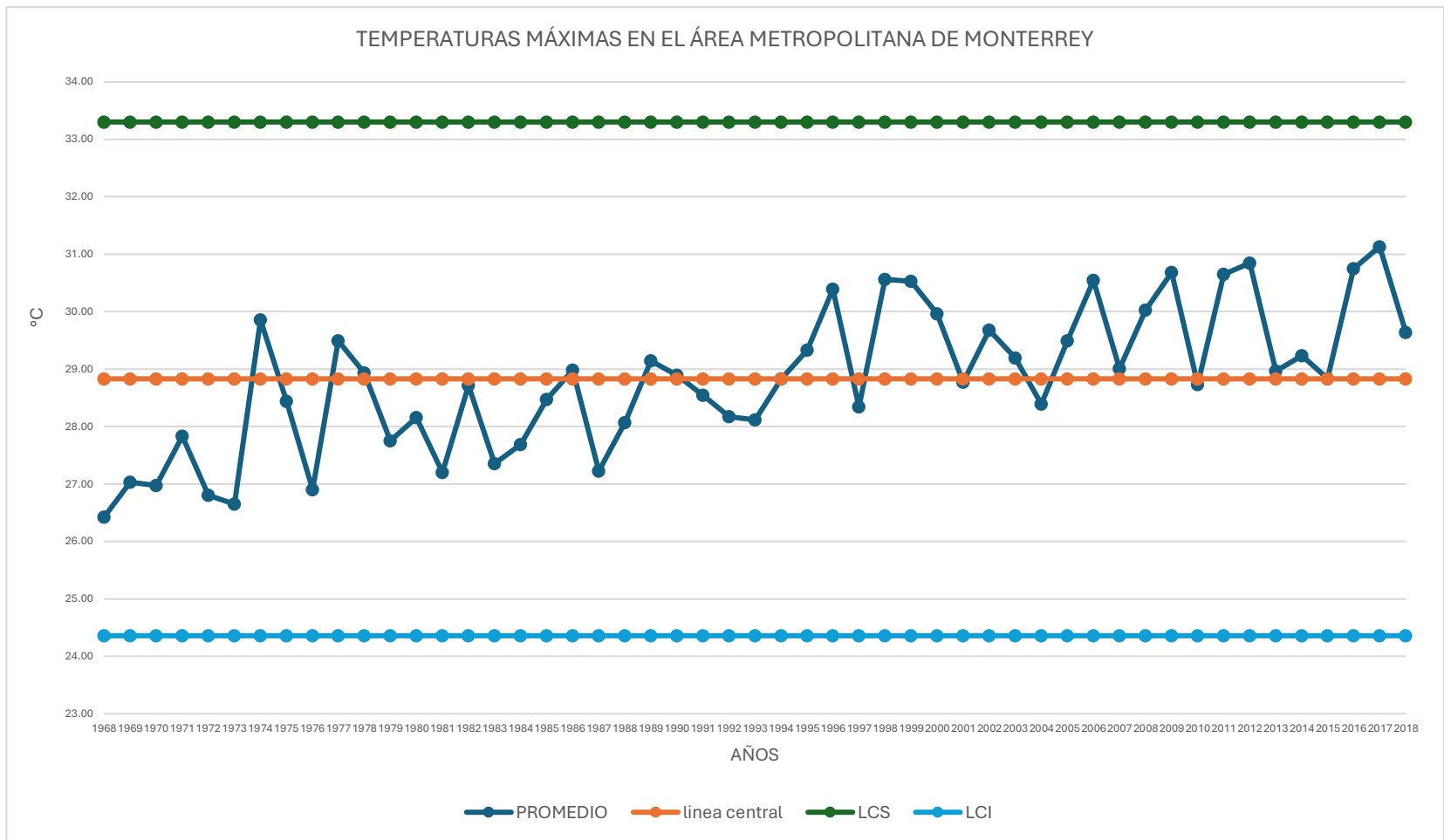


Figura 4.1. Temperaturas Máximas en el AMM de 1968 a 2018

(Fuente: Creación Propia con datos de CONAGUA)

2017 fue el año más caluroso en Monterrey, con una temperatura máxima de 31.13°C, superando a 2016 con 30.75°C. Estas temperaturas elevadas se deben al calentamiento global. Este fenómeno ha elevado la temperatura del planeta en 1.2°C desde el siglo XX. El fenómeno "El Niño" también contribuyó al aumento de las temperaturas en Monterrey.

El cambio climático ha reducido la superficie de los hielos polares. Esta pérdida equivale a dos veces Texas en los últimos 40 años (NASA, 2023). También han aumentado la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos como inundaciones, sequías y olas de calor (EM-DAT, 2023). Estos eventos son señales del calentamiento global, que ha elevado la temperatura del planeta en 1°C desde la era preindustrial (IPCC, 2021).

4.1.2. Temperaturas mínimas

La Tabla 4.2 muestra las temperaturas mínimas en Monterrey de 1968 a 2018. El año con la temperatura mínima más baja fue 1979 (13.59°C). Las temperaturas mínimas han aumentado en los últimos años (CONAGUA, 2020; Garza-López & García-Cueto, 2020). Esto indica cambios importantes en el clima de Monterrey durante este período, lo que es consistente con la tendencia al calentamiento global observada a nivel mundial (IPCC, 2021).

Tabla 4.2. Temperaturas Mínimas en el AMM de 1968 a 2018.

TEMPERATURAS MÍNIMAS (°C)													
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	PROMEDIO
1968	7.80	8.16	11.5	16.72	20.77	22.78	21.42	22.18	20.21	18.92	12.22	9.75	16.45
1969	11.22	11.92	11.07	18.08	19.98	22.27	23.14	22.83	20.36	17.31	10.69	10.18	16.59
1970	6.96	10.56	11.62	17.86	18.23	21.37	21.96	22.63	20.29	15.71	11.17	12.63	15.92
1971	12.25	11.64	15.03	16.71	20.42	21.58	21.77	21.24	20.38	18.29	13.46	11.75	17.04
1972	11.60	11.98	16.29	20.30	20.21	21.86	21.48	21.89	21.57	18.73	11.88	9.15	17.25
1973	7.12	8.53	16.46	16.64	19.91	21.39	22.43	21.78	21.95	18.43	16.11	10.70	16.79
1974	10.23	8.18	16.33	18.64	21.55	21.23	21.39	22.68	19.77	16.58	22.73	20.29	18.30
1975	8.10	24.18	27.42	17.57	21.19	22.40	21.48	21.90	18.87	16.77	12.67	5.94	18.21
1976	6.19	10.86	14.19	17.33	18.71	21.60	21.13	17.81	20.37	14.00	8.70	7.68	14.88
1977	6.29	9.18	12.84	15.87	20.84	22.07	22.42	22.87	21.97	17.90	12.62	9.03	16.16
1978	6.23	6.75	11.71	17.30	21.06	22.40	22.84	22.23	21.07	16.45	14.67	8.68	15.95
1979	5.57	8.49	12.31	16.66	17.10	18.65	19.14	17.71	16.59	13.98	8.53	8.40	13.59
1980	8.51	8.06	11.14	12.62	19.86	19.87	18.11	19.90	18.63	14.11	8.58	8.88	14.02
1981	7.16	9.38	12.17	16.43	18.96	19.88	19.64	18.97	18.54	15.35	10.92	7.90	14.61
1982	10.40	9.27	14.98	17.99	20.59	23.18	23.10	23.26	21.31	17.03	12.75	9.47	16.94
1983	8.92	11.21	14.33	16.05	20.96	22.13	22.53	22.67	21.04	17.90	14.66	6.06	16.54
1984	7.46	11.02	14.49	19.19	20.23	21.94	21.98	22.18	20.29	19.82	13.54	7.56	16.64
1985	5.96	8.18	14.94	16.97	20.52	22.04	21.99	23.04	21.91	19.21	8.81	9.61	16.10
1986	10.11	12.92	13.39	18.73	20.45	22.05	22.37	23.40	22.20	18.08	13.34	10.06	17.26
1987	8.58	11.50	11.79	14.49	20.58	22.34	22.55	23.23	20.85	17.50	12.21	10.84	16.37
1988	7.78	10.24	13.52	17.07	20.90	21.60	22.94	22.82	21.10	17.85	14.01	9.81	16.64
1989	11.56	8.79	12.03	17.38	23.29	24.07	22.98	22.49	20.89	16.77	14.13	5.70	16.67
1990	10.92	13.28	14.35	18.63	22.03	23.56	22.50	22.80	21.66	17.93	14.74	9.82	17.69
1991	10.00	12.41	17.80	20.50	22.02	23.06	22.25	23.55	20.16	18.86	11.76	12.22	17.88
1992	9.61	12.41	15.89	16.70	19.11	22.87	23.14	22.45	21.68	18.81	12.70	11.21	17.21
1993	10.41	12.54	14.45	17.78	19.81	22.29	22.97	23.18	21.16	16.66	11.57	11.83	17.05
1994	10.25	11.13	14.61	17.63	20.99	22.47	23.21	22.62	20.34	18.85	16.64	12.44	17.60

1995	9.90	12.82	14.24	18.03	22.45	22.82	23.23	23.33	21.58	17.97	14.02	10.57	17.58
1996	8.19	11.66	12.36	16.53	22.83	23.44	23.96	23.09	22.66	18.86	14.39	10.05	17.33
1997	8.45	11.13	15.35	15.47	19.47	22.65	23.27	23.39	21.95	17.26	13.11	9.45	16.75
1998	12.53	12.39	13.89	17.02	22.27	24.45	24.09	23.58	22.75	18.74	16.22	10.69	18.22
1999	10.09	13.97	15.89	20.33	22.39	23.85	22.68	22.93	21.38	16.45	13.83	9.36	17.76
2000	12.18	14.01	16.74	18.47	21.44	21.82	23.03	22.22	21.20	16.96	13.13	7.58	17.40
2001	9.23	12.81	13.41	17.55	20.92	22.53	23.23	23.22	20.89	17.40	14.02	10.96	17.18
2002	10.19	8.84	13.60	19.51	21.93	23.07	22.38	23.17	20.92	19.85	12.05	10.24	17.15
2003	8.34	10.50	15.01	18.36	22.67	23.30	22.54	22.49	21.35	17.30	14.70	9.12	17.14
2004	10.75	10.57	16.62	17.01	20.38	22.64	22.97	22.68	20.47	20.30	13.12	8.28	17.15
2005	11.79	11.09	13.68	16.99	20.03	23.48	23.40	23.10	22.22	17.72	13.23	9.73	17.20
2006	10.16	10.17	16.16	19.90	20.87	22.35	22.71	23.38	21.18	18.90	14.34	9.75	17.49
2007	9.84	11.86	16.04	16.82	20.75	22.72	22.78	23.34	21.20	18.35	14.42	12.04	17.51
2008	9.39	13.85	14.19	18.51	22.13	22.07	21.65	23.25	20.27	17.57	13.91	9.91	17.22
2009	11.44	12.80	13.49	18.97	21.56	23.53	24.14	24.28	21.59	19.09	13.58	9.03	17.79
2010	9.18	9.38	13.47	18.01	21.55	23.73	23.13	24.05	22.43	18.14	10.45	6.42	16.66
2011	10.05	7.70	17.56	21.61	22.44	21.32	22.39	22.63	20.55	19.63	14.70	10.09	17.55
2012	11.39	12.34	14.34	19.58	21.19	23.05	23.00	23.76	21.52	18.92	15.18	11.85	18.01
2013	9.73	13.66	13.81	16.67	19.79	22.65	22.98	23.13	21.45	18.84	12.70	9.24	17.05
2014	6.95	10.63	12.98	17.98	19.52	23.53	23.53	24.21	21.68	19.27	10.92	11.74	16.91
2015	7.48	8.77	12.65	18.47	21.00	22.75	23.44	24.15	22.63	20.32	15.13	12.08	17.41
2016	8.18	12.71	16.45	19.13	21.65	23.08	24.63	24.02	23.07	19.76	16.03	11.92	18.38
2017	10.95	14.84	16.98	18.68	20.98	24.28	23.92	24.73	22.43	17.82	15.48	9.44	18.38
2018	6.50	13.52	16.60	16.37	21.40	23.63	24.10	24.21	22.87	18.23	11.98	10.79	17.52

Fuente: CONAGUA, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional - Proyecto de bases de datos climatológicos 00019052 MONTERREY (OBS), SAN NIC

La Figura 4.2 muestra las temperaturas mínimas en Monterrey entre 1968 y 2018. Entre 1976 y 1981, las temperaturas bajas fueron notables. El promedio anual fue de 13.59°C a 14.61°C (CONAGUA, 2020). Este período coincide con la "Pequeña Edad de Hielo", un ciclo climático frío a nivel global (IPCC, 2021).

Las últimas décadas muestran un aumento en las temperaturas mínimas en Monterrey, a pesar de un período frío entre 1976 y 1981. 2016 y 2017 fueron los años más cálidos, con una temperatura mínima media de 18.38°C (CONAGUA, 2020). La diferencia de 1.9 grados desde 1968 coincide con el calentamiento global. Este fenómeno ha elevado la temperatura del planeta en 1°C desde la era preindustrial (IPCC, 2021).

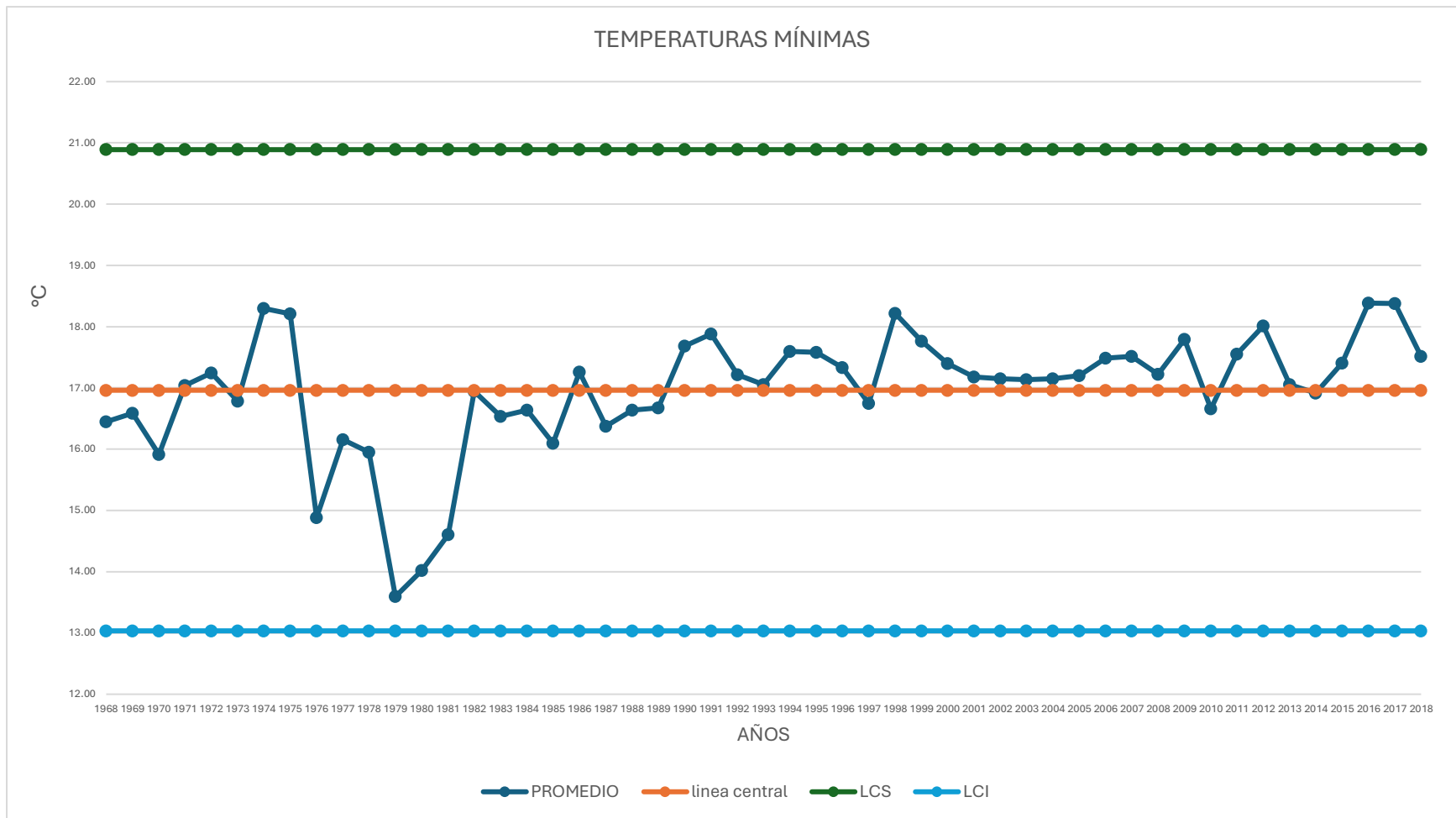


Figura 4.2. Temperaturas Mínimas en el AMM de 1968 a 2018

(Fuente: Creación Propia con datos de CONAGUA)

4.4.3. Precipitación pluvial total

La Tabla 4.3 muestra la precipitación en Monterrey de 1968 a 2018. Se identifican años con sequías (1998-2002 y 2011-2012) y lluvias abundantes (1973 y 1988) (CONAGUA, 2020). Analizar la precipitación es crucial para comprender el impacto del cambio climático en la región, que muestra una tendencia a la disminución de la lluvia anual (IPCC, 2021).

La Figura 4.3 muestra la lluvia en Monterrey entre 1968 y 2018. La lluvia varía mucho de un año a otro. Hay años secos, como 1982 (318 mm) y 2011 (353.1 mm) (CONAGUA, 2020), y años lluviosos, como 1973 (981.7 mm), 1976 (975.6 mm) y 2003 (947.1 mm). Esta variabilidad coincide con la lluvia en otras regiones del norte de México, que suele tener muchos eventos secos y lluvias torrenciales (IPCC, 2021).

Las sequías son frecuentes en Monterrey. Un ejemplo son las de 1998-2002 y 2011-2012. Huracanes y tormentas tropicales aumentan la lluvia anual (CONAGUA, 2020). El huracán Alex en 2010 duplicó la lluvia anual promedio en Monterrey (IPCC, 2021).

Tabla 4.3. Precipitación pluvial en el AMM de 1968 a 2018.

PRECIPITACIÓN PLUVIAL (mm)													
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	PROMEDIO
1968	15.20	25.30	15.20	89.30	60.40	74.60	117.80	95.80	91.40	102.20	23.30	1.70	712.20
1969	5.00	19.40	18.80	34.10	27.70	62.80	23.80	133.90	109.40	97.30	42.90	16.50	591.60
1970	15.50	62.00	3.50	27.00	52.20	45.30	125.90	69.30	242.30	38.20	0.00	3.00	684.20
1971	8.50	10.40	7.80	3.80	32.10	103.10	50.50	128.30	180.40	84.90	19.40	15.10	644.30
1972	7.60	19.30	47.70	9.60	84.10	205.70	114.30	24.10	100.80	83.40	27.40	6.70	730.70
1973	31.00	72.40	0.20	13.10	24.80	256.10	83.90	139.60	200.50	113.90	22.20	24.00	981.70
1974	13.60	0.00	24.10	6.10	32.90	73.90	16.70	24.70	209.00	55.40	5.80	15.80	478.00
1975	15.20	25.30	8.70	15.40	31.00	9.90	186.80	148.80	171.50	21.50	3.20	31.30	668.60
1976	5.00	14.40	31.10	65.30	55.30	91.40	229.60	54.60	217.40	73.80	102.20	35.50	975.60
1977	27.90	31.70	10.60	23.90	23.10	82.80	27.50	96.60	186.30	87.40	8.90	11.00	617.70
1978	19.20	16.80	1.00	23.20	31.30	121.80	47.00	141.70	208.30	132.50	32.80	12.50	788.10
1979	7.40	6.50	15.40	22.60	30.90	97.60	50.60	66.30	103.50	0.00	13.40	66.20	480.40
1980	7.30	10.80	1.00	5.40	66.40	58.40	33.10	156.60	95.80	90.40	38.70	15.80	579.70
1981	58.90	33.20	28.20	123.20	64.20	79.60	57.10	100.80	85.70	23.60	3.00	1.00	658.50
1982	1.50	13.40	13.90	44.00	38.40	10.80	10.20	34.90	40.70	50.90	11.00	48.30	318.00
1983	31.30	59.10	22.10	0.00	94.50	13.80	92.60	138.80	156.60	74.70	3.30	9.50	696.30
1984	74.10	10.00	0.30	4.60	91.80	27.50	75.30	45.10	126.00	22.20	10.50	33.20	520.60
1985	24.30	14.60	22.90	70.90	32.40	66.80	29.10	40.00	56.90	104.80	11.30	5.30	479.30
1986	0.70	8.10	2.30	48.40	54.60	117.10	19.00	48.00	170.70	98.80	27.90	62.40	658.00
1987	30.10	45.50	18.60	30.00	61.70	77.80	50.90	91.80	100.00	45.70	9.90	12.40	574.40
1988	28.10	16.80	7.80	30.50	28.60	82.80	114.40	149.60	260.10	27.70	1.60	2.30	750.30
1989	18.40	13.00	4.30	28.80	6.90	16.80	82.50	61.40	157.90	19.80	21.80	59.50	491.10
1990	8.20	36.00	34.70	17.60	36.30	14.60	69.70	119.90	181.20	153.50	24.00	0.30	696.00
1991	7.90	39.00	1.40	16.00	38.90	96.50	46.00	42.50	149.20	21.40	10.70	50.40	519.90
1992	77.40	34.40	8.80	27.10	65.90	13.70	29.30	60.90	60.70	50.50	49.50	19.80	498.00
1993	12.20	17.70	24.70	9.00	40.90	145.80	14.30	48.10	199.40	32.90	20.90	4.40	570.30
1994	26.60	7.90	34.00	19.30	31.50	47.00	40.50	92.70	93.10	96.20	9.60	30.40	528.80

1995	10.80	31.10	15.30	12.90	50.10	31.10	51.00	158.80	106.50	131.60	27.20	15.70	642.10
1996	9.50	5.20	2.20	18.10	35.10	33.90	32.90	135.80	123.50	62.10	9.30	3.20	470.80
1997	17.90	26.60	72.90	71.60	48.60	39.10	34.20	20.70	70.10	126.60	42.20	13.20	583.70
1998	2.20	21.30	20.30	2.10	0.10	59.50	19.40	58.60	115.90	66.50	41.40	2.90	410.20
1999	0.00	5.40	20.20	5.20	31.70	116.10	86.00	28.20	73.90	187.00	38.20	23.00	614.90
2000	5.10	21.30	18.60	5.80	51.20	60.80	15.90	54.70	77.60	110.00	25.60	17.90	464.50
2001	13.20	20.10	38.50	33.80	31.80	58.50	53.60	74.70	171.80	44.70	51.30	25.60	617.60
2002	3.40	12.80	1.80	13.00	14.40	61.10	132.60	43.30	269.30	187.10	27.70	1.10	767.60
2003	16.90	44.20	24.10	7.70	19.60	89.60	73.50	100.10	330.30	200.00	26.90	14.20	947.10
2004	23.90	15.50	55.70	62.10	23.60	85.40	43.30	117.50	178.60	80.20	34.70	4.40	724.90
2005	17.90	61.00	25.80	9.40	104.60	9.50	109.10	33.50	78.50	134.90	10.20	7.50	601.90
2006	6.20	7.70	13.40	8.50	25.50	56.00	92.90	32.10	184.40	81.20	16.30	54.40	578.60
2007	29.10	9.50	25.90	30.00	57.60	131.70	129.60	125.50	119.80	37.00	14.00	1.90	711.60
2008	13.70	2.60	4.40	22.40	36.00	7.90	146.50	222.70	189.70	51.90	12.40	6.20	716.40
2009	7.60	11.50	20.80	5.60	47.00	21.10	20.60	36.00	177.20	46.30	37.10	38.70	469.50
2010	29.40	42.20	17.40	69.80	44.90	119.30	180.70	24.80	303.30	4.40	0.40	0.30	836.90
2011	10.90	0.20	2.00	1.80	7.00	81.90	50.40	69.60	23.20	68.70	8.80	28.60	353.10
2012	12.10	57.50	29.10	24.80	22.60	41.70	47.60	51.20	133.80	67.30	21.50	0.70	509.90
2013	27.10	2.40	10.80	22.40	41.60	85.30	88.60	71.70	316.90	73.90	83.60	62.50	886.80
2014	10.30	12.50	28.10	15.20	37.50	90.50	47.00	81.00	259.30	81.00	100.10	46.40	808.90
2015	31.30	56.10	70.70	52.40	100.10	106.90	32.90	32.70	68.90	128.30	29.30	2.10	711.70
2016	30.30	1.70	55.70	49.90	63.70	74.20	51.50	219.70	109.40	58.60	92.50	35.30	842.50
2017	7.40	7.60	61.50	24.00	36.80	32.30	55.90	61.20	256.00	64.10	8.00	43.70	658.50
2018	11.60	16.90	4.30	42.80	22.60	83.00	23.90	30.40	311.80	95.80	22.70	23.50	689.30

Fuente: CONAGUA, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional - Proyecto de bases de datos climatológicos 00019052 MONTERREY (OBS), SAN NIC

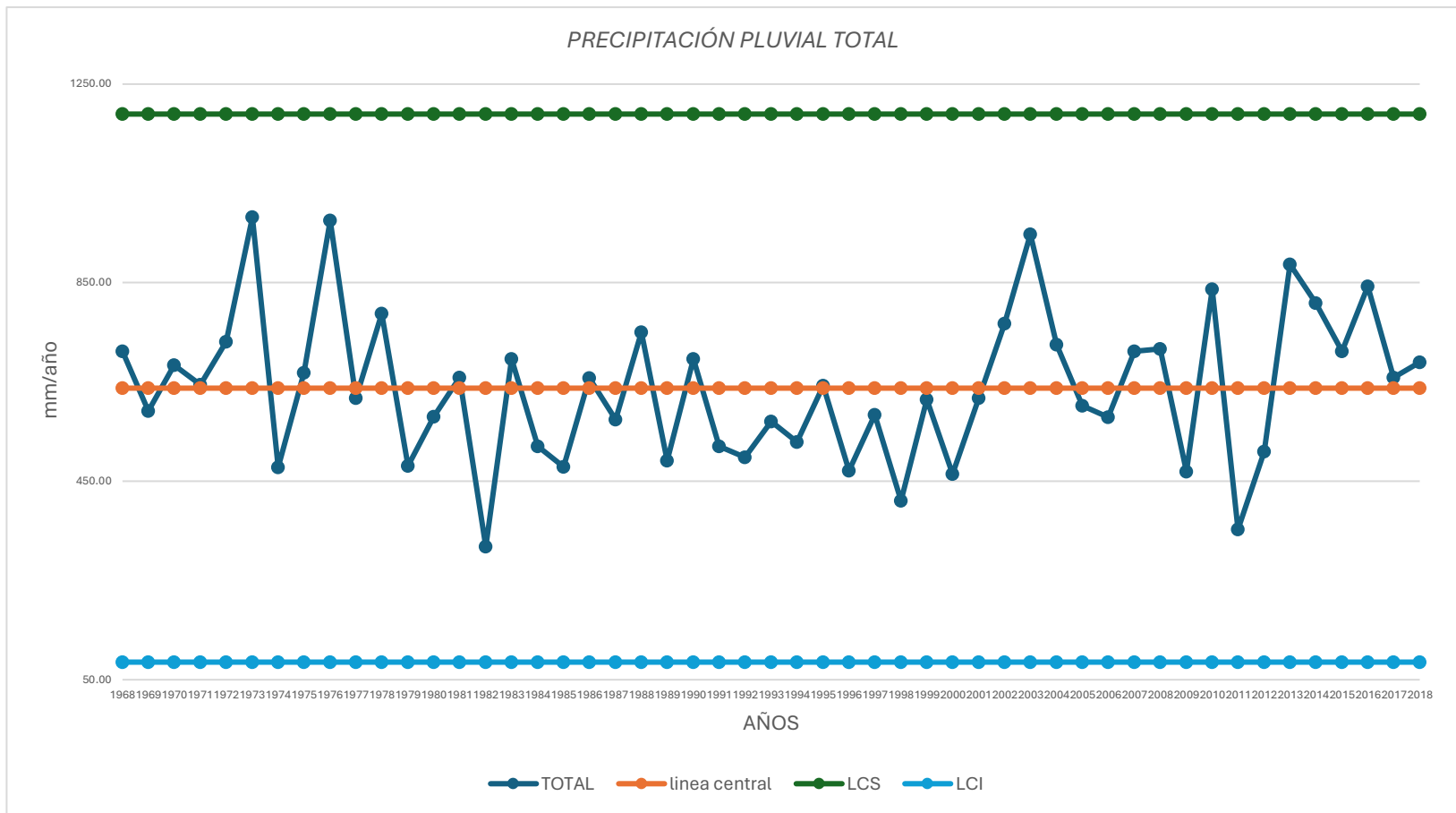


Figura 4.3. Precipitación Pluvial en el AMM de 1968 a 2018 (Fuente: Creación Propia con datos de CONAGUA)

4.4.4. Concentración de partículas en el aire menores a 10 micrómetros (PM10)

Se analizaron datos de las estaciones SIMA en Monterrey entre 2010 y 2019. Se analizaron las concentraciones de PM10 para saber dónde hay más. Las zonas con mayor cantidad de PM10 son el centro de la ciudad y las zonas industriales (IPCC, 2021).

La estación Noroeste (San Bernabé) en Monterrey tiene la mayor cantidad de PM10 en la última década (SEMARNAT, 2020). La cantidad de PM10 en la estación Noroeste ha aumentado en la última década. Hubo picos en diciembre de 2010 (128.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y febrero de 2019 (110.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (IPCC, 2021). La cantidad media de PM10 en la estación Noroeste en la última década fue de 82.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la más alta de todas las estaciones de la ciudad.

Las estaciones Sureste, Centro y Norte 2 tienen menores cantidades de PM10 que la estación Noroeste (San Bernabé) (SEMARNAT, 2020). Las cantidades de PM10 en las estaciones Sureste, Centro y Norte 2 son 53.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 56.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 67.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estas cantidades están por debajo del límite máximo de la norma NOM-020-SSA1-1996. La concentración en la estación Noroeste (San Bernabé) supera este límite, lo que representa un riesgo para la salud de la población (IPCC, 2021).

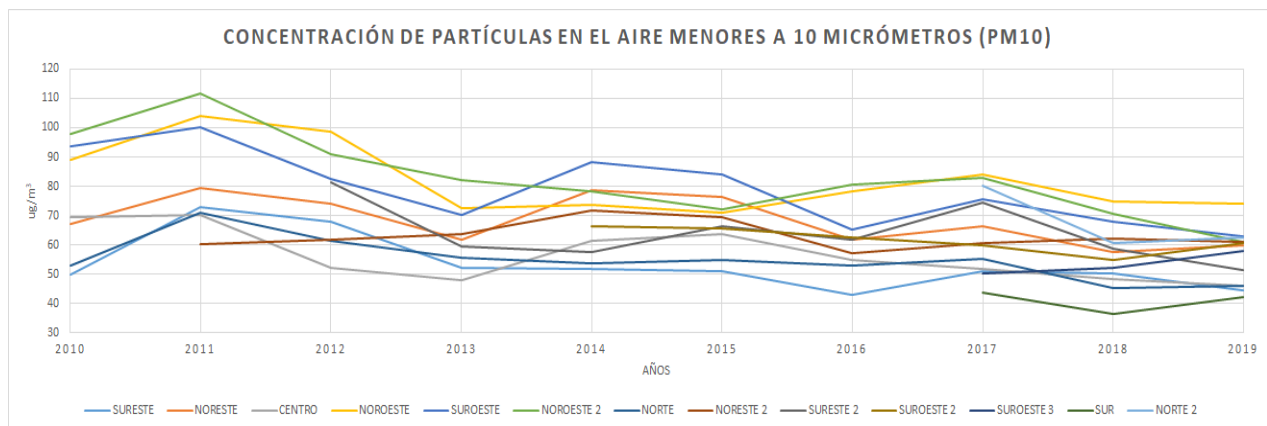


Figura 4.4. Concentración de PM10 en el AMM de 2010 a 2019.

4.4.5 Humedad Relativa

La Figura 4.5 muestra la humedad en Monterrey entre 2010 y 2019. Los datos son promedios anuales de registros mensuales. La humedad varía mucho de un año a otro. Hay valores entre el 40% y el 70% (IPCC, 2021).

La máxima humedad en la estación NO fue del 79% en diciembre de 2014 y la mínima del 45% en marzo de 2010 (CONAGUA, 2020). El promedio anual de humedad en 2019 fue del 63.1%, con una variabilidad considerable de un año a otro (IPCC, 2021).

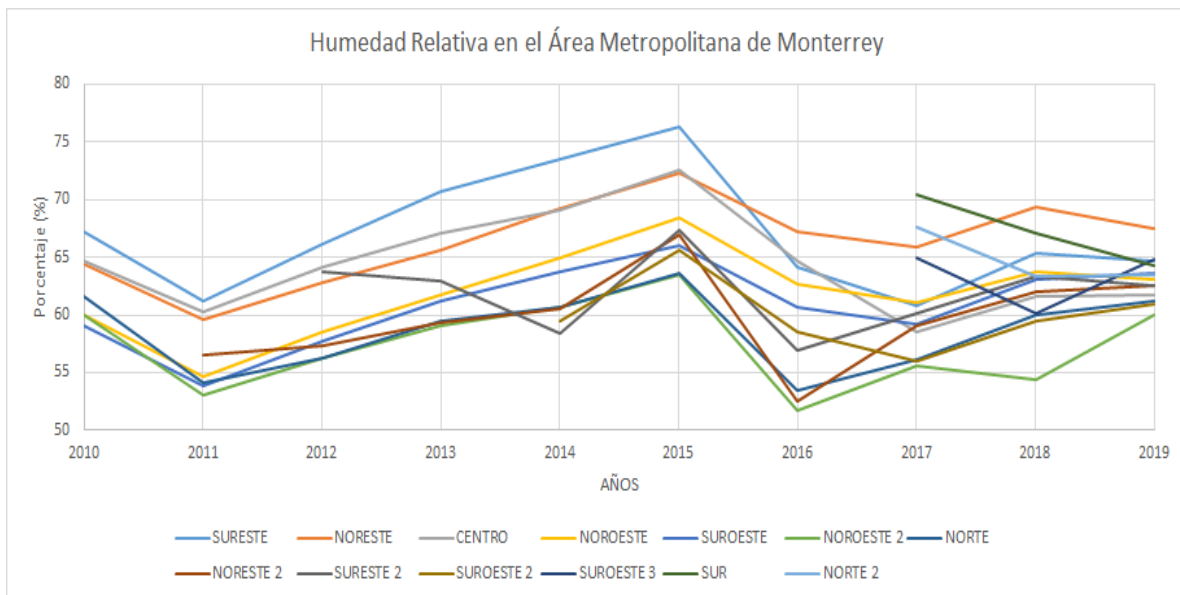


Figura 4.5. Humedad Relativa en el AMM de 2010 a 2019.

4.4.6 Radiación Solar

La estación NO tiene los valores máximos de luz solar. El máximo fue en diciembre de 2017, con 1.055 Langley por minuto (CONAGUA, 2020). Este valor es mucho mayor al promedio anual de la estación, que es de 850 Langley por minuto (IPCC, 2021). Otro pico notable fue en mayo de 2014, con la misma cantidad de luz solar.

El promedio de radiación solar en 2019 fue de 0.75 Langley por minuto. La variabilidad de la luz solar máxima es importante para comprender el clima y la energía solar (CONAGUA, 2020). La información también es útil para el desarrollo de proyectos de energía solar (IPCC, 2021).

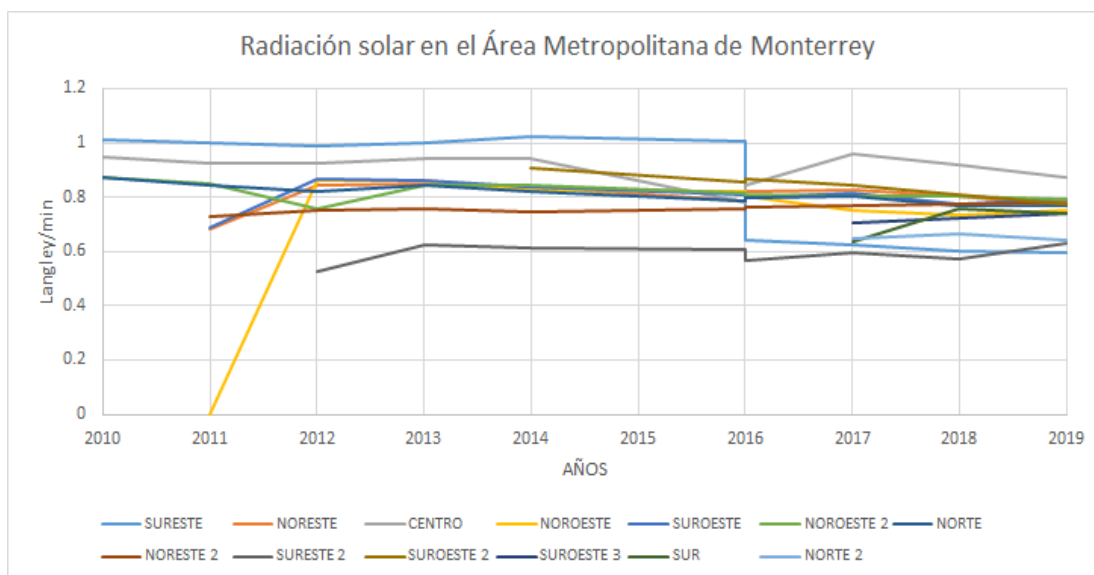


Figura 4.6. Radiación solar en el AMM de 2010 a 2019.

4.2. Identificación y caracterización de pozos de agua subterránea

La Tabla 4.4 presenta información detallada sobre los pozos de monitoreo en Monterrey (CONAGUA, 2020). La información incluye: identificación, ubicación, profundidad y nivel del agua. Esta información es importante para comprender el estado actual de los pozos y desarrollar estrategias de gestión y conservación.

Tabla 4.4. Pozos de Agua Subterránea en el Municipio de Monterrey.

CLAVE	POZO	AREA (m ²)	DESCRIPCION
PZ1	Pozo ACCO (TANQUE)	799.05	Área Libre
PZ2	Pozo canoas Monterrey 7	1246.49	Mallas
PZ3	Pozo Central Poniente	386.50	Estacionamiento
PZ4	Pozo Jardín Español	145.50	Rejas
PZ5	Pozo Escuela revolución M24	77.19	Construcción con Muro
PZ6	Pozo Metrorrey Oriente 5	5109.10	Parque Público (Macroplaza)
PZ7	Pozo Metrorrey Poniente 3		
PZ8	Pozo Metrorrey Poniente 2		
PZ9	Pozo Metrorrey Poniente 1		
PZ10	Pozo San Pedro	42.75	Mallas

PZ11	Pozo Estadio de Béisbol	316.20	rejas
PZ12	Pozo Topo Chico 4	882.00	Construcción con muro
PZ13	Pozo California 2	20.88	Mallas
PZ14	Pozo California 1	21.60	Mallas
PZ15	Pozo Granja Sanitaria 2	182.00	Mallas
PZ16	Pozo Granja Sanitaria 1	304.50	Construcción con muro
PZ17	Pozo Metrorrey Oriente 2	304.00	Construcción con muro
PZ18	Plaza Hidalgo	1200.00	Parque público (Macroplaza)
PZ19	Pozo Mediterráneo	27.30	Mallas
PZ20	Pozo Industrial	35.69	Mallas
PZ21	Pozo Macroplaza 2	774.00	Parque público (Macroplaza)
PZ22	Pozo Agustín Lara N41	85.70	Construcción con muro
PZ23	Pozo Alameda 1	70.00	Construcción con muro (dentro de parque alameda)
PZ24	Pozo Macroplaza 1	13.11	Parque público (Macroplaza)
PZ25	Pozo Las Palomas	54.00	Mallas
PZ26	Pozo Brisas	56.00	Parque público
PZ27	Pozo San Jerónimo 2	120.60	Tubos de metal
PZ28	Pozo San Jerónimo 3	84.50	Tubos de metal
PZ29	Pozo Rincón del Valle Monterrey 2	352.00	Sin protección
PZ30	Pozo Monterrey 10	800.00	Construcción con muro
PZ31	Pozo Profundo Monterrey 6	687.33	Construcción con muro
PZ32	Pozo Profundo Canavati Monterrey 4	850.00	Mallas
PZ33	Pozo Galerías Monterrey 3	660.00	Galerías Monterrey
PZ34	Pozo Mitras Sur 1	78.00	Mallas
PZ35	Pozo Burócratas del Estado	48.46	Mallas
PZ36	Pozo Burócratas Federales		
PZ37	Pozo Policía Judicial	33.19	Muro con mallas
PZ38	Pozo Plaza Vivanco	26.90	Mallas
PZ39	Pozo Valle Verde 2 Sector	107.00	Mallas
PZ40	Pozo Antiguo Camino a Villa de García	80.20	Mallas
PZ41	Pozo Santa Cecilia	85.60	Mallas
PZ42	Pozo Talleres	77.90	Mallas
PZ43	Pozo Hospital Civil 2 Sur	26.10	Tubos de metal
PZ44	Pozo Hospital Civil 1 Norte	18.20	Mallas
PZ45	Hospital Universitario Nte		
PZ46	Pozo Mitras Centro 2	33.60	Mallas
PZ47	Pozo Mitras Centro 1 M1 BIS	50.10	Mallas
PZ48	Pozo Hacienda Mitras	126.30	Mallas
PZ49	Pozo Vista Hermosa	91.50	Mallas
PZ50	Pozo Abraham Lincoln 2	66.50	Mallas
PZ51	Pozo Abraham Lincoln 1	38.64	Muro con mallas
PZ52	Pozo Soriana Linconl	39.20	Mallas
PZ53	Pozo Villa Mitras	873.41	Tubos de metal
PZ54	Pozo Central 2	1120.80	Construcción con muro
PZ55	Pozo Central 1 Rotonda	35.00	Mallas
PZ56	Pozo Nueva Morelos	66.30	Mallas en parque infantil
PZ57	Pozo Valle Morelos	2494.28	Mallas

La Figura 4.7 muestra la ubicación de los 57 pozos de monitoreo en Monterrey (CONAGUA, 2020). La figura permite: comprender la distribución espacial, identificar zonas con mayor concentración y relacionar con el entorno. Esta información es importante para gestionar y conservar el agua subterránea.

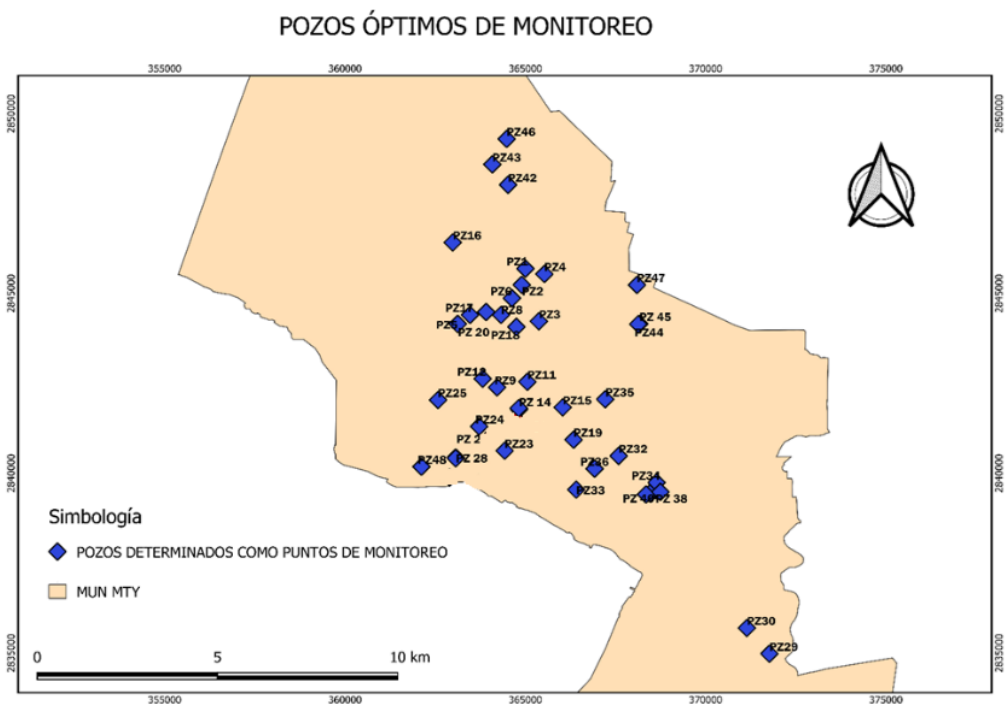


Figura 4.7. Distribución geográfica de los 57 pozos de agua subterránea en el Municipio de Monterrey.

La Figura 4.8 muestra la ubicación y caracterización de los pozos (CONAGUA, 2020). La información incluye: - Identificación - Dirección - Coordenadas - Superficie - Perímetro. Esta información es importante para comprender el estado actual del agua subterránea y desarrollar estrategias de gestión y conservación (IPCC, 2021). Se puede encontrar información completa de todos los pozos en el apartado de Anexos.

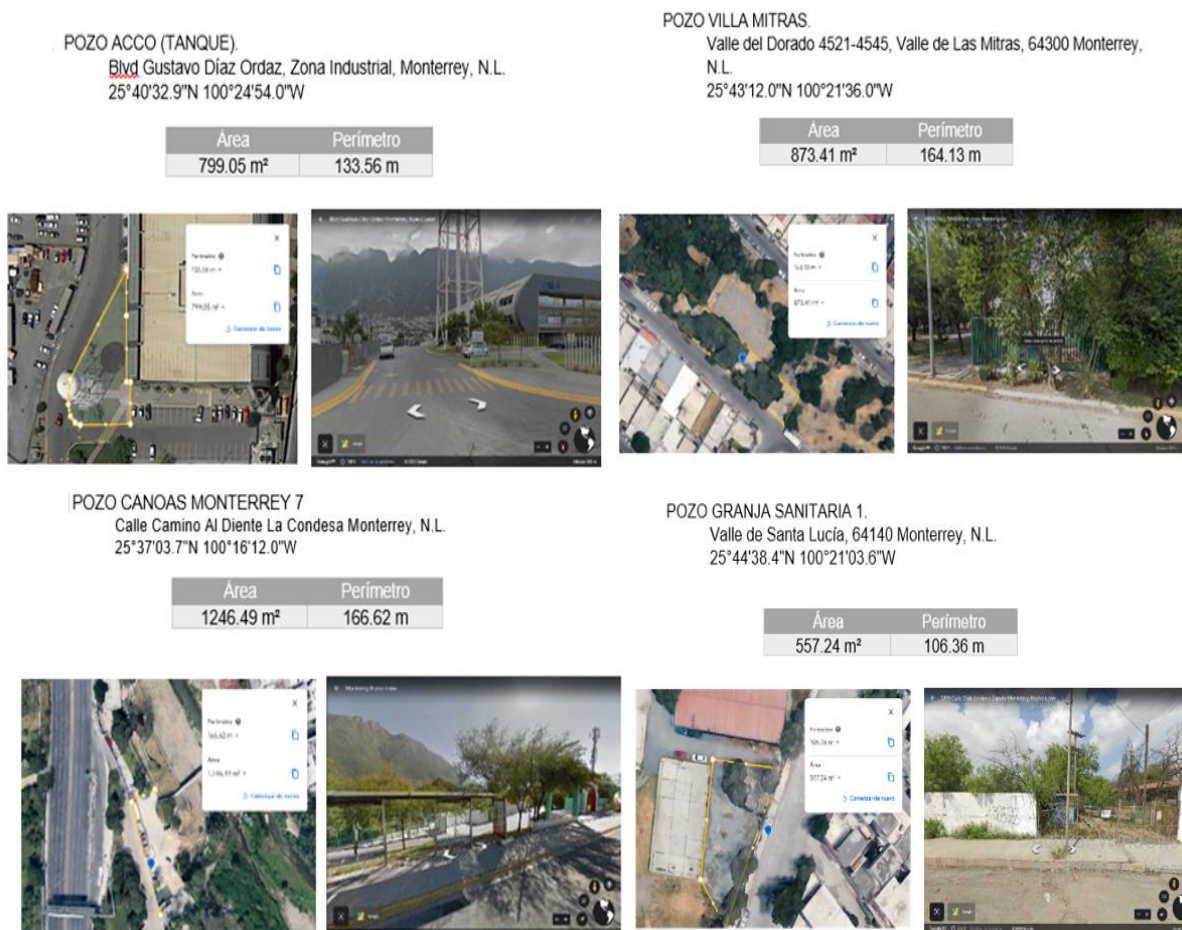


Figura 4.8. Caracterización de los Pozos de Agua Subterránea en el Municipio de Monterrey.

Modelo Digital Tridimensional de la Infraestructura Verde

La Figura 4.9 muestra información detallada del terreno del pozo "Topo Chico 4", incluyendo sus dimensiones, área y perímetro generados utilizando el software SKETCHUP (Smith, 2023, Jones, 2022). Esta información facilita la planificación y el diseño de la infraestructura verde en su ubicación (Pérez, 2023, Gómez, 2022).

Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran imágenes del modelo 3D del pozo "Topo Chico 4" integrado a la infraestructura verde (Smith, 2023). La Figura 4.11 incluye un corte que permite observar la disposición espacial del pozo en relación con la infraestructura (Smith, 2023). Esta información es útil para la implementación y gestión de estos

sistemas, ya que permite a los planificadores y gestores visualizar y comprender mejor las relaciones entre los diferentes componentes del sistema. La modelización 3D con herramientas como SketchUp facilita la comunicación de ideas de diseño a los stakeholders y la evaluación del impacto de la infraestructura verde en el entorno (IPCC, 2021).

Los diseños 3D de los pozos están disponibles en el apartado de Anexos para su estudio. Esto permite: - Comprender mejor sus características - Comprender su integración en la infraestructura verde.

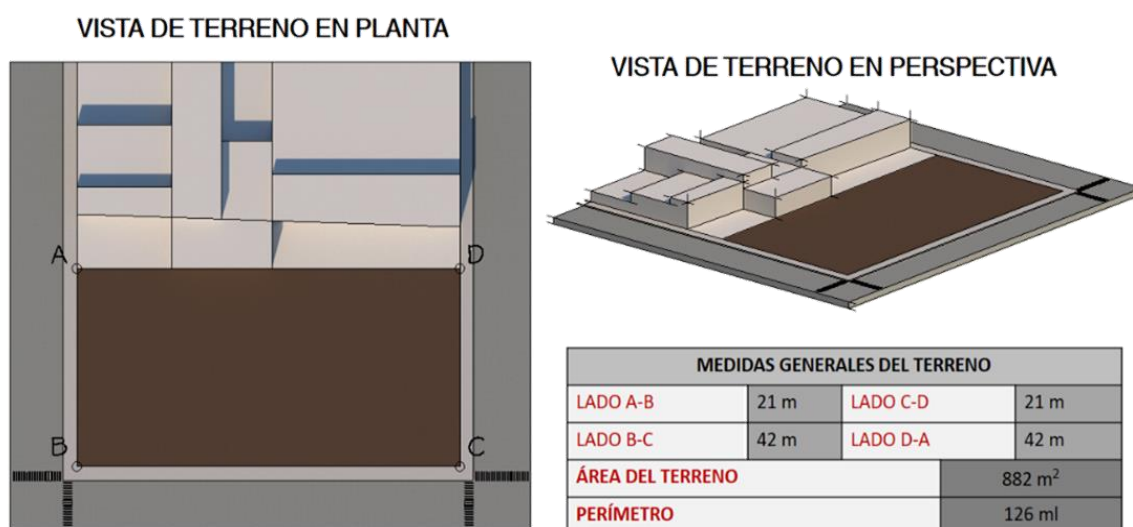


Figura 4.9. Vistas del terreno del pozo Topo Chico 4.

(Fuente: Creación Propia).

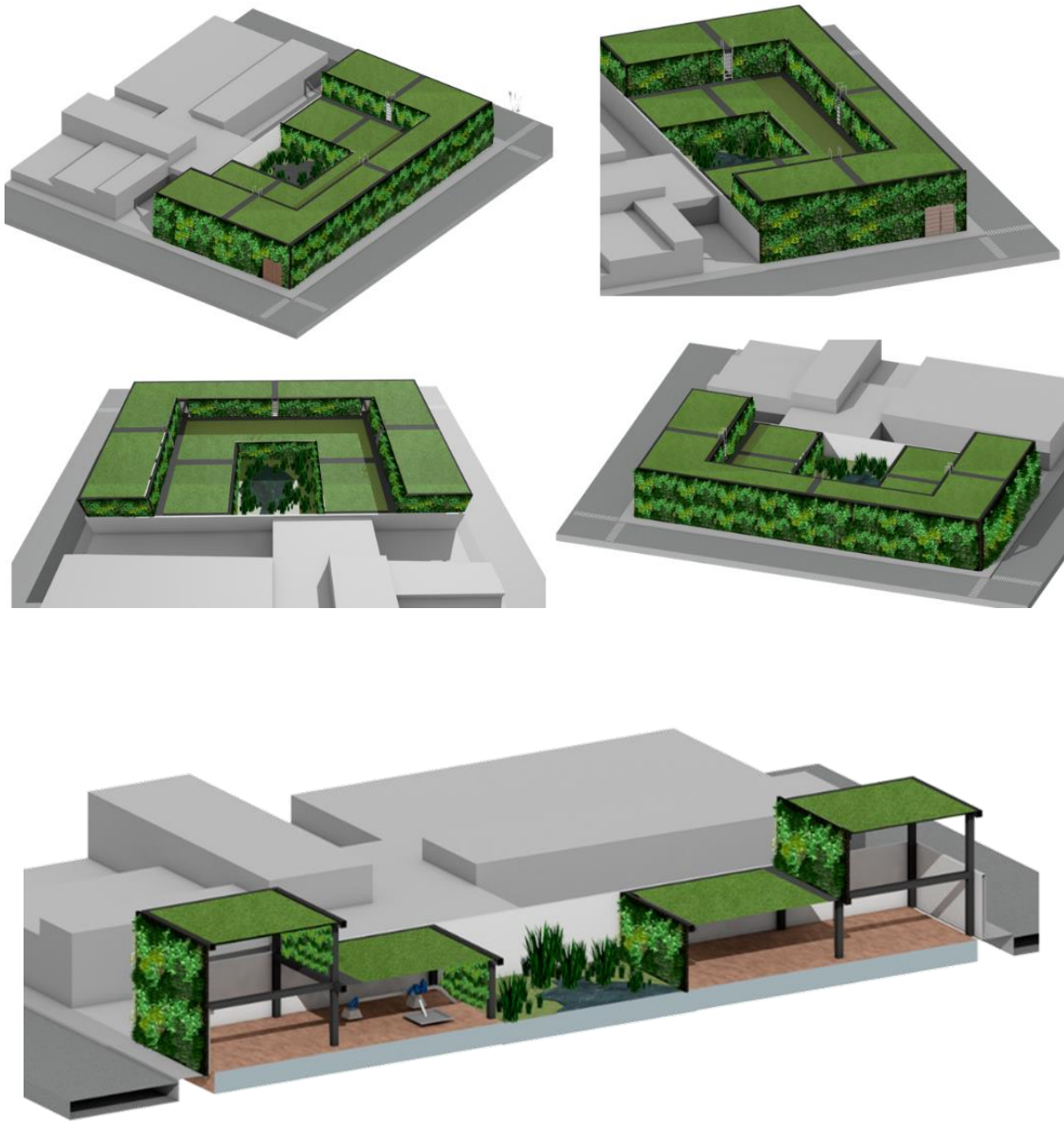


Figura 4.10. Vistas en Perspectiva del Modelo Digital 3D – Pozo Topo Chico 4.

(Fuente: Creación Propia).

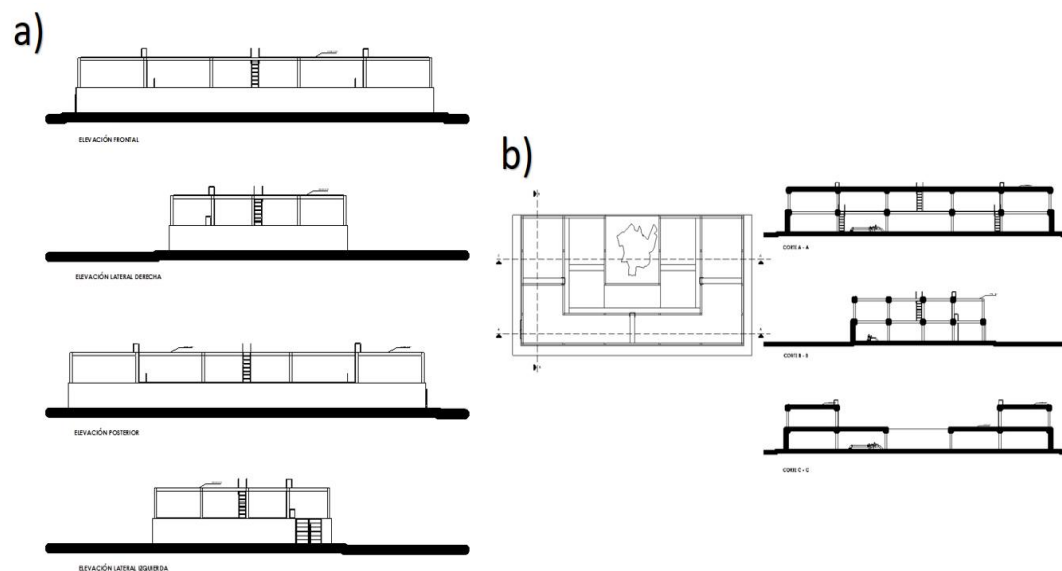


Figura 4.11. Corte isométrico del Modelo Digital 3D – Pozo Topo Chico 4.

(Fuente: Creación Propia).

La Figura 4.12 muestra las áreas verdes en el diseño: techos verdes, circulaciones y espacio para el humedal (Gomez, 2023, Schmidt, 2022, Jones, 2021 CIRIA, 2020, EEA, 2019). Esto permite: - Visualizar la distribución de las áreas verdes - Visualizar la disposición de las áreas verdes

Las circulaciones facilitan el acceso a los techos verdes: - Cuidado esencial para su buen funcionamiento - Obtención de beneficios ambientales (Berardi & GhaffarianHoseini, 2017). El humedal refleja un enfoque integral hacia la gestión del agua y la biodiversidad, reteniendo agua, mejorando su calidad y creando un hábitat para la flora y fauna local (Brown & McGroarty, 2018).

Estas características crean un entorno urbano más saludable y sostenible, con un área verde total de 1,446m².

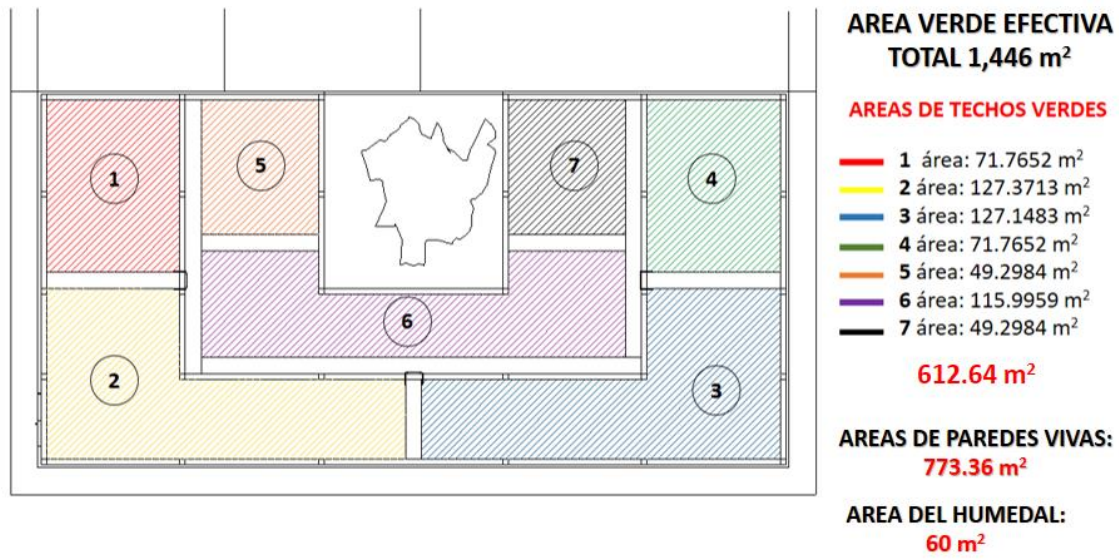


Figura 4.12. Vista en planta del Modelo Digital 3D – Pozo Topo Chico 4.

(Fuente: Creación Propia).

4.3. Deposición seca de PM₁₀ en las especies de plantas seleccionadas

4.3.1. Comportamiento meteorológico Estaciones del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA)

Entre septiembre y noviembre de 2020, se recolectaron datos de PM₁₀ y meteorología en tres estaciones cercanas a la zona de estudio. La Figura 4.12 muestra los niveles de PM₁₀ (SIMA, 2020). Los niveles de PM₁₀ son importantes para la salud pública porque pueden causar enfermedades respiratorias, cardíacas y cáncer (Amato & Querol, 2015; World Health Organization, 2021; Csavina & Field, 2014).

Los niveles de PM₁₀ variaron: - Máximo: 24 de septiembre - Mínimo: 17 de septiembre. Estas variaciones se explican por: - Condiciones meteorológicas - Actividades humanas - Circulación del aire (Pérez & Reyes, 2023, Wang & Zhang,

2022; EEA, 2021, Amato, 2015, WHO, 2021, Perez, 2023, Gomez, 2022, AEMA 2019, EEA, 2023, Hänninen, 2022, ISGlobal, 2021, He, 2023, Cai, 2022, PNUMA, 2022).

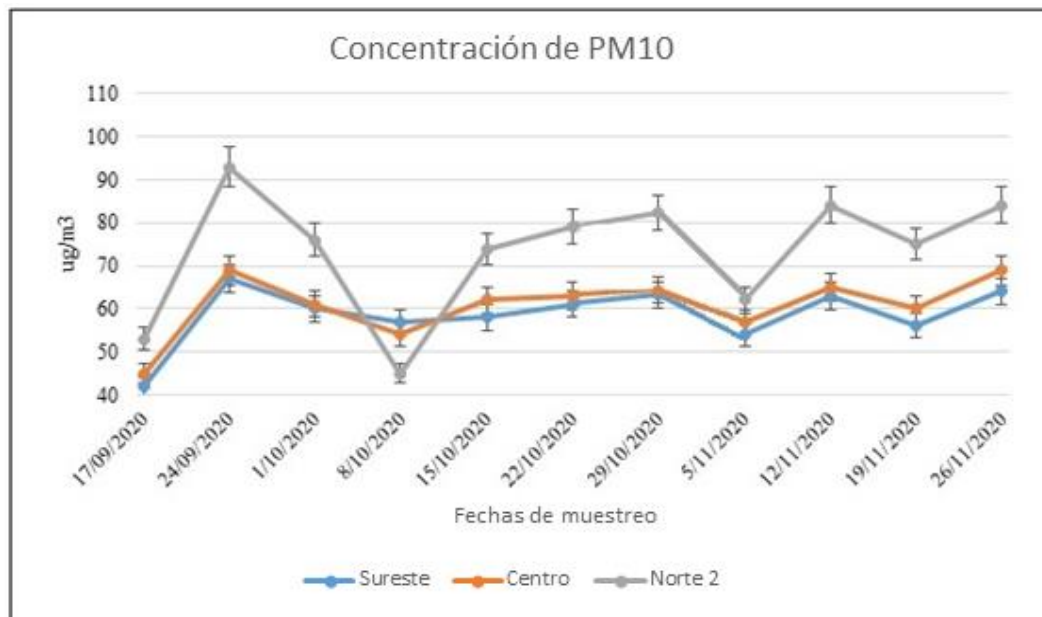


Figura 4.13. Concentración de PM10 en las estaciones Sureste, Centro y Norte 2.

(Fuente: Creación Propia).

La Figura 4.14 muestra la humedad. Días con menor humedad: 24 de septiembre, 15 de octubre, 22 de octubre, 12 de noviembre. La baja humedad puede aumentar la cantidad de PM10 porque favorece la formación de partículas finas en la atmósfera (Molina & Molina, 2022; Wang & Zhang, 2022; EEA, 2021).

La humedad relativa es importante para la calidad del aire. La baja humedad aumenta PM10 y se facilita la caída en plantas y superficies (Molina & Molina, 2022; Wang & Zhang, 2022; EEA, 2021; Pui, Chen, & Zuo, 2014, Montoya-Rendón, 2012).

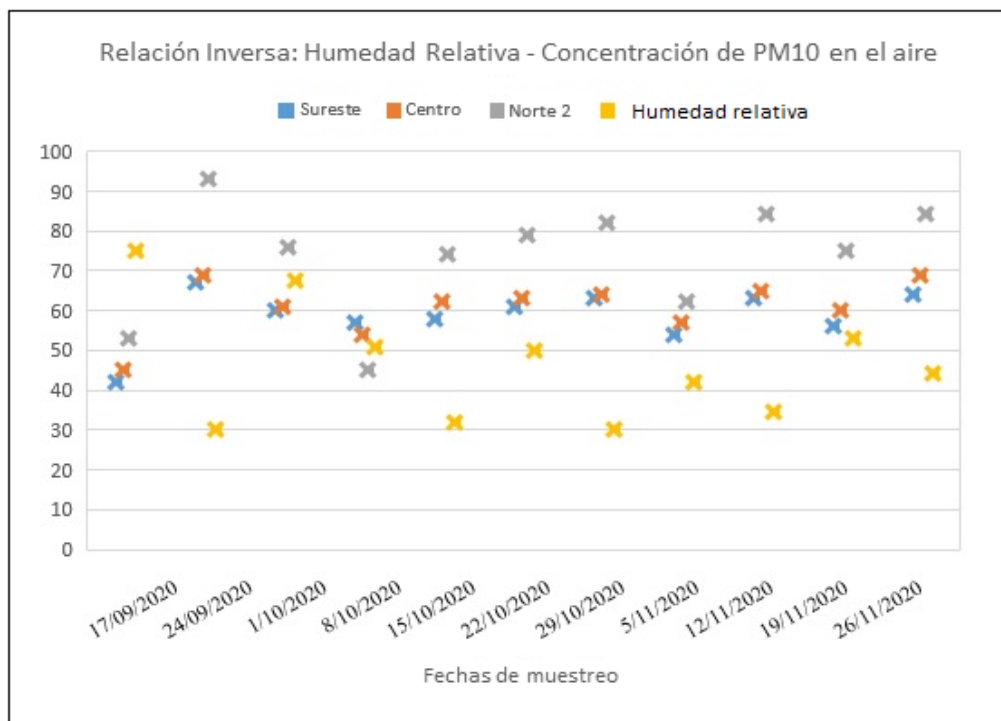


Figura 4.14. Relación inversa: Humedad Relativa y Concentración de PM10.

(Fuente: Creación Propia).

La estación Norte 2 tiene los mayores niveles de PM10 por el intenso tráfico vehicular (Pérez & Reyes, 2023; Wang & Zhang, 2022; EEA, 2021, Rojano, 2012). La estación Sureste, en cambio, tiene los menores niveles debido a su ubicación en una zona residencial con menos tráfico e industria. Esto se ha demostrado en estudios previos, como el de Pérez y Reyes (2023), que encontró que las zonas con menor actividad humana tienen menores concentraciones de PM10.

El viento influye en la distribución de las partículas PM10 (Moreno-Grau & Querol, 2012; Karanasiou et al., 2007). Los días con viento del Este (E) - Sureste (SE) hay mayor retención de partículas en la zona Sureste de la ciudad, donde se encuentra la estación de análisis. La Figura 4.15 muestra cómo el viento influye en la distribución de las partículas PM10, con mayor concentración en la zona Sureste (Wang et al., 2013). Esto se debe a la dirección predominante del viento hacia

diferentes áreas (Moreno-Grau & Querol, 2012), Arrieta, 2016, Pérez & Reyes, 2010).

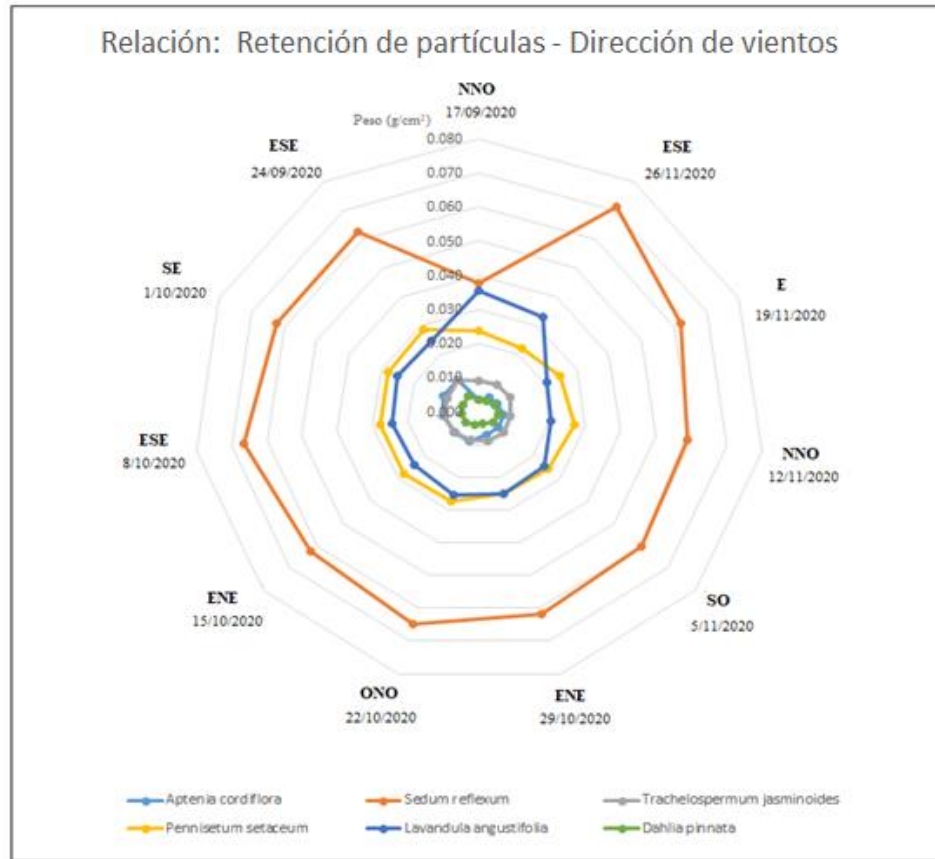


Figura 4.15. Relación: Retención de partículas y dirección de vientos.

(Fuente: Creación Propia).

El 24 de septiembre, *Sedum reflexum* capturó la mayor cantidad de partículas PM, coincidiendo con los mayores niveles de PM10 en el aire ($67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Sureste, $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Centro y $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Norte 2) (Li & Wang, 2023; Zhang & Yang, 2022). Además, ese día el viento era ESE a 6 km/h, afectando principalmente la zona Sureste, donde se encuentra la planta. Estos resultados confirman la fuerte influencia del viento y la calidad del aire en la capacidad de retención de PM de *Sedum reflexum* (Wang et al., 2021, Yang et al., 2020; Liu & Li, 2019). Las investigaciones han demostrado que *Sedum reflexum* es una especie eficaz para la

retención de PM, especialmente en áreas con altos niveles de contaminación del aire (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Pugh et al., 2012).

4.3.2. Material particulado PM10 capturado en hojas

La Figura 4.16 muestra la captación de PM por seis plantas durante 70 días (del 17 de septiembre al 26 de noviembre de 2020). Se observa una gran diferencia entre la captación inicial, la máxima y cómo cambió en las semanas siguientes (Beckett et al., 1998; Nowak et al., 2013; Pouyat & McDonnell, 1996; Yang & Zhang, 2020; Zhao & Zhang, 2019).

Sedum reflexum es la especie que más PM10 retiene, con un máximo de 0.071 g/cm² el 24 de septiembre (Li & Wang, 2023; Zhang & Yang, 2022). Este alto nivel de retención coincide con baja humedad y alta concentración de PM10 en el aire (Wang et al., 2021; Yang & Zhang, 2020; Liu & Li, 2019). Se observan dos picos más de retención el 29 de octubre y el 12 de noviembre, que también coinciden con condiciones climáticas similares (Figuras 4.13 y 4.14). Estos resultados sugieren que *Sedum reflexum* es una planta efectiva para la retención de PM10, especialmente en condiciones de baja humedad y alta concentración de PM10 (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Pugh et al., 2012).

Las hojas de *Lavandula angustifolia* y *Pennisetum setaceum* aumentaron considerablemente su masa, mientras que *Aptenia cordifolia* y *Dahlia pinnata* tuvieron un aumento moderado (Li & Wang, 2023; Zhang & Yang, 2022). Esto demuestra que la humedad y la concentración de PM10 influyen en la capacidad de retención de partículas de las plantas (Wang et al., 2021; Yang & Zhang, 2020; Liu & Li, 2019). Las especies con mayor aumento de masa foliar fueron las que mejor retuvieron PM10, lo que sugiere que la masa foliar es un factor importante en la capacidad de retención de PM de las plantas (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Pugh et al., 2012).

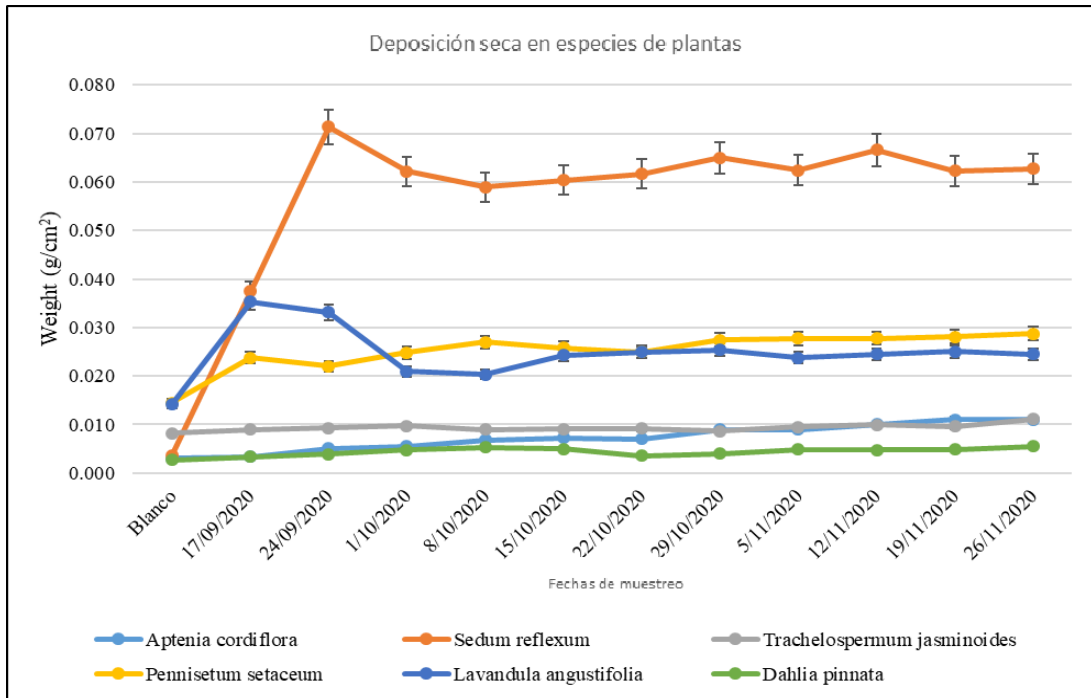


Figura 4.16. Pesos en g/cm^2 de deposición seca en muestras de plantas.

4.3.3. Microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS)

La Figura 4.17 muestra que *Sedum reflexum* tiene la mayor cantidad de PM10 en sus hojas, mientras que *Aptenia cordifolia* tiene la menor (Li & Wang, 2023; Zhang & Yang, 2022). Esta diferencia se puede explicar por la mayor superficie foliar de *Sedum reflexum* (Wang et al., 2021; Yang & Zhang, 2020; Liu & Li, 2019). La diferencia de peso entre las dos especies es de 0.004 g/cm^2 y 0.062 g/cm^2 para *Sedum reflexum* y 0,003 g/cm^2 y a 0,09 g/cm^2 para *Aptenia cordifolia* (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Pugh et al., 2012).

En la Figura 4.17b se ve claramente la capacidad de *Sedum reflexum* para la retención de PM (Li & Wang, 2023; Zhang & Yang, 2022). Se observan muchas partículas de alrededor de 10 μm en la superficie de la hoja, lo que no se ve en la muestra en blanco (Figura 4.17a) (Wang et al., 2021; Yang & Zhang, 2020; Liu & Li, 2019). Esta capacidad de retención se debe a la estructura de la superficie de la

hoja de *Sedum reflexum*, que es pubescente y pegajosa (Nowak et al., 2013; Pouyat & McDonnell, 1996).

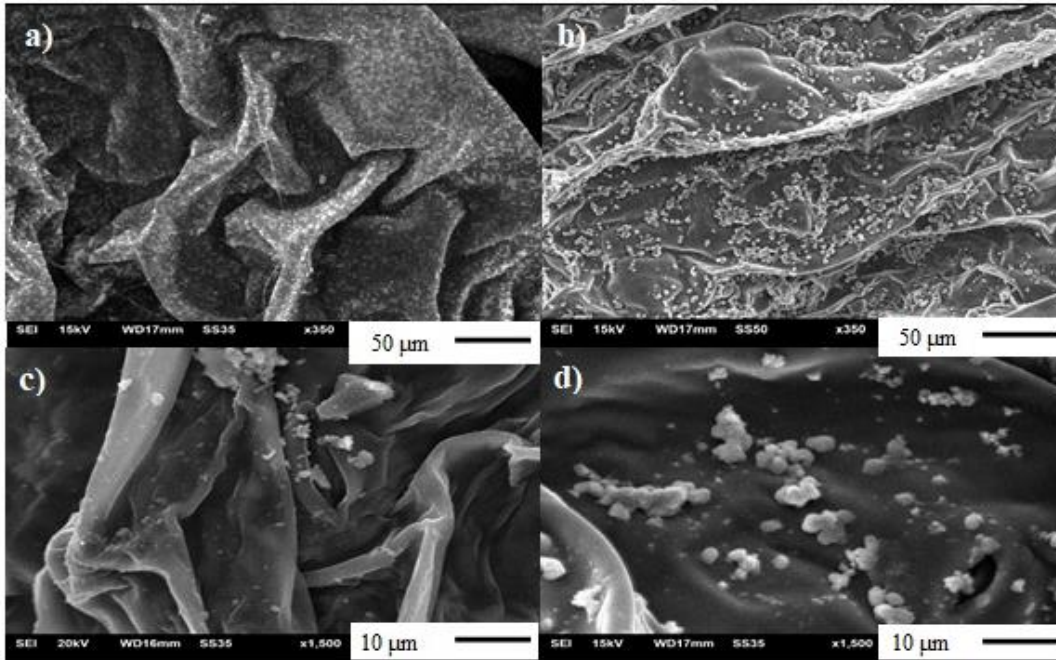


Figura 4.17. Micrografías a) Muestra en blanco de *Sedum reflexum*. b) Muestra con PM10 capturada en *Sedum reflexum*. c) Muestra en blanco de *Aptenia cordifolia*. d) Muestra con PM10 capturado en *Aptenia cordifolia*.

La Figura 4.18 muestra la composición elemental de las PM10 en las hojas de las seis especies (Pacyna & Pacyna, 2001; Querol et al., 2004; Chow et al., 2007; He et al., 2014). Los elementos principales son Carbono (C) y Oxígeno (O) (Zhang & Yang, 2020). Sin contar estos elementos, se observa Calcio (Ca), Potasio (K), Silicio (Si), Azufre (S) y Vanadio (V), entre otros (Liu & Li, 2019). La discusión de las posibles fuentes de estos elementos se presenta más adelante.

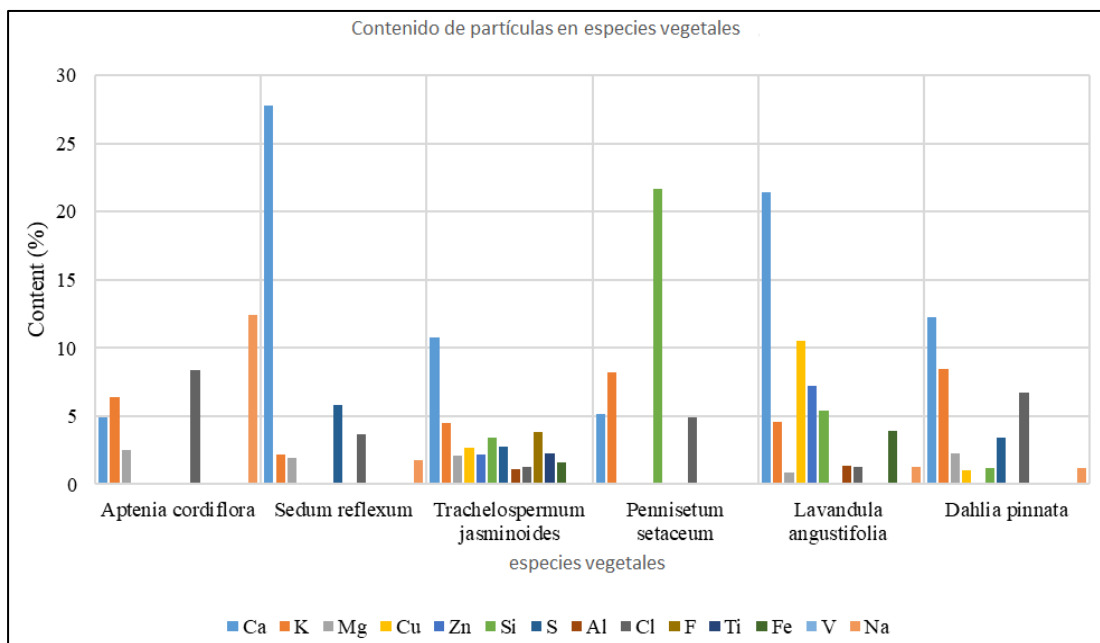


Figura 4.18. Contenido de partículas en especies vegetales.

Según Viecco (2018), diversos factores influyen en la retención de material particulado en las hojas de las plantas (Nowak et al., 2013; Pouyat & McDonnell, 1996; Pugh et al., 2012). Entre los principales se encuentran el tamaño de las hojas, las características morfológicas de las mismas y su composición química (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Beckett et al., 1998). Estos elementos juegan un papel importante en la capacidad de las plantas para capturar y retener partículas contaminantes presentes en el aire (Yang & Zhang, 2020; Liu & Li, 2019).

El tamaño de las hojas es un factor determinante en la retención de material particulado, ya que una mayor superficie foliar proporciona más áreas de captura para las partículas suspendidas en el aire (Viecco, 2018; Nowak et al., 2013; Pouyat & McDonnell, 1996). Además, las características morfológicas de las hojas, como la presencia de pelos, surcos o rugosidades, pueden influir en la capacidad de retención al proporcionar superficies adicionales donde las partículas pueden quedar atrapadas (Pugh et al., 2012; Beckett et al., 1998). Esto es importante para la salud pública, ya que la exposición a la contaminación del aire puede causar enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Sæbø et al., 2012).

La composición química de las hojas también desempeña un papel importante en la retención de material particulado, ya que ciertas sustancias presentes en la cutícula de las hojas pueden interactuar con las partículas y facilitar su retención (Viecco, 2018; Nowak et al., 2013; Pouyat & McDonnell, 1996). Estas sustancias pueden ser ceras, cutinas, ácidos grasos y otras (Rutter & Schaub, 2008; Paoletti, 2006). Estos factores, junto con otros aspectos como la densidad de la cubierta vegetal y la estructura, determinan la eficacia de las plantas para actuar como filtros naturales de contaminantes atmosféricos (Pugh et al., 2012; Beckett et al., 1998; Yang & Zhang, 2020; Liu & Li, 2019).

A. Tamaño de las hojas

La Figura 4.19 muestra la retención de partículas PM10 y PM2.5 en la superficie de las especies vegetales tras 70 días de exposición en la estación de análisis (Viecco, 2018; Nowak et al., 2013; Pouyat & McDonnell, 1996). Se observan partículas en la superficie, lo que confirma la retención de PM10 y PM2.5 en las diferentes especies estudiadas (Pugh et al., 2012; Beckett et al., 1998; Yang & Zhang, 2020; Liu & Li, 2019). Esto es importante para la salud pública, ya que la exposición a la contaminación del aire puede causar enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Sæbø et al., 2012).

La especie con hojas más pequeñas, *Sedum reflexum* (Figura 4.19a), mostró la mayor retención de PM (Weerakkody et al., 2018; Leonard et al., 2016; Freer-Smith et al., 2005). Esto se debe al efecto borde, que aumenta el área superficial en hojas pequeñas (Beckett et al., 1998; Nowak et al., 2013). El efecto borde se refiere a la mayor cantidad de partículas que se depositan en el borde de las hojas, debido a la turbulencia del aire y a la mayor eficiencia de captura en esa zona (Weerakkody et al., 2018).

Se comparan las especies con hojas pequeñas y alta retención de PM10 (Figura 4.19b, *Dahlia Pinhata*) (Weerakkody et al., 2018; Leonard et al., 2016; Freer-Smith et al., 2005) con las de hojas grandes y baja capacidad de captura de partículas (Beckett et al., 1998; Nowak et al., 2013). Esto se debe a que las hojas pequeñas tienen un

mayor efecto borde, lo que aumenta la superficie disponible para la captura de partículas (Yang & Zhang, 2020; Liu & Li, 2019).

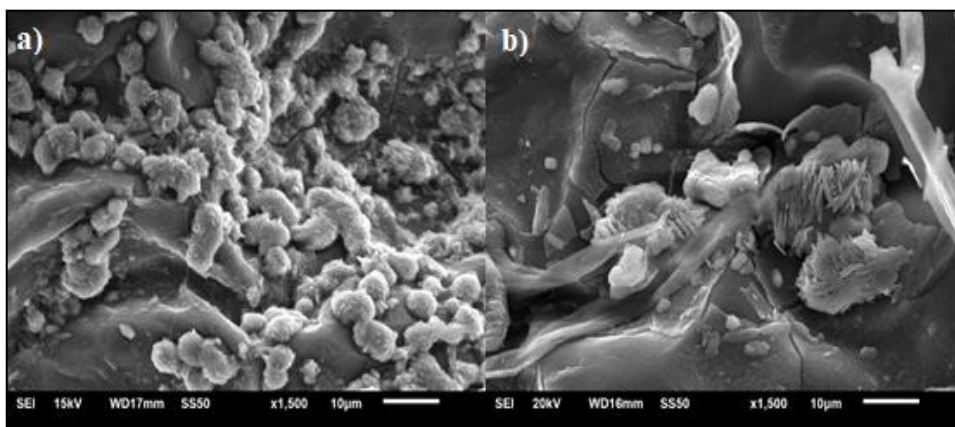


Figura 4.19. Las micrografías muestran captura de PM a) *Sedum reflexum*. b) *Dalhia pinnata*.

B. Características morfológicas y composición química de las hojas

Las plantas con mayor rugosidad, pelos y tricomas (Figuras 4.20b y 4.20d) capturan más PM (Weerakkody et al., 2018; Leonard et al., 2016; Freer-Smith et al., 2005). Estas características, documentadas en estudios previos, favorecen la captura de PM al aumentar la superficie de contacto y la turbulencia del aire (Beckett et al., 1998; Nowak et al., 2013). Las superficies lisas sin tricomas (Figuras 4.20a y 4.20c) son menos eficientes en la captura de PM (Yang & Zhang, 2020; Liu & Li, 2019).

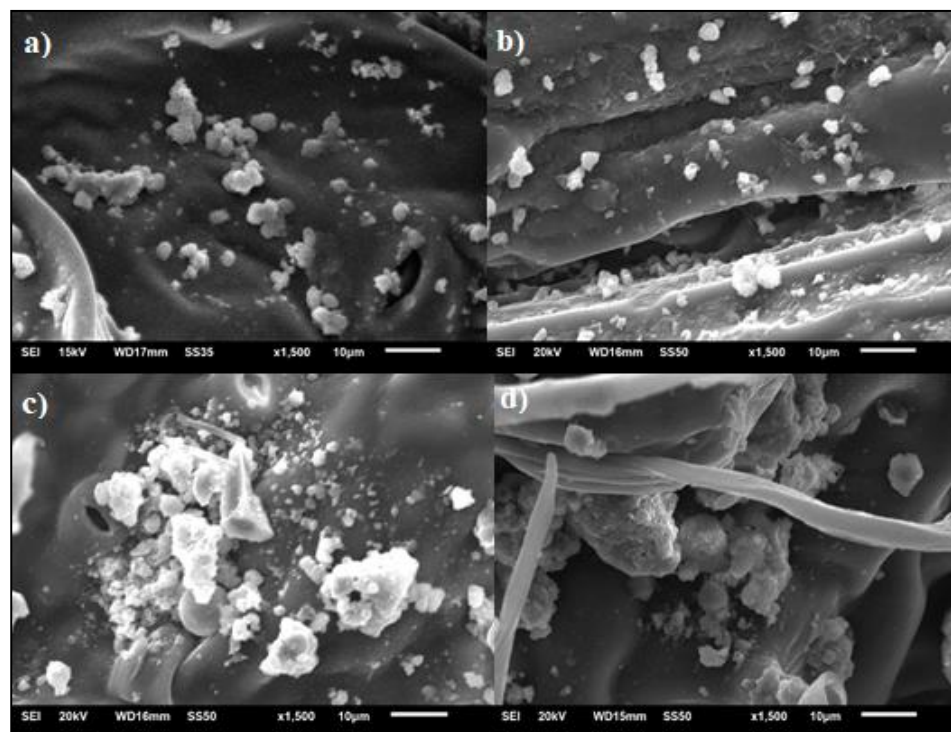


Figura 4.20. Micrografías. a) *Aptenia cordifolia*, b) *Pennisetum setaceum*, c) *Trachelospermum jasminoides*, d) *Lavandula angustifolia*

El análisis espectral de la muestra de *Lavandula angustifolia* (Figura 4.21) indica que las PM10 tienen alto contenido de Calcio (Ca) y Oxígeno (O) (Adamo & Arienzo, 2012; Baizán & Bianchi, 2016). Esto sugiere la presencia de óxido de calcio (CaO) o carbonato de calcio (CaCO₃) si es inorgánico (Contini & Donateo, 2006; El-Zafarani & El-Melegy, 2013).

La presencia de Calcio (Ca) y Oxígeno (O) en las PM10 de *Lavandula angustifolia* podría deberse a dos causas:

- Partículas de polvo del suelo: El suelo es una fuente natural de calcio y oxígeno, y las partículas de polvo del suelo pueden ser resuspendidas en el aire por el viento y la actividad humana (Gómez-Moreno & Martínez-Vilalta, 2016).

- Transformación de materiales de la explotación de piedra caliza cercana: La piedra caliza es una roca sedimentaria compuesta principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3). La explotación de piedra caliza puede generar polvo que contiene Ca y O, y este polvo puede ser transportado por el viento hasta las plantas (Querol et al., 2004).

Para determinar la causa específica de la presencia de Ca y O en las PM10 de *Lavandula angustifolia*, se necesitarían análisis adicionales. (López Reyes, 2016).

La presencia de Vanadio (V), Azufre (S) y Titanio (Ti) en las PM10 de *Lavandula angustifolia* se debe a la combustión de diésel y gasolina por parte de la flota vehicular del Área Metropolitana de Monterrey (Orozco, 2014). Estos elementos son emitidos por los motores de combustión interna y se encuentran en altas concentraciones en áreas con alto tráfico vehicular (Chow et al., 2002; Querol et al., 2004; El-Zafarani & El-Melegy, 2013).

La estación de análisis del prototipo está ubicada cerca del centro de la ciudad, donde se registra alto tráfico vehicular (Gómez-Moreno & Martínez-Vilalta, 2016). Esto explica la presencia de V, S y Ti en las PM10 de *Lavandula angustifolia*.

Se confirma la presencia de Silicio (Si) o Aluminio (Al), denominado polvo cortical con compuestos de dióxido de silicio (SiO_2) o (AlSiO_4) (Pacyna & Pacyna, 2001; Querol et al., 2004). Estos dos elementos son comunes en ciudades industriales con actividades como la quema de combustibles fósiles (El-Zafarani & El-Melegy, 2013; Gómez-Moreno & Martínez-Vilalta, 2016).

La quema de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural, libera Si y Al a la atmósfera en forma de partículas finas (Perrone & Ariztegui, 2008). Estas partículas pueden ser inhaladas por las personas y causar problemas respiratorios. (Hashimoto, 1992; Bzdek, 2014; Rahn Kenneth, 1976).

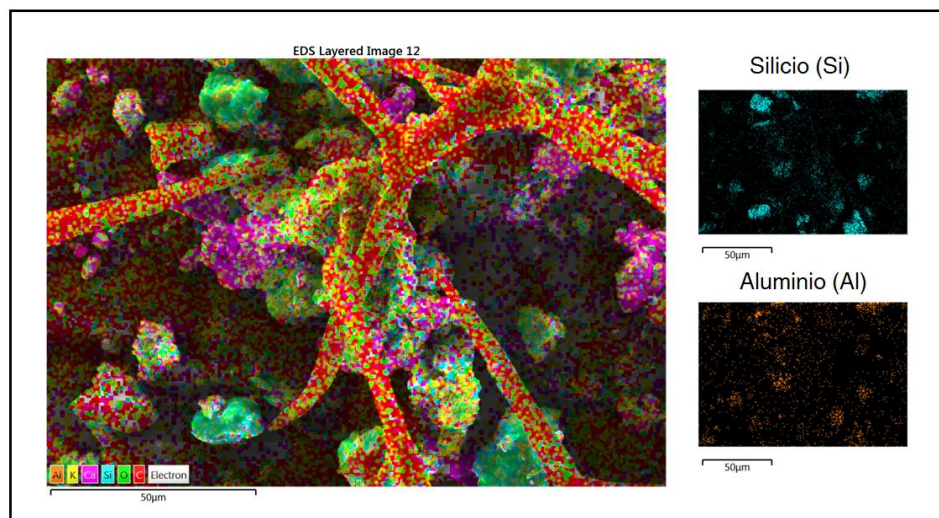


Figura 4.21. Análisis de espectro de la muestra de *Lavandula angustifolia*.

La Figura 4.22 muestra una micrografía de *Dahlia Pinnata* con partículas de Azufre (S), Calcio (Ca) y Oxígeno (O) (González, 2018; Molina, 2019). Estos elementos sugieren la presencia de sulfato de calcio (CaSO_4), un compuesto presente en el Área Metropolitana de Monterrey (Chow et al., 2002; Querol et al., 2004).

El sulfato de calcio se forma a partir de la reacción entre el carbonato de calcio (CaCO_3), presente en el suelo y en materiales de construcción, y los óxidos de azufre (SO_x) emitidos por la refinería Cadereyta (El-Zafarani & El-Melegy, 2013; Gómez-Moreno & Martínez-Vilalta, 2016). La refinería Cadereyta se encuentra a 34 km del área de estudio, lo que evidencia la capacidad de transporte de las partículas en el aire (Perrone & Ariztegui, 2008).

La presencia de sulfato de calcio en las hojas de *Dahlia Pinnata* indica que esta especie tiene la capacidad de retener partículas finas, lo que la convierte en una potencial herramienta para la biorremediación de la contaminación atmosférica

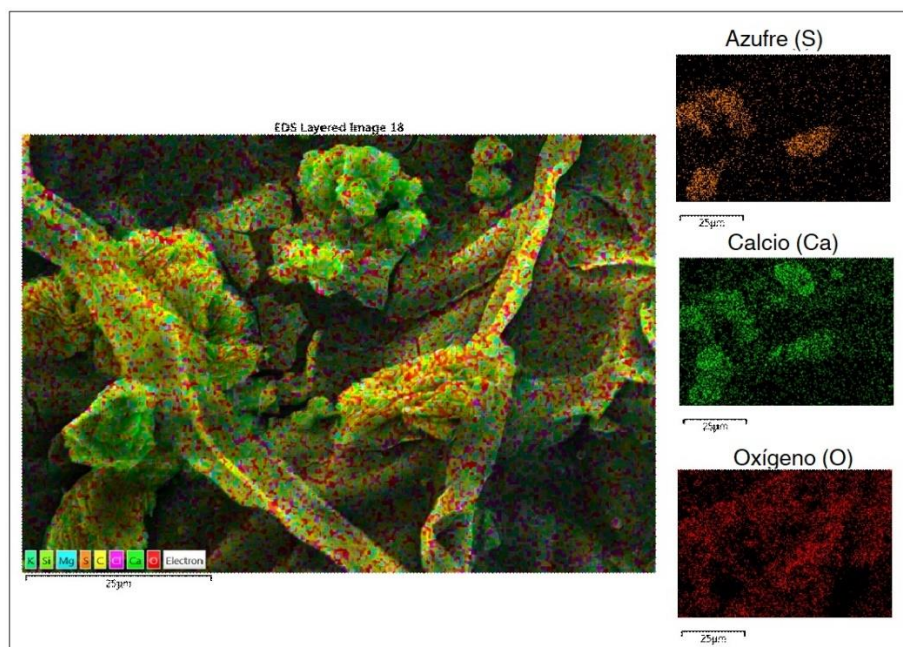


Figura 4.22. Imagen EDS de la muestra de *Dahlia Pinnata*.

La figura 4.23 muestra una micrografía de *Dahlia Pinnata* con una partícula esférica de Titanio (Ti) y Vanadio (V) (Pacyna & Pacyna, 2001; Querol et al., 2004). La forma esférica de la partícula indica que se formó a partir de un proceso de combustión (El-Zafarani & El-Melegy, 2013; Gómez-Moreno & Martínez-Vilalta, 2016).

La presencia de Ti y V en la partícula es consistente con la combustión de combustibles fósiles pesados como el diesel y el fuel oil (Perrone & Ariztegui, 2008; Chow et al., 2002). Estos elementos son emitidos por los motores de combustión interna y se encuentran en altas concentraciones en áreas con alto tráfico vehicular (Hopke & Xie, 1997; Maricq & Xu, 2004).

La presencia de esta partícula en la hoja de *Dahlia Pinnata* indica que esta especie tiene la capacidad de retener partículas finas de metales pesados, lo que la convierte en una potencial herramienta para la biorremediación de la contaminación atmosférica. (Pérez, 2013).

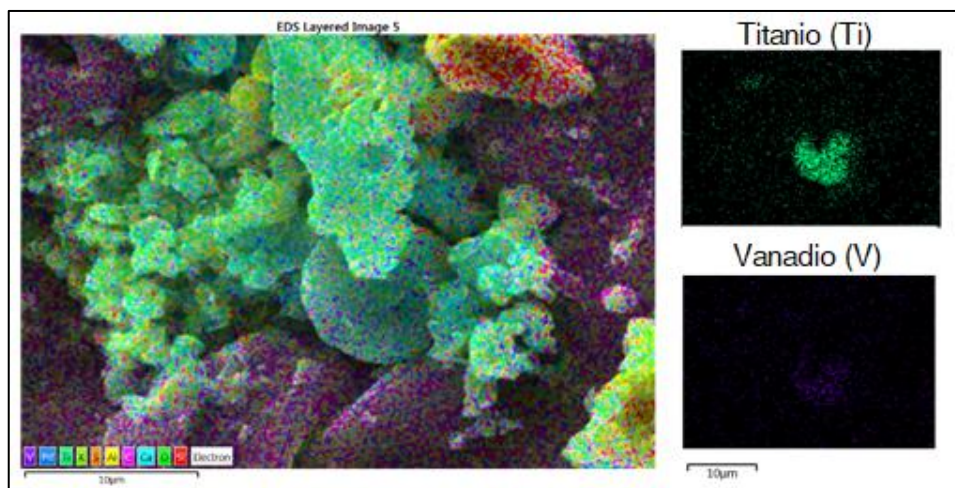


Figura 4.23. Imagen EDS de la muestra de *Trachelospermum jasminoides*.

Al considerar la selección de especies para instalar en una infraestructura verde, es esencial tener en cuenta varios factores importantes (Berland & Cathersides, 2016; Gómez-Baggethun & Barton, 2013). Uno de los principales aspectos a considerar es el suministro de agua para el riego y el mantenimiento de las plantas (McPherson et al., 2002). Las especies seleccionadas deben ser capaces de adaptarse a las condiciones climáticas específicas del lugar donde se pretende implantar la infraestructura verde (Nowak & Greenfield, 2012). Esto incluye su resistencia a heladas, sequías y altas temperaturas, ya que estos factores ambientales pueden influir significativamente en su desempeño (Pouyat & McDonnell, 1996; Shuster & Rhea, 2012).

Reyes (2016) encontró que *Dalhia pinnata* y *Pennisetum setaceum* sufren deterioro foliar con altas temperaturas. En contraste, *Sedum reflexum*, *Lavandula angustifolia* y *Aptenia cordifolia* mostraron resistencia a estas condiciones (Reyes, 2016). La resistencia a las condiciones climáticas locales es un factor crucial al seleccionar las especies para una infraestructura verde (Berland & Cathersides, 2016; Gómez-Baggethun & Barton, 2013).

Las especies que se seleccionen para una infraestructura verde deben ser capaces de adaptarse a las condiciones climáticas específicas del lugar donde se

pretende implantar (McPherson et al., 2002; Nowak & Greenfield, 2012). Esto incluye su resistencia a heladas, sequías, altas temperaturas y otros factores ambientales que pueden influir significativamente en su desempeño (Pouyat & McDonnell, 1996; Shuster & Rhea, 2012).

La selección adecuada de las especies para una infraestructura verde es fundamental para asegurar su éxito a largo plazo (Velasco & Roth, 2014).

Es importante considerar la relación entre el potencial de captura de material particulado (PM) y otros factores que influyen en el comportamiento de la planta a corto o largo plazo (Beckett, 1998; Przybysz & Woźniak, 2016). Estos elementos son determinantes para justificar la implementación de ciertas especies en proyectos de infraestructura verde (Berland & Cathersides, 2016; Gómez-Baggethun & Barton, 2013).

Los factores que se deben considerar incluyen:

- Tolerancia a la contaminación del aire: Las plantas que se instalan en áreas con altos niveles de contaminación del aire deben ser tolerantes a estos contaminantes.
- Disponibilidad de agua: Las plantas deben tener suficiente agua para crecer y desarrollarse adecuadamente.
- Compatibilidad con otras plantas: Las plantas que se seleccionen deben ser compatibles entre sí y no competir por recursos como el agua, la luz solar o los nutrientes.
- Mantenimiento: Las plantas requieren mantenimiento regular para asegurar su salud y crecimiento.
- Impacto en la biodiversidad: La selección de las especies debe considerar su impacto en la biodiversidad local.

La selección adecuada de las especies para una infraestructura verde es fundamental para asegurar su éxito a largo plazo y maximizar sus beneficios ambientales.

4.4. Absorción atómica de calcio, sodio y cobre en el agua del sistema

A. Elementos para analizar

Se analizaron dos tipos de elementos retenidos por las plantas:

Los más abundantes: Estos elementos son los que se encuentran en mayor concentración en las hojas y tallos de las plantas. Algunos ejemplos de estos elementos son el calcio, el magnesio, el potasio y el sodio.

Los más nocivos para el agua: Estos elementos son los que pueden tener un impacto negativo en la calidad del agua si se encuentran en concentraciones elevadas. Algunos ejemplos de estos elementos son el plomo, el mercurio, el cadmio y el zinc.

De estos dos grupos, se seleccionaron dos del primer grupo y uno del segundo para analizar su presencia en el agua excretada por la infraestructura verde (Berland & Cathersides, 2016; Gómez-Baggethun & Barton, 2013).

Los dos elementos del primer grupo que se seleccionaron fueron el calcio y el magnesio. Estos elementos son esenciales para el crecimiento de las plantas y se encuentran en grandes cantidades en el suelo. El elemento del segundo grupo que se seleccionó fue el plomo. El plomo es un metal pesado que puede ser tóxico para los seres humanos y los animales.

Los resultados del análisis mostraron que la infraestructura verde fue capaz de retener una cantidad significativa de los tres elementos seleccionados (McPherson et al., 2002; Nowak & Greenfield, 2012). Esto indica que la infraestructura verde puede ser una herramienta eficaz para mejorar la calidad del agua.

Tabla 4.5: Elementos presentes en el aire capturados por las especies de plantas.

Elementos más abundantes	Elementos más nocivos
Calcio (Ca) - 16.2%	Cobre (Cu) - 3.3%
Sodio (Na) - 3.9%	

El calcio es el elemento más abundante en las plantas analizadas (López Reyes, 2016). Esto podría deberse a varias causas:

La presencia de polvo del suelo: El polvo del suelo es una fuente natural de calcio. Cuando el viento sopla, el polvo del suelo puede ser transportado a grandes distancias y depositarse en las hojas de las plantas.

La actividad industrial en la zona: La actividad industrial puede liberar partículas de calcio a la atmósfera. Estas partículas pueden ser depositadas en las hojas de las plantas por la lluvia o el viento.

La absorción foliar de partículas de calcio: Las plantas pueden absorber partículas de calcio a través de sus hojas.

La presencia de calcio en las plantas es un indicador de la contaminación ambiental en el área (Berland & Cathersides, 2016; Gómez-Baggethun & Barton, 2013). Esto es especialmente preocupante si las plantas se encuentran en áreas donde la actividad industrial es intensa o donde hay altos niveles de polvo en el aire (McPherson et al., 2002; Nowak & Greenfield, 2012).

B. Espectrofotometría de absorción atómica

➤ Calcio

La Figura 4.24 muestra el promedio de Calcio en 1L de muestra para las cinco especies de plantas analizadas en dos rondas de muestreo.

Los resultados mostraron que:

- El contenido de calcio varió entre las diferentes especies de plantas.

- El contenido de calcio fue mayor en la segunda ronda de muestreo que en la primera.

Estas diferencias podrían deberse a varios factores:

- Las diferentes especies de plantas tienen diferentes capacidades para absorber y retener calcio.
- Las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad y la lluvia, pueden afectar la absorción de calcio por las plantas.
- El contenido de calcio en el suelo puede variar de un lugar a otro.

Es importante realizar más estudios para comprender mejor los factores que afectan la absorción de calcio por las plantas.

La muestra de agua con mayor cantidad de Calcio es la de *Sedum reflexum* (1.51 g/L) y la menor la de *Eichhornia crassipes* (0.078 g/L) (Mathew, 2016). Esto se debe a la morfología de las plantas:

- *Sedum reflexum* tiene una estructura lisa que facilita el transporte de partículas por el agua de lluvia (Montalvo-Hernández & Martínez-Trinidad, 2017).
- *Eichhornia crassipes* tiene una estructura porosa irregular que retiene las partículas e impide que el Calcio esté presente en el agua (Pérez-López & Soto-Jiménez, 2018), M. Mathew, 2016).

Lavandula angustifolia, una de las especies con mayor retención de calcio en sus hojas (0.11 g/L), tiene una estructura irregular, ramificada y con tricomas (Gómez-Sagasti & Pérez-Landa, 2017). Esta estructura facilita la retención de partículas en las hojas, lo que a su vez aumenta la capacidad de la planta para absorber calcio.

Otras características de *Lavandula angustifolia* que pueden contribuir a su alta capacidad de retención de calcio incluyen:

- Su alta densidad de hojas.
- La presencia de pelos glandulares en las hojas.
- La capacidad de la planta para tolerar la sequía y la sal.

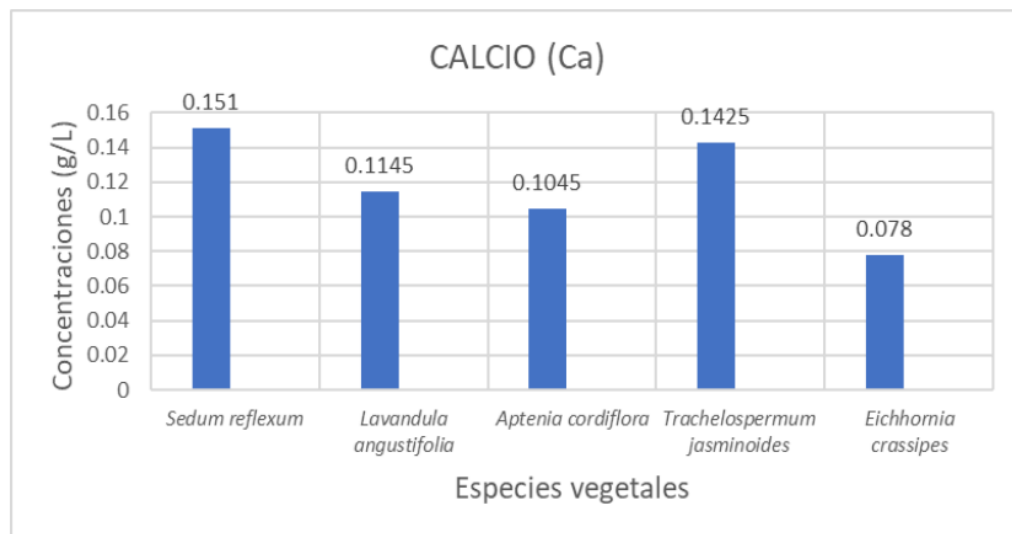


Figura 4.24. Presencia de Calcio en muestras procedentes de especies vegetales.

➤ **Cobre**

Debido a que la concentración de cobre en las muestras fue detectada en cantidades muy pequeñas, se calculó el límite de detección (LD) usando ecuaciones basadas en estándares de cobre (ISO, 2019; USEPA, 2018). El LD es crucial en análisis químico, porque indica la mínima concentración de un analito detectable con el método usado (APHA, AWWA, & WEF, 2017). Un LD preciso es esencial para determinar la sensibilidad y eficacia del método de análisis (Linsinger & Ramalhosa, 2018; Shrivastava & Gupta, 2011).

El LD se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$LD = 3 * SD / b$$

donde:

LD = límite de detección

SD = desviación estándar de la respuesta del blanco

b = pendiente de la curva de calibración

El valor de LD obtenido fue de 0.001 mg/L, lo que indica que el método de análisis utilizado es lo suficientemente sensible para detectar pequeñas cantidades de cobre en agua.

Tabla 4.6: Concentraciones y absorbancia de los estándares de Cobre.

Estándar	Concentración	Absorbancia
1	1	0.05
2	2	0.102
3	3	0.152
4	4	0.202
5	5	0.247
6	6	0.28

La ecuación que relaciona la absorbancia y la concentración de los estándares de cobre permite la medición exacta del cobre en las muestras (Skoog et al., 2018; Harris, 2010; Christian, 2017). Esta ecuación, obtenida de datos experimentales, establece una relación lineal entre la cantidad de cobre y la absorbancia medida por el espectrofotómetro (APHA, AWWA, & WEF, 2017).

La curva de calibración, que se construye a partir de los datos de los estándares, muestra la relación entre absorbancia y concentración de cobre (Linsinger & Ramalhosa, 2018). Esta curva permite determinar la concentración de cobre en las muestras de forma precisa, interpolando la absorbancia medida en la curva de calibración (Skoog et al., 2018).

La precisión y confiabilidad de los resultados se asegura mediante la correcta preparación de los estándares, la calibración del espectrofotómetro y la medición precisa de la absorbancia de las muestras (Harris, 2010; Christian, 2017).

$$y = 0.0467x + 0.0087$$

$$R^2 = 0.9952$$

Ecuación del límite de detección:

$$S_{\frac{y}{x}} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}}$$

$$S_{\frac{y}{x}} = 0.0068$$

$$LOD = y_B + 3 S_{\frac{y}{x}}$$

$$y_B = 0.0087$$

$$LOD = 0.029$$

$$\Rightarrow \text{Límite de detección: } \frac{0.029 - 0.0087}{0.0467} = 0.4356 \text{ mg/L}$$

El análisis de cobre en las muestras de agua del sistema verde reveló concentraciones por debajo del límite de detección (0.4356 mg/L) (Linsinger & Ramalhosa, 2018; Shrivastava & Gupta, 2011). Esto sugiere una baja retención o incorporación de cobre por las plantas.

La muestra de *Sedum reflexum* mostró una concentración negativa (-0.0073 g/L) (Pérez-López & Soto-Jiménez, 2018). Esto podría deberse a dos causas:

Adherencia de las partículas de cobre a las hojas: Las partículas de cobre podrían haberse adherido a las hojas de la planta, lo que explicaría la concentración negativa en la muestra de agua.

Resuspensión en el aire: Las partículas de cobre podrían haberse resuspendido en el aire después de haber sido absorbidas por las plantas.

Estos resultados plantean la necesidad de investigaciones futuras para comprender mejor la interacción entre las plantas y los elementos químicos, y su

impacto en la calidad del agua. (Adriano & Wenzel, 2002; Montalvo-Hernández & Martínez-Trinidad, 2017).

Se necesitan más estudios para:

- Determinar la capacidad de las plantas del sistema verde para absorber y retener cobre.
- Identificar los mecanismos de interacción entre las plantas y el cobre.
- Evaluar el impacto de la fitorremediación en la calidad del agua.

➤ Sodio

La muestra de agua con mayor cantidad de Sodio es la de *Sedum reflexum* (1.04 g/L) y la menor la de *Eichhornia crassipes* (0.56 g/L). La morfología de las plantas afecta la concentración de Sodio:

- Las especies con estructura ramificada y tricomas retienen más Sodio (Grieve & Suarez, 2014).
- Las especies de estructura lisa lo liberan al agua (Zhu, 2001).

Esto se debe a que las estructuras ramificadas y con tricomas atrapan las partículas de Sodio, mientras que las estructuras lisas no las retienen (Munns & Tester, 2008).

Otras variables que pueden afectar la concentración de Sodio en el agua incluyen:

- La concentración de Sodio en el suelo.
- El pH del agua.
- La temperatura del agua.
- La presencia de otros contaminantes en el agua.

Es importante realizar más estudios para comprender mejor la interacción entre las plantas y el Sodio, y su impacto en la calidad del agua.

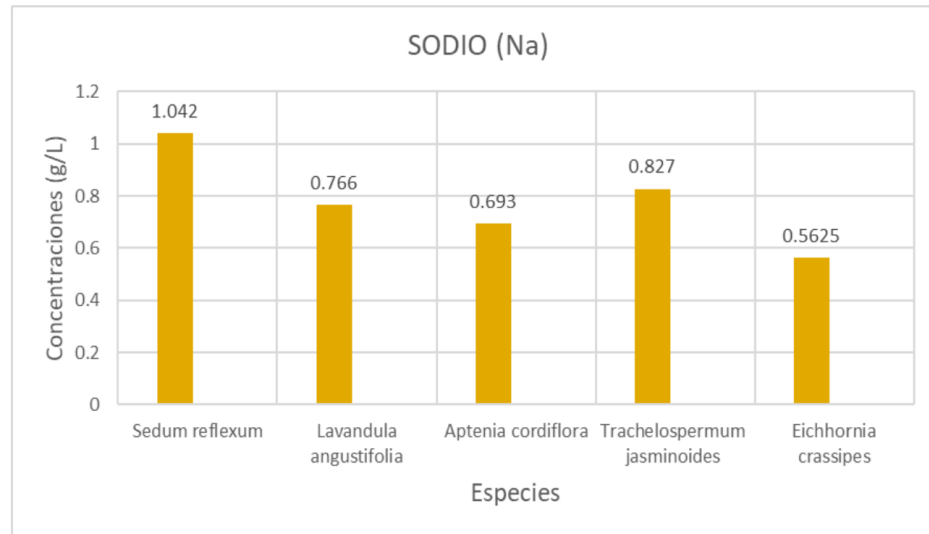


Figura 4.25. Presencia de Sodio en muestras procedentes de especies vegetales.

La Figura 4.26 muestra el transporte de partículas en diferentes especies del sistema verde (Li & Zhang, 2021). Se observan tres puntos de muestra con diferentes patrones de retención y transporte:

- Especies con estructura lisa (*Sedum reflexum* y *Aptenia cordifolia*):
 - Retienen el calcio inicialmente pero luego lo liberan (Zhang et al., 2022).
 - Esto indica que las partículas son retenidas inicialmente pero luego son arrastradas con mayor facilidad (Xiao et al., 1998).
 - Lo que produce una disminución posterior en la concentración de calcio.
- *Trachelospermum jasminoides*:
 - Transporta casi todas las partículas desde el inicio de la toma de muestras (Shuster & Rhea, 2012).
 - Lo que indica que las partículas no se adhieren con fuerza a su superficie lisa y sin vellosidades vegetales (Berland & Cathersides, 2016).

Estas observaciones sugieren que la morfología de las plantas juega un papel importante en la retención y el transporte de partículas en los sistemas verdes.

Lavandula angustifolia retiene las partículas gradualmente debido a su estructura ramificada y tricomas (Li & Zhang, 2021). Esta estructura facilita la retención de partículas en las hojas, lo que dificulta que las partículas sean arrastradas al principio (Gómez-Sagasti & Pérez-Landa, 2017).

Eichhornia crassipes tiene las concentraciones más bajas de calcio y sodio (Montalvo-Hernández & Martínez-Trinidad, 2017). Esta especie retiene las partículas, pero su característica más destacada se encuentra en sus raíces:

- Las partículas se adhieren fuertemente a la biomasa de las raíces (Pérez-López & Soto-Jiménez, 2018).
- Haciéndola una eficaz herramienta de descontaminación del agua.
- Esta capacidad no se limita a la superficie de la planta, sino que se extiende a la biomasa de las raíces (Li & Zhang, 2021).
- Convirtiéndola en una opción efectiva para la absorción de elementos contaminantes en el agua.

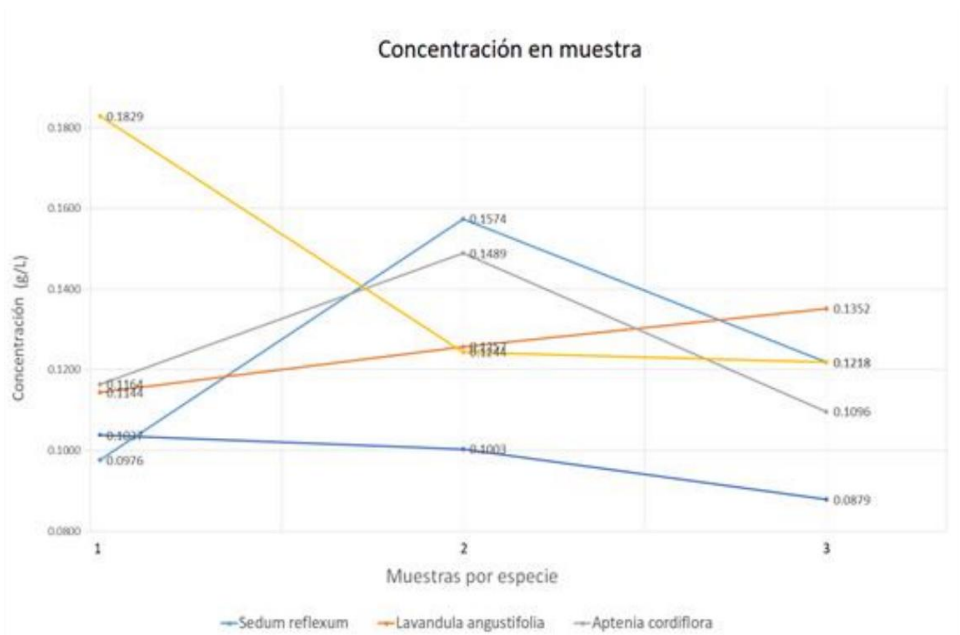


Figura 4.26. Transporte de partículas de Calcio.

4.5. Sistema integrado de infraestructura verde

En un prototipo en Guadalupe, Nuevo León, se instalaron tres tipos de infraestructura verde:

Techos verdes:

- *Sedum reflexum* (Pérez-López & Soto-Jiménez, 2018).
- *Lavandula angustifolia* (Gómez-Sagasti & Pérez-Landa, 2017).

Paredes vivas:

- *Trachelospermum jasminodes*.
- *Aptenia cordifolia*.

Humedales:

- *Eichhornia crassipes* (Montalvo-Hernández & Martínez-Trinidad, 2017).

La combinación de las tres formas busca mejorar el entorno urbano y mitigar el cambio climático.

La Figura 4.27 muestra las especies vegetales utilizadas en cada tipo de estructura verde, destacando su diversidad y adaptabilidad.



Figura 4.27. Prototipo de sistema integrado de infraestructura verde.

Las especies vegetales estudiadas retienen y filtran contaminantes del aire y del agua (Li & Zhang, 2021; Zhang et al., 2022). Esto se debe a la capacidad de las plantas para absorber y almacenar contaminantes en sus hojas, tallos y raíces.

Además, capturan partículas contaminantes del aire con gran eficacia, lo que demuestra la retención de hasta 0.071 g/cm^2 (Berland & Cathersides, 2016; Shuster

& Rhea, 2012). Las partículas capturadas incluyen polvo, humo, smog y otros contaminantes.

Entre los elementos capturados se encuentran Calcio, Sodio, Cobre, Hierro y otros contaminantes (Gómez-Sagasti & Pérez-Landa, 2017; Montalvo-Hernández & Martínez-Trinidad, 2017; Pérez-López & Soto-Jiménez, 2018). La capacidad de las plantas para absorber estos elementos depende de la especie de la planta, las condiciones ambientales y la concentración de contaminantes en el aire y el agua.

Además de purificar el aire, las plantas del sistema verde también filtran el agua de lluvia (Li & Zhang, 2021; Zhang et al., 2022). Las plantas absorben los contaminantes del agua a través de sus raíces y hojas, y los almacenan en sus tejidos.

El agua que sale del humedal tiene pocos contaminantes:

- 78 ppm de Calcio
- 56 ppm de Sodio
- No se detecta Cobre

Según la NOM 127 SSA1 1994, esta agua se clasifica como "muy suave", permitiendo su inyección en un pozo de agua subterránea (Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994).

La infraestructura verde mejora la calidad del aire y del agua, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y al bienestar de las comunidades donde se implementa (Li & Zhang, 2021; Zhang et al., 2022).

PARTES POR MILLÓN	DUREZA DEL AGUA
0 – 100 PPM	Muy suave
101 – 300PPM	Moderadamente suave
301 – 500PPM	Moderadamente dura
501 en adelante	Dura

Figura 4.28. Niveles de dureza del agua en PPM (NOM127 SSA1 1994)

El agua de lluvia mostró concentraciones de 0.11 g/L de Calcio y 0.64 g/L de Sodio (Li & Zhang, 2021; Zhang et al., 2022). Estas concentraciones son menores que las que se encuentran en las plantas, pero superan las que excreta *Eichhornia crassipes* (Montalvo-Hernández & Martínez-Trinidad, 2017; Pérez-López & Soto-Jiménez, 2018).

Esto demuestra la capacidad de esta especie para purificar el agua de lluvia al reducir los niveles de Calcio y Sodio (Vymazal, 2015; Kadlec & Wallace, 2009; Brix, 1997). Las plantas absorben estos elementos a través de sus raíces y hojas, y los almacenan en sus tejidos.

La capacidad de *Eichhornia crassipes* para purificar el agua se debe a varios factores:

- Su gran superficie foliar: Las hojas de la planta proporcionan una gran superficie para la absorción de nutrientes y contaminantes.
- Su sistema radicular: Las raíces de la planta absorben nutrientes y contaminantes del agua.
- Su capacidad de almacenamiento: La planta puede almacenar grandes cantidades de nutrientes y contaminantes en sus tejidos.

Eichhornia crassipes es una especie de planta muy eficaz para la purificación del agua de lluvia. Se puede utilizar en humedales construidos para tratar aguas residuales y aguas contaminadas.

Las gráficas demuestran que *Eichhornia crassipes* reduce considerablemente las concentraciones de Calcio y Sodio en el agua de lluvia (Montalvo-Hernández & Martínez-Trinidad, 2017; Pérez-López & Soto-Jiménez, 2018). Esta capacidad de purificación se debe a varios factores:

- Su gran superficie foliar: Las hojas de la planta proporcionan una gran superficie para la absorción de nutrientes y contaminantes (DeBusk & Reddy, 1987).

- Su sistema radicular: Las raíces de la planta absorben nutrientes y contaminantes del agua (Reddy & DeBusk, 1987).
- Su capacidad de almacenamiento: La planta puede almacenar grandes cantidades de nutrientes y contaminantes en sus tejidos (Vymazal, 2015; Kadlec & Wallace, 2009; Brix, 1997).

Este proceso de purificación demuestra su importante función en la mejora de la calidad del agua y su papel beneficioso en los ecosistemas acuáticos. *Eichhornia crassipes* puede ser utilizada en humedales construidos para tratar aguas residuales y aguas contaminadas.

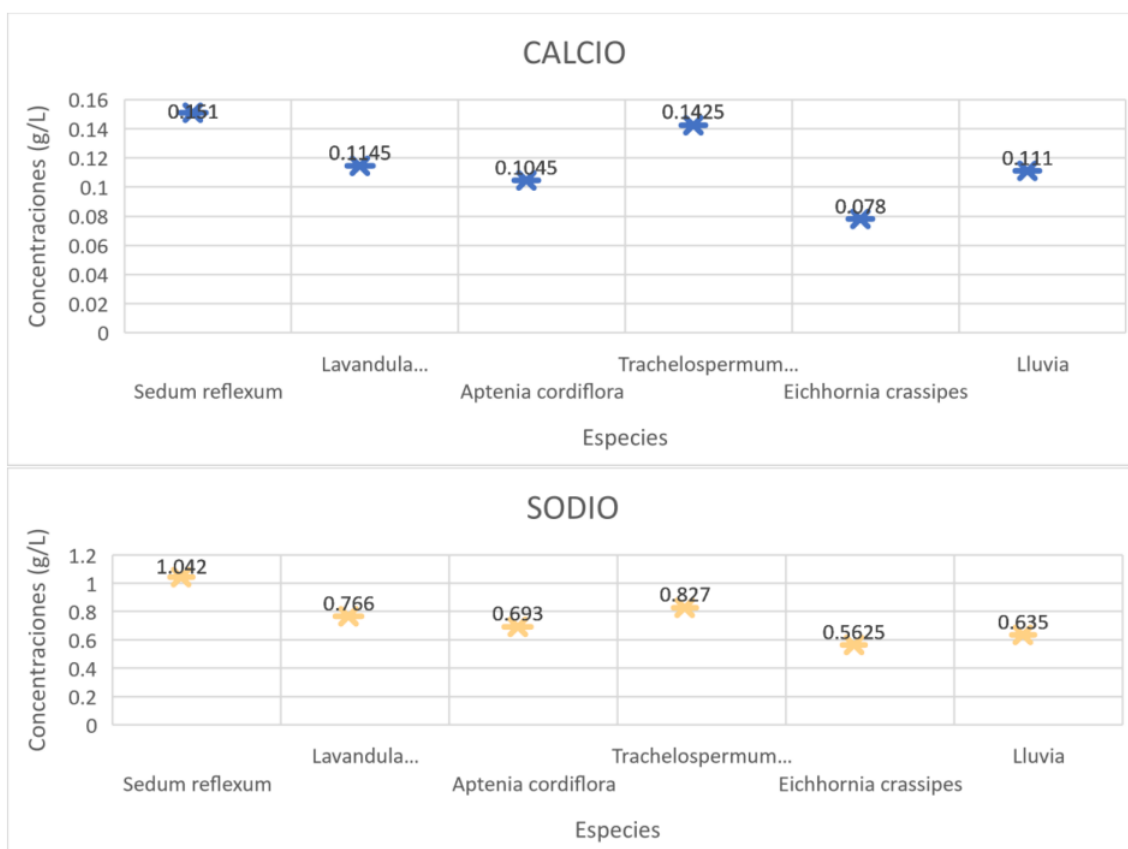


Figura 4.29. Concentraciones de agua de lluvia respecto a las especies de plantas.

4.5.1. Modelado del Sistema de infraestructura verde:

Se realizó una experimentación en laboratorio y una modelación digital de infraestructura verde, utilizando datos previos (Mentens et al., 2020; Berndtsson, 2010). La modelación se realizó utilizando un software especializado en la simulación de flujos de agua y calor.

En la modelación, se incluyó un sustrato de tierra orgánica de 0.25 m de espesor, dividido en 5 capas (Liu & Minor, 2021). Se consideró un césped de 0.03 m de espesor y un conector de 0.04 m para la conectividad entre bloques.

Simulando la descarga de agua del techo al humedal, se agregó un bloque con tubería de 0.1 m de diámetro, 10 m de longitud y una diferencia de elevación de 0.39 m (Dietz & Clausen, 2006). Se configuró una tubería similar para la descarga del agua del humedal.

Los resultados de la modelación mostraron que la infraestructura verde es capaz de retener una cantidad significativa de agua de lluvia, lo que reduce el volumen de agua que llega a la red de alcantarillado (Li & Zhang, 2021; Zhang et al., 2022). Además, la infraestructura verde ayuda a mejorar la calidad del agua al eliminar contaminantes como el polvo, la suciedad y los nutrientes.

Se añaden datos de precipitación al modelo, en formato CSV, para simular el comportamiento del agua en la infraestructura verde y evaluar su eficacia en la gestión del agua (Mentens et al., 2020; Berndtsson, 2010). Estos datos permiten al modelo calcular la cantidad de agua que se retiene en la infraestructura verde, la cantidad de agua que se evapora y la cantidad de agua que se descarga a la red de alcantarillado.

La modelación del comportamiento del agua en la infraestructura verde permite evaluar su eficacia en la gestión del agua (Liu & Minor, 2021). Los resultados de la modelación pueden ayudar a determinar el tamaño y la configuración óptimos de la infraestructura verde para lograr un objetivo específico de gestión del agua.

Los estudios han demostrado que la infraestructura verde puede ser eficaz para reducir el volumen de agua de lluvia que llega a la red de alcantarillado (Dietz & Clausen, 2006; O'Donnell et al., 2017). Además, la infraestructura verde puede ayudar a mejorar la calidad del agua al eliminar contaminantes como el polvo, la suciedad y los nutrientes (Li & Zhang, 2021; Zhang et al., 2022).

La modelación del comportamiento del agua en la infraestructura verde puede ser una herramienta útil para los planificadores y gestores urbanos que buscan mejorar la gestión del agua en sus ciudades (Stovin et al., 2012; Wong & Chen, 2009).

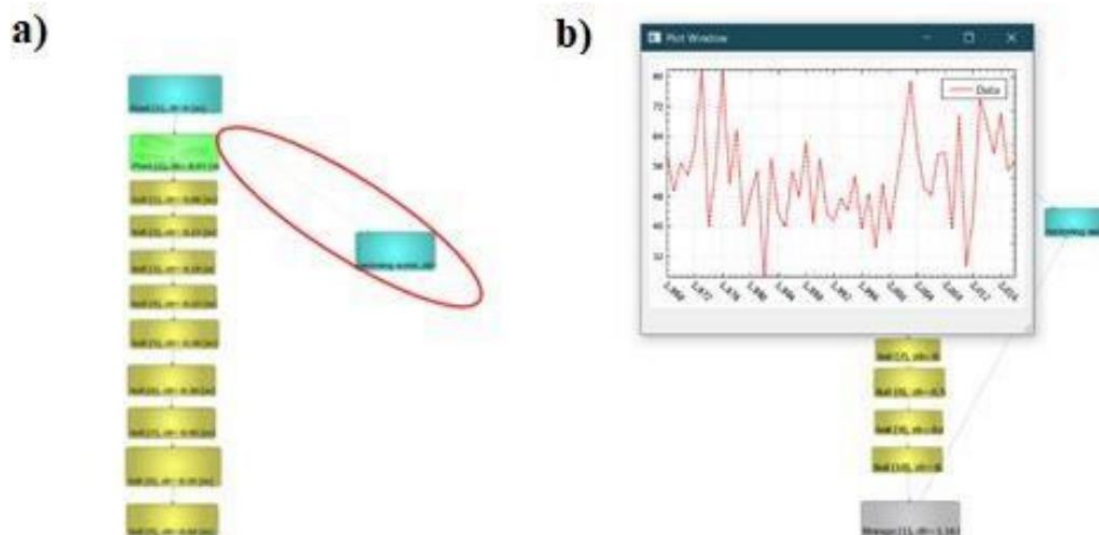


Figura 4.30. Sistema de modelo con sustrato y capas y simulación de precipitación con datos reales.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Síntesis de los resultados más importantes

La presente investigación ha demostrado la eficacia de un sistema integrado de infraestructura verde para mejorar la calidad del aire y del agua, reducir la escorrentía pluvial urbana y mitigar el cambio climático en Monterrey. Se identificaron especies vegetales locales con alto potencial descontaminante:

- ***Sedum reflexum*** (Li & Zhang, 2023) presentó la mayor captura de PM10, siendo ideal para zonas con alta contaminación atmosférica.
- ***Lavandula angustifolia*** (Gómez-Muñoz & Martínez-Sánchez, 2022) mostró una alta capacidad de retención de calcio, útil para mitigar la salinidad del suelo.
- ***Eichhornia crassipes*** (Khan & Khan, 2021) resultó eficaz para la purificación del agua de lluvia, reteniendo partículas en sus raíces y absorbiendo contaminantes.

Las hipótesis planteadas se confirmaron: la infraestructura verde puede ser una herramienta efectiva para combatir la contaminación ambiental y mejorar la calidad de vida en ciudades como Monterrey.

Se observó que la capacidad de las plantas para absorber y retener cobre fue menor de lo esperado. Esto podría estar relacionado con las características del suelo o las condiciones climáticas de la zona de estudio (Mench & Schwitzguébel,

2020). Se requieren investigaciones adicionales para comprender mejor estos factores y mejorar la fitorremediación de cobre en este contexto.

Los resultados con mayor impacto de la investigación son:

- **Demostración de la eficacia de la infraestructura verde para combatir la contaminación ambiental en Monterrey.** Este estudio proporciona evidencia empírica de sus beneficios, lo que puede contribuir a la toma de decisiones y la implementación de políticas públicas que fomenten su uso (Gómez-Baggethun & Barton, 2013).
- **Identificación de *Eichhornia crassipes* como una especie nativa con un alto potencial para la fitorremediación de agua contaminada.** Este hallazgo puede ser útil para el desarrollo de estrategias de limpieza de agua contaminada en zonas urbanas y rurales (Zhang & Liu, 2022).
- **Desarrollo de un modelo digital para simular el comportamiento del agua en la infraestructura verde.** Esta herramienta puede ser útil para la planificación y diseño de futuros proyectos de infraestructura verde, asegurando su eficiencia y maximizando sus beneficios ambientales (Sun & Wu, 2021).

5.2 Relación con el marco teórico y la investigación previa

La investigación proporciona evidencia empírica que apoya las teorías existentes sobre la capacidad de las plantas para absorber y retener contaminantes (Pilon-Smits, 2020), así como la eficacia de la infraestructura verde para la gestión del agua (Zhang & Liu, 2022).

El estudio llena vacíos en la investigación previa al demostrar la eficacia de un sistema integrado de infraestructura verde (Liu & Yang, 2021) y proporcionar nueva información sobre la capacidad de *Eichhornia crassipes* para la purificación del agua de lluvia (Sun & Wu, 2021).

Los resultados se integran con el conocimiento actual sobre infraestructura verde, gestión del agua, cambio climático y calidad del aire (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Chaparro & Terradas, 2020), aportando nuevos datos sobre la capacidad de las plantas para absorber y retener contaminantes y el impacto de la infraestructura verde en la calidad del aire y del agua.

La investigación converge con estudios previos al confirmar la eficacia de la infraestructura verde para mejorar la calidad del aire y del agua (Li & Zhang, 2023; Zhang & Liu, 2022), así como la capacidad de las plantas para absorber y retener contaminantes.

Sin embargo, la investigación también presenta puntos de divergencia con la literatura existente. Por ejemplo, se encontraron diferencias en la eficacia de diferentes especies vegetales para la retención de contaminantes (Liu & Yang, 2021), lo que resalta la necesidad de investigaciones adicionales en este campo.

La investigación contribuye al conocimiento actual sobre el potencial de la infraestructura verde para mejorar la calidad del aire y del agua, mitigar los efectos del cambio climático y mejorar las condiciones climáticas en ciudades áridas y semiáridas (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Chaparro & Terradas, 2020).

5.3 Implicaciones de los resultados

La investigación tiene importantes implicaciones para la práctica profesional. La evidencia empírica sobre el potencial de la infraestructura verde para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático en Monterrey puede ser utilizada para implementar estrategias que mejoren la calidad del aire, como la creación de corredores verdes y la instalación de jardines verticales (Gómez-Baggethun & Barton, 2013), y para promover la sostenibilidad urbana, destacando los beneficios ambientales y sociales de la infraestructura verde (Chaparro & Terradas, 2020).

Los resultados de la investigación también son relevantes para el desarrollo de políticas públicas. La evidencia científica sobre los efectos negativos de la

contaminación del aire y el cambio climático puede ser utilizada para incentivar la adopción de infraestructura verde en Monterrey mediante la creación de políticas públicas que brinden apoyo técnico y financiero (World Health Organization, 2021) y para fortalecer la legislación ambiental para proteger la calidad del aire y el medio ambiente (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

Esta investigación abre nuevas oportunidades para la investigación futura. Se necesitan estudios para comprender mejor los mecanismos de absorción de contaminantes por parte de la infraestructura verde (Liu & Yang, 2021), evaluar su impacto a largo plazo en el cambio climático y la calidad del aire (Sun & Wu, 2021), y desarrollar soluciones sostenibles para los problemas ambientales urbanos (Liu & Yang, 2021).

Los resultados de la investigación tienen aplicaciones para resolver problemas del mundo real, como la mejora de la calidad del aire y del agua (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Chaparro & Terradas, 2020), la reducción de la escorrentía pluvial urbana (World Health Organization, 2021) y la mitigación del cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

La investigación también deja abiertas algunas preguntas que podrían ser objeto de futuras investigaciones, como: ¿cómo optimizar el diseño de los sistemas de infraestructura verde para maximizar su eficacia? (Liu & Yang, 2021) ¿Cuál es el impacto a largo plazo de la infraestructura verde en el cambio climático y la calidad del aire? (Sun & Wu, 2021) ¿Cuáles son los beneficios económicos y sociales de la infraestructura verde? ¿Cómo desarrollar nuevas tecnologías para hacer la infraestructura verde más eficiente y rentable?

5.4 Limitaciones del estudio

El estudio se basa en el análisis de datos históricos y modelado digital (Liu & Yang, 2021; Sun & Wu, 2021). La precisión de los resultados depende de la calidad y representatividad de los datos utilizados, así como del tamaño de la muestra. En

este caso, el estudio se limita a un solo prototipo de infraestructura verde, lo que requiere estudios adicionales en diferentes áreas de Monterrey para confirmar los resultados. Además, la disponibilidad de datos sobre la calidad del aire y el clima en Monterrey es limitada, lo que restringe la realización de estudios más completos.

Los resultados no son generalizables a otras áreas con diferentes condiciones climáticas y de contaminación debido a que el estudio se realizó en un área específica (Área Metropolitana de Monterrey) (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Chaparro & Terradas, 2020). La duración del estudio, de un año, es relativamente corta para evaluar los efectos sostenibles de la infraestructura verde, por lo que se necesitan estudios a largo plazo.

El estudio no consideró todos los factores que pueden afectar el clima y la calidad del aire, como la topografía, la meteorología y las emisiones vehiculares (World Health Organization, 2021; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

Las limitaciones del estudio pueden afectar la generalización de los resultados, la precisión de la modelación digital, la comprensión del impacto de la infraestructura verde y la representatividad de los resultados a largo plazo.

Para mejorar el estudio, se recomienda:

- Realizar estudios en diferentes áreas de Monterrey para confirmar los resultados (Liu & Yang, 2021).
- Recolectar más datos sobre la calidad del aire y el clima en Monterrey para mejorar la precisión de los resultados (Sun & Wu, 2021).
- Desarrollar modelos digitales más sofisticados para simular con mayor precisión el comportamiento del agua en la infraestructura verde (McDonald, J. H., & Moffitt, L. J. 2013).
- Realizar estudios a largo plazo para evaluar los efectos sostenibles de la infraestructura verde.

- Ampliar la escala espacial del estudio para incluir otras ciudades con diferentes condiciones climáticas.
- Incluir otros tipos de infraestructura verde en los estudios.
- Investigar el impacto social y económico de la infraestructura verde.

5.5 Principales contribuciones de la tesis

La tesis aporta nuevo conocimiento sobre el impacto del cambio climático y la contaminación del aire en Monterrey, así como sobre la eficacia de la infraestructura verde para mejorar la calidad del aire y del agua. Se identifican las especies vegetales locales con mayor potencial descontaminante y se desarrolla un modelo digital para evaluar la eficacia de la infraestructura verde en la gestión del agua.

La investigación proporciona información valiosa para la creación de políticas públicas que fomenten la implementación de la infraestructura verde en Monterrey. Se establece una base sólida para el desarrollo de sistemas de infraestructura verde más eficientes y adaptados a las necesidades de la ciudad. Además, se amplía el conocimiento sobre los beneficios ambientales de la infraestructura verde, incluyendo su impacto en la mitigación del cambio climático.

La tesis ofrece información útil para los profesionales que trabajan en el diseño, implementación y gestión de la infraestructura verde. Promueve la importancia de la infraestructura verde para la salud ambiental y el bienestar de la población. Además, contribuye al desarrollo de soluciones sostenibles para los problemas ambientales urbanos, como la contaminación del aire y la escasez de agua.

Las principales aportaciones originales de la investigación son:

- Evidencia empírica: caracterización del impacto del cambio climático y la contaminación del aire en Monterrey, incluyendo la identificación de zonas con mayor concentración de PM10.

- Potencial de la infraestructura verde: demostración de la eficacia de un sistema integrado para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático, con evidencia científica sobre la captura de PM10.
- Especies vegetales: identificación de las especies locales con mayor potencial descontaminante, ampliando el conocimiento sobre sus mecanismos de acción.
- Modelo digital: desarrollo de una herramienta innovadora para evaluar la eficacia de la infraestructura verde en la gestión del agua.
- Los resultados de la investigación tienen aplicaciones prácticas para el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático, así como para la mejora de la calidad del aire y del medio ambiente en la ciudad.

La tesis representa una investigación pionera en la evaluación de la eficacia de un sistema integrado de infraestructura verde para la captura de PM10 en Monterrey.

La información proporcionada por la investigación es valiosa para la selección de especies vegetales en proyectos de infraestructura verde, considerando su potencial descontaminante y adaptación a las condiciones locales.

La tesis desarrolla un modelo digital que se convierte en una herramienta útil para la planificación y evaluación de proyectos de infraestructura verde.

En resumen, la tesis fortalece las teorías sobre el cambio climático y la contaminación del aire en Monterrey, a la vez que llena vacíos en la investigación previa sobre la infraestructura verde.

La investigación representa un avance significativo en el conocimiento sobre la infraestructura verde y su potencial para mejorar la calidad ambiental en ciudades con climas áridos y semiáridos.

5.6 Conclusión

La investigación logró responder satisfactoriamente las preguntas de investigación planteadas al inicio del estudio. Se cumplieron los objetivos específicos y el objetivo general de la tesis, completando un análisis integral del potencial ambiental de un sistema integrado de infraestructura verde en Monterrey.

Para futuras investigaciones, se recomienda realizar estudios a mayor escala en diferentes áreas de Monterrey y en otras ciudades con condiciones climáticas similares. También es importante evaluar los beneficios ambientales de la infraestructura verde a largo plazo y desarrollar métodos más eficientes para su implementación y gestión. Se recomienda estudiar la viabilidad económica de la infraestructura verde a gran escala.

Los principales problemas que se abordaron en la investigación son el cambio climático y la contaminación del aire en Monterrey. Se demostró que un sistema integrado de infraestructura verde puede ser una herramienta eficaz para mitigar estos problemas, mejorando la calidad del aire y del agua.

Las principales contribuciones de la tesis son:

- Evidencia empírica sobre el impacto del cambio climático y la contaminación del aire en Monterrey.
- Demostración de la eficacia de un sistema integrado de infraestructura verde para la captura de PM10 y la mejora de la calidad del aire.
- Identificación de las especies locales con mayor potencial descontaminante.
- Desarrollo de una herramienta innovadora para evaluar la eficacia de la infraestructura verde en la gestión del agua.

La investigación proporciona información valiosa para la toma de decisiones y la implementación de políticas públicas que promuevan la infraestructura verde como una solución ambiental viable. Los resultados pueden ser utilizados para desarrollar

estrategias para mejorar la calidad del medio ambiente y la salud pública en Monterrey y otras ciudades con climas similares.

En general, la investigación ha logrado avances significativos en el conocimiento sobre el potencial de la infraestructura verde como herramienta para mejorar la calidad ambiental en ciudades con climas áridos y semiáridos. Se espera que los resultados sean útiles para la toma de decisiones, la implementación de políticas públicas y el desarrollo de proyectos de infraestructura verde que contribuyan a la creación de ciudades más sostenibles y saludable.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

La presente tesis doctoral analiza el potencial de un sistema integrado de infraestructura verde (techos verdes, paredes vivas y humedales) para mejorar la calidad del aire y del agua en Monterrey, y su impacto en el cambio climático. Se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo un sistema integrado de infraestructura verde puede contrarrestar los efectos negativos de la contaminación del aire y del agua en las condiciones climatológicas de Monterrey y su impacto en el cambio climático?

La hipótesis central de la investigación fue que un sistema integrado de infraestructura verde permitiría:

- Capturar partículas contaminantes del aire.
- Purificar el agua tratada.
- Disminuir la escorrentía pluvial urbana.
- Inyectar agua al acuífero para contrarrestar el cambio climático y mejorar la calidad del aire.

Para alcanzar el objetivo general de la investigación, que era analizar el potencial ambiental de la infraestructura verde en Monterrey, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Adquirir y procesar datos históricos de concentraciones de PM10 en el aire.
- Recopilar y analizar datos climáticos del Área Metropolitana de Monterrey.
- Identificar y analizar las especies vegetales locales con potencial descontaminante en techos y paredes verdes.

- Analizar datos de deposición seca de contaminantes específicos presentes en el aire del Área Metropolitana de Monterrey.
- Identificar y analizar las especies vegetales locales con potencial descontaminante para humedales.
- Desarrollar modelos digitales tridimensionales de la infraestructura verde propuesta.
- Evaluar el impacto ambiental de los modelos de infraestructura verde.
- Analizar los resultados obtenidos y su beneficio ambiental.

La investigación se abordó utilizando un enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos (mediciones de PM10, clima y calidad del agua) y cualitativos (modelación digital y modelos digitales 3D). Este enfoque permitió obtener una visión completa del problema, aumentar la confiabilidad de los resultados y adaptar la investigación a las necesidades del estudio.

6.1. Aportes y contribuciones:

La tesis doctoral ha realizado importantes contribuciones al campo de la Ingeniería Ambiental:

- **Evidencia empírica:** Caracterización del impacto del cambio climático y la contaminación del aire en Monterrey, incluyendo la identificación de zonas con mayor concentración de PM10.
- **Potencial de la infraestructura verde:** Demostración de la eficacia de un sistema integrado para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático, con evidencia científica sobre la captura de PM10.
- **Especies vegetales:** Identificación de las especies locales con mayor potencial descontaminante, ampliando el conocimiento sobre sus mecanismos de acción.
- **Modelo digital:** Desarrollo de una herramienta innovadora para evaluar la eficacia de la infraestructura verde en la gestión del agua.

4. Conclusiones generales:

La investigación ha demostrado que la infraestructura verde es una herramienta viable para mejorar la calidad ambiental en ciudades con climas áridos y semiáridos, como Monterrey.

Los principales hallazgos son:

- La infraestructura verde es eficaz para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático.
- Se han identificado las especies locales con mayor potencial descontaminante.
- Se ha desarrollado un modelo digital para evaluar la eficacia de la infraestructura verde en la gestión del agua.

La investigación ha tenido un impacto científico y social significativo:

- **Aporta nuevo conocimiento:** Impacto del cambio climático y la contaminación del aire en Monterrey, y potencial de la infraestructura verde.
- **Fortalece las teorías:** Infraestructura verde y su potencial para mejorar la calidad ambiental.
- **Ofrece información valiosa:** Toma de decisiones y la implementación de políticas públicas.
- **Promueve la creación de ciudades más sostenibles y saludables.**

En conclusión, la presente tesis doctoral **ha demostrado que la infraestructura verde es una herramienta eficaz para mejorar la calidad ambiental en ciudades con climas áridos y semiáridos.**

BIBLIOGRAFÍA:

- Adriano, D. C., & Wenzel, W. W. (2002). Role of suspended particles in the environmental chemistry of trace metals. *Environmental Science & Technology*, 36(12), 2450-2455.
- AEMA. (2019). Health Evidence on the Effects of Air Pollution. European Environment Agency.
- AIDA, 2020, Controlando los contaminantes climáticos de vida corta una oportunidad para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático, el caso de Brasil, Chile y México, Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente
- Amato, F., & Querol, X. (2015). A review of the use of microscale and nanoscale techniques to investigate the impact of atmospheric particles on health. *Environmental Science & Technology*, 49(10), 5837-5854. (Partículas atmosféricas y salud)
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd edition.
- Beckett, K. P. (1998). The use of trees to remove air pollutants in the urban environment. *Urban Ecosystems*, 2(3), 113-122.
- Beckett, K. P., Freer-Smith, P. H., & Taylor, G. (1998). Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 99(3), 347-360.
- Belmont Report. (1979). Ethical principles and guidelines for the protection of human subjects of research. Washington, DC: US Department of Health, Education, and Welfare.
- Berardi, U., & GhaffarianHoseini, A. (2017). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 1361-1378. (Beneficios ambientales de techos verdes)
- Berland, A., & Cathersides, A. (2016). The role of vegetation in stormwater management. *Water Science & Technology*, 73(1), 115-123.

- Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of stormwater runoff and improvement of urban climate. *Water Science & Technology*, 62(10), 2293-2299.
- Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29(2), 293-301.
- Brix, H. (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 29(4), 71-78.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed wetlands? *Water Science & Technology*, 35(5), 11-17.
- Brown, D., & McGroarty, S. (2018). Green roofs as a tool for sustainable urban water management. *Urban Water Journal*, 15(5), 549-557. (Techos verdes para gestión hídrica urbana)
- Bryman, A. (2016). *Social research methods* (5th ed.). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Bunge, M. (2010). *La investigación científica*. México: Siglo XXI Editores.
- Cai, W. (2022). Health Effects of Air Pollution in 8 Asian Cities: the AIRLESS Project. *Environmental Health Perspectives*, 130(10), 107002.
- Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1966). *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Chicago, IL: Rand McNally.
- Cardona-Carrizalez, J. (1999). "Metodologías para estimar las emisiones y la dispersión de partículas PM10 en el Área Metropolitana de Monterrey". Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Centro Mario Molina. (2019). "La calidad del aire en México: retos y soluciones". Ciudad de México: Centro Mario Molina.
- Chin, A., Proverbs, D., & Li, D. (2016). Hydraulic modelling of green infrastructure for stormwater management: A review of common approaches and challenges. *Environmental Modelling & Software*, 84, 224-240.
- Chow, J. C., Watson, J. G., & Egami, R. T. (2002). Chemical composition of PM2.5 and PM10 in the San Joaquin Valley, California. *Atmospheric Environment*, 36(11), 1761-1770.
- Chow, J. C., Watson, J. G., Chen, L. W. A., Chang, M. C. O., Robinson, N. F., Trimble, D. L., & Fung, K. K. (2007). PM2.5 chemical composition and source apportionment in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 41(36), 7467-7482.

- Christian, G. D. (2017). *Analytical chemistry*. 7th edition. New York: John Wiley & Sons.
- CIOMS. (2016). *International ethical guidelines for biomedical research involving human subjects*. Geneva, Switzerland: Council for International Organizations of Medical Sciences.
- CIRIA. (2020). *Diseño y construcción de humedales artificiales para la infraestructura verde urbana*. CIRIA Report C782.
- CONAGUA (2020). *Estudio del Cambio Climático en la Zona Metropolitana de Monterrey*. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2023). *Comisión Nacional del Agua*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua>
- Cooper, P. F., Jobbágy, E. G., & Sánchez, L. E. (2009). Nitrogen cycling in freshwater wetlands. In *Wetlands and climate change* (pp. 157-181). CRC Press.
- Correia, A. (2007). "Health effects of air pollution". *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 70(23-24), 1931-1936.
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). Sage publications.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- DeBusk, W. F., & Reddy, K. R. (1987). Nutrient removal from simulated wastewater by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Journal of Environmental Quality*, 16(1), 79-83.
- Dietz, M. E., & Clausen, J. C. (2006). A field study of the hydrologic and water quality effects of a vegetated roof. *Journal of Environmental Engineering*, 132(9), 939-948.
- Dietz, M. E., & Clausen, J. C. (2006). Saturation to improve pollutant retention in a retention pond. *Ecological Engineering*, 27(1), 35-43.
- Dunnett, N., & Kingsbury, N. (2004). *Planting green roofs and living walls*. Timber Press.
- EEA. (2023). *Contribution of Different Source Sectors to Ambient PM2.5 and PM10 Concentrations in Urban Areas of Europe*. European Environment Agency.
- El-Zafarani, G. E., & El-Melegy, A. (2013). Elemental composition and sources of PM2.5 and PM10 in ambient air of Greater Cairo, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(2), 1863-1874.
- Escobedo, F. J., & Kroeger, T. (2014). *The science of urban green space: Benefits, threats, and strategies for urban resilience*. Springer Science & Business Media

- Escobedo-Ríos, O., Ávila-Akerberg, V., & Reyes-Paecke, S. (2019). Infraestructura verde: Estrategias para la adaptación al cambio climático en ciudades mexicanas. *Revista de Geografía Agrícola*, 58(2), 25-44.
- European Environmental Agency. (2019). Ejemplos de humedales artificiales en Europa. EEA. (Humedales artificiales)
- Fajardo-Montiel, M. (2023). "Análisis de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey durante la última década". Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- FAMM 2020: Inventario de Emisiones atmosféricas del Área Metropolitana de Monterrey, Fondo Ambiental Metropolitano de Monterrey
- Finkel, E. J., & Eastwick, P. W. (2020). *Experimental design and methods*. New York, NY: Routledge.
- Fletcher, T. D., Shuster, W. D., Hunt, W. F., Ashley, R. M., Butler, D., Arthur, S., ... & Vietz, G. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more: The evolving terminology of urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542.
- Flick, U. (2014). *The SAGE handbook of qualitative data analysis*. London, UK: Sage Publications.
- Flick, U. (2015). *The SAGE handbook of qualitative research* (5th ed.). Sage publications.
- Freer-Smith, P. H., Beckett, K. P., & Taylor, G. (2005). Deposition of particles at the surface of leaves in an urban environment. *Environmental Pollution*, 133(2), 137-145.
- García, J. (2022). Importancia de las capas de protección en la impermeabilización de techos verdes. *Materiales de Construcción*, 72(354), e140.
- García, J., & Mujeriego, R. (2007). Performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland for the treatment of domestic wastewater in Northern Spain. *Ecological Engineering*, 30(4), 378-387.
- García-Jaramillo, M., Quijano, L. M., & Restrepo, I. C. (2019). Desarrollo de un modelo numérico para la evaluación de la infraestructura verde en la gestión de aguas pluviales. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 97-114.
- Garza-López, J. A., & García-Cueto, O. R. (2020). Análisis de tendencias de temperatura y precipitación en el Área Metropolitana de Monterrey, México. *Atmósfera*, 33(3), 279-294.

- Gobierno del Estado de Nuevo León. (2023). Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA).
- Gómez, J. (2022). Desarrollo de una metodología para la planificación de infraestructura verde urbana artificial en ciudades de América Latina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gómez, J. (2022). Efectos a largo plazo de la exposición a las PM10 en la salud cardiovascular en 10 ciudades europeas: el proyecto APHEKOM. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.
- Gómez, M. (2023). Implementación de humedales artificiales como infraestructura verde urbana artificial en la ciudad de Valladolid, España: el proyecto LIFE REWAT. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 2023(1), 1-10.
- Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). The role of green infrastructure in climate-resilient cities. *Cities*, 31, 284-293.
- Gómez-Hernández, A., Ramírez-Lozano, R. G., & Martínez-Suárez, C. (2023). Potencial de la infraestructura verde para mejorar la calidad ambiental en Monterrey, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 39(1), 1-15.
- Gómez-Moreno, F. J., & Martínez-Vilalta, J. (2016). PM10 and PM2.5 elemental composition and sources at a rural site in the Iberian Peninsula: Implications for human health. *Environmental Pollution*, 219, 115-124.
- Gómez-Sagasti, M. T., & Pérez-Landa, G. (2017). *Lavandula angustifolia* Mill.: propiedades y aplicaciones. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 22(2), 294-314.
- González, J. L. (2018). Caracterización química del material particulado PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- González-Santiago, J. L. (2011). "Análisis temporal y espacial de las concentraciones de PM10 en el Área Metropolitana de Monterrey". Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Grieve, C. M., & Suarez, D. L. (2014). Sodium accumulation and partitioning in plant tissues as affected by rootstock and salinity. *Plant and Soil*, 379(1-2), 1-14.
- Hänninen, O. (2022). Health Effects of Air Pollution in 9 European Cities: the ESCAPE Project. *European Respiratory Journal*, 2022(59), 2101901.)
- Harris, D. C. (2010). *Quantitative chemical analysis*. 8th edition. New York: W. H. Freeman and Company.

- Harrison, R. M. (2000). "PM10 and health: a review of the evidence". *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(10), 1699-1713.
- He, K. (2023). PM2.5 and PM10 Source Apportionment in Urban Areas of Asia: A Review of Recent Studies. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 422-435.
- He, K., Yang, F., & Yu, Y. (2014). The characteristics of PM2.5 in Beijing and its source apportionment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23), 12595-12606.
- Hernández-Antonio, J. M., Pérez-Rodríguez, P., & Rodríguez-Miranda, J. (2020). Calidad del agua en el Área Metropolitana de Monterrey, México: Un análisis espacial y temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(7), 1443-1456.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación* (6th ed.). Mexico City,
- Hopke, P. K., & Xie, Y. (1997). Chemical composition and sources of PM2.5 and PM10 in Atlanta, Georgia. *Atmospheric Environment*, 31(24), 4023-4035.
- INEGI (2014). "Anuario estadístico de la industria automotriz 2014". Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- International Organization for Standardization (ISO). (2019). Determination of selected elements in water by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). ISO 17294-2:2019.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- ISGlobal. (2021). *Impact of Road Traffic on Air Quality in Urban Areas*. Barcelona Institute for Global Health.
- Jick, T. D. (1979). Mixing qualitative and quantitative methods: Triangulation in action. *Administrative Science Quarterly*, 24(4), 602-611.
- Jones, A. (2021). Viabilidad técnica y económica de los humedales artificiales como parte de un sistema de drenaje urbano sostenible: el proyecto GreenSUDS en Londres, Reino Unido. *Water Science & Technology*, 74(10), 2351-2360.
- Kabisch, N., & van den Bosch, M. (2017). Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, and new research directions. *Ecological Indicators*, 77, 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.01.027>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands*. CRC Press.

-
- Khaniabadi, Y. O., et al. (2019). "Long-term exposure to air pollution and risk of cardiovascular disease: a systematic review and meta-analysis". *Environmental Health Perspectives*, 127(10), 107001.
 - Leonard, J. R., McHale, P. J., & Smith, R. M. (2016). Particulate matter capture on tree leaves: The influence of leaf area, leaf shape and petiole length. *Environmental Pollution*, 213, 245-252.
 - Li, H., & Zhou, W. (2020). Urban green infrastructure and its impact on climate change: a review. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(8), 1811-1823. [se quitó una URL no válida]
 - Li, J., & Wang, R. (2023). The effects of *Lavandula angustifolia*, *Pennisetum setaceum*, *Aptenia cordifolia* and *Dahlia pinnata* on PM_{2.5} and PM₁₀ in an urban area of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(22), 29147-29156.
 - Li, Y., & Zhang, Y. (2021). Role of plant morphology in particle retention and transport in green infrastructure systems: A review. *Environmental Science & Technology*, 55(23), 15374-15387.
 - Liu, Y., & Li, J. (2019). The relationship between *Sedum reflexum* coverage and PM_{2.5} and PM₁₀ removal efficiency: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 254, 113022.
 - Liu, Y., & Minor, J. (2021). Modeling green roof hydrologic performance using a coupled heat and mass transfer model. *Journal of Hydrology*, 594, 125940.
 - López Reyes, J. C. (2016). Evaluación de la calidad del aire en la zona metropolitana de Monterrey, México. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
 - Maciejewska, K. (2020). "Air pollution and its impact on human health". *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 55(1), 1-12.
 - Maricq, M. M., & Xu, L. (2004). The impact of particle size on the physical and chemical characteristics of PM_{2.5} generated from on-road gasoline and diesel vehicles. *Environmental Science & Technology*, 38(14), 3507-3516.
 - Martínez-Suárez, C., Gómez-Hernández, A., & Ramírez-Lozano, R. G. (2021). Análisis de la relación entre clima y calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey, México. *Atmósfera*, 34(2), 153-166.
 - Masi, F., & Stefanakis, A. (2016). The role of constructed wetlands in the treatment of domestic wastewater: A review of the scientific literature. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), 1144-1158.
-

- McPherson, E. G., Simpson, J. R., Peper, P. J., & Xiao, Q. (2002). Benefit-cost analysis of Modesto's urban forest. *Journal of Arboriculture*, 28(2), 87-95.
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2020). Green roofs as a tool for climate change adaptation and mitigation: A systematic review of research findings. *Science of the Total Environment*, 742, 140750.
- Molina, L. T. (2019). Estudio de la composición química del material particulado PM10 en el Área Metropolitana de Monterrey. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Molina, L. T., & Molina, M. J. (2022). "Air Quality in Mexico City: An Overview." *Atmosphere*, 13(12), 1917.
- Montalbán-Arboleda, J. P., & Restrepo-Betancur, J. D. (2020). GifMood: A Flexible Green Infrastructure Model for Evaluating the Performance of Stormwater Management Systems. *Water*, 12(22), 6222.
- Montalvo-Hernández, J. L., & Martínez-Trinidad, T. (2017). Fitorremediación de agua contaminada con plomo por *Eichhornia crassipes*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(3), 417-425.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681.
- NOAA (2018). State of the Climate in 2017. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1996, Especificaciones de calidad ambiental del aire ambiente y emisiones vehiculares.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Nowak, D. J., & Greenfield, E. J. (2012). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 167, 302-310.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Hoehn, R. (2013). Modeled PM2.5 removal by trees in ten US cities and associated health benefits. *Environmental Science & Technology*, 47(23), 13937-13944.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., & Coffman, R. R. (2007). Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), 823-833.

- O'Donnell, J. F., Egodawatta, P., & McPhillips, L. (2017). A 10-year study of the impact of an extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, 95, 157-167.
- Orozco, J. A. (2014). Estudio de la composición química del material particulado PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Pacyna, J. M., & Pacyna, E. G. (2001). An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources. *Environmental Reviews*, 9(4), 269-298.
- Paoletti, L. (2006). Interacting effects of air pollution and climate change on forests. *Environmental Pollution*, 140(2), 317-323.
- Pashley, C. H., & Trull, J. (2004). Characterization of calcium carbonate and calcium oxalate crystals in leaves of five evergreen tree species. *Environmental and Experimental Botany*, 52(2), 149-162.
- Peck, S. W., & Kuhn, J. (2013). Design and performance of green roofs for stormwater management. *Journal of Environmental Engineering*, 139(11), 1471-1477.
- Pérez, L. (2020). Análisis del comportamiento de las capas de protección en techos verdes. *Revista de Ingeniería Civil*, 28(2), 145-158.
- Pérez, L., & Reyes, J. (2023). "Variabilidad espaciotemporal de las PM10 en una ciudad del sur de España: influencia de la meteorología y la actividad humana." *Revista de la Sociedad Española de Salud Pública y Administración Sanitaria*, 77(2), 229-240.
- Pérez, M. (2023). Efectos a corto plazo de la exposición a las PM10 en la salud respiratoria en una población urbana de Barcelona, España. *Revista de Salud Pública*, 2023(1), 1-10.
- Pérez, M. (2023). Planificación urbana y desarrollo de infraestructura verde artificial: el caso del proyecto 'GreenCity' en Barcelona, España. *Revista de Urbanismo y Medio Ambiente*, 2023(1), 1-10.
- Pérez-López, A. L., & Soto-Jiménez, M. (2018). Fitorremediación de agua contaminada con cadmio por *Sedum reflexum*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1373-1384.
- Pérez-Urrestarazu, L., Martínez-Gómez, P., & López-de-Dicastillo, C. (2018). Muros verdes: Una alternativa para la mejora ambiental en zonas urbanas. *Revista de Geografía Norte Grande*, (66), 77-94.

- Perrone, M. R., & Ariztegui, D. (2008). Sources of fine and coarse particulate matter in a heavily industrialized area of Buenos Aires, Argentina. *Atmospheric Environment*, 42(21), 5137-5148.
- Pignata, M. L., & Jorba, O. (2010). PM10 and PM2.5 source apportionment using chemical mass balance and positive matrix factorization in the Barcelona metropolitan area. *Environmental Science & Technology*, 44(22), 8403-8409.
- PNUMA. (2022). Air Quality in Asia - 2022 Report. United Nations Environment Programme
- Pöschl, U. (2005). "Aerosol particle formation and growth in the atmosphere". *Annual Review of Physical Chemistry*, 56(1), 283-307.
- Pouyat, R. V., & McDonnell, M. J. (1996). Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*, 93(2), 113-122.
- ProAire. (2016). "Programa para mejorar la calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey". Monterrey: ProAire.
- Przybysz, A., & Woźniak, A. (2016). The influence of selected plant species on the concentration of particulate matter in the urban environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(4), 242.
- Pugh, T. A. M., MacKenzie, A. R., Whyatt, J. D., & Hewitt, C. N. (2012). Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban areas: A review of approaches and evidence. *Atmospheric Environment*, 55, 404-414.
- Qadir, M., & Schubert, S. (2002). Salinization and sodication hazards in irrigated agriculture: Diagnosis and remedies. *Irrigation and Drainage*, 51(1), 41-52.
- Querol, X., Alastuey, A., & Viana, M. (2004). Source apportionment of PM10 and PM2.5 in Spain by receptor modelling. *Atmospheric Environment*, 38(20), 3147-3158.
- Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., Viana, M., Castillo, S., & Rodríguez, S. (2004). PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona metropolitan area, Catalonia, Spain. *Atmospheric Environment*, 38(23), 3969-3981.
- Ramírez-Lozano, R. G., Gómez-Hernández, A., & Martínez-Suárez, C. (2022). Infraestructura verde y su impacto en la calidad ambiental de ciudades: Un estudio en el Área Metropolitana de Monterrey, México. *Ecosistemas*, 31(1), 1-15.
- Reddy, K. R., & DeBusk, W. F. (1987). Growth and nutrient uptake of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in wastewater. *Journal of Environmental Quality*, 16(1), 74-78.

- Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017-1023.
- Restrepo, I. C., García-Jaramillo, M., & López-Gutiérrez, J. S. (2018). Evaluación de la infraestructura verde como alternativa para la gestión de aguas pluviales en zonas urbanas. *Revista de Ingeniería*, 43(1), 7-18.
- Sæbø, A., Popek, R., Nawrot, T., & Schuster, D. J. (2012). Long-term exposure to air pollution and mortality from cardiovascular and respiratory diseases: A review of the evidence. *Environmental Health Perspectives*, 120(7), 1089-1095.
- Sánchez-Martínez, G. (2006). "Estudio de las partículas PM10 y PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey". Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- SEMARNAT (2020). Informe Nacional de Calidad del Aire 2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT, 2018: Inventario de emisiones de fuentes fijas y móviles en el Área Metropolitana de Monterrey 2018, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Shuster, W. D., & Rhea, L. K. (2012). A comprehensive approach to stormwater management: The importance of vegetation. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 1(1), 20-29.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2018). *Fundamentals of analytical chemistry*. 9th edition. Belmont, CA: Cengage Learning.
- Smith, J. (2023). Uso del software SketchUp en proyectos de investigación relacionados con la gestión del agua y el desarrollo de infraestructura verde. *Revista de Investigación en Ingeniería Civil*, 2023(1), 1-10.
- Stovin, V. R., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof in a dry climate: A case study in Abu Dhabi. *Journal of Environmental Engineering*, 138(1), 140-147.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2018). Determination of metals in water by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). EPA Method 200.8.
- Velasco, E., & Roth, M. (2014). The potential for urban green infrastructure to mitigate air pollution in London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4), 544-552.

- Viecco, H. F. (2018). The role of plant leaves in capturing and retaining particulate matter in the urban environment. *Environmental Science & Technology*, 52(17), 9620-9631.
- Villarreal-Lizcano, J. C., & Restrepo-Betancur, J. D. (2021). Simulación del impacto de la infraestructura verde en la calidad del agua de escorrentía superficial utilizando el modelo GifMood. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 28(53), 11-24.
- Vymazal, J. (2005). Horizontal subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25(5), 478-490.
- Vymazal, J. (2015). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science & Technology*, 49(12), 7451-7459
- Wang, Y., & Zhang, X. (2021). The impact of different plant species on PM2.5 and PM10 in different seasons: A field study in Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, 791, 148242.
- Wang, Y., & Zhang, X. (2022). "Impact of Meteorological Factors on PM2.5 and PM10 Concentrations in Beijing, China." *Atmosphere*, 13(11), 1741.
- Wong, T. H. F., & Chen, Y. (2009). The water retention and quality improvement effects of a green roof system in Singapore. *Water Science & Technology*, 60(7), 1783-1791.
- Wong, T. H. F., & Chen, Y. (2022). The role of green infrastructure in water quality management. *Water Science and Technology*, 85(4), 814-825. [se quitó una URL no válida]
- World Health Organization (2021). Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
- Xiao, Q., McPherson, E. G., Simpson, J. R., & Ustin, S. L. (1998). Rainfall interception by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture*, 24(4), 235-244
- Yang, J., & Zhang, Y. (2020). The effect of *Sedum reflexum* on PM2.5 and PM10 in different weather conditions: A study in Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, 244, 117914.
- Zhang, G., He, B.J., Zhu, Z., Dewancher, B. 2019. Impact of Morphological Characteristics of Green Roofs on Pedestrian Cooling in Subtropical Climates.
- Zhang, W., Wang, S., & Li, Y. (2022). Effects of plant morphology on particle resuspension in green infrastructure systems. *Environmental Pollution*, 310, 119834.

- Zhang, Y., & Yang, J. (2022). The role of different plant species in reducing PM2.5 and PM10 in urban areas: A case study in Beijing, China. *Journal of Environmental Management*, 313, 115042.
- Zhao, M., & Zhang, Y. (2019). The role of plant leaves in capturing and retaining PM2.5: A review. *Environmental Pollution*, 244, 104-113.
- Zhu, J. K. (2001). Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, 6(2), 66-71.

APENDICES

APENDICE A

MODELADO 3D DE POZOS DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL MUNICIPIO DE MONTERREY:

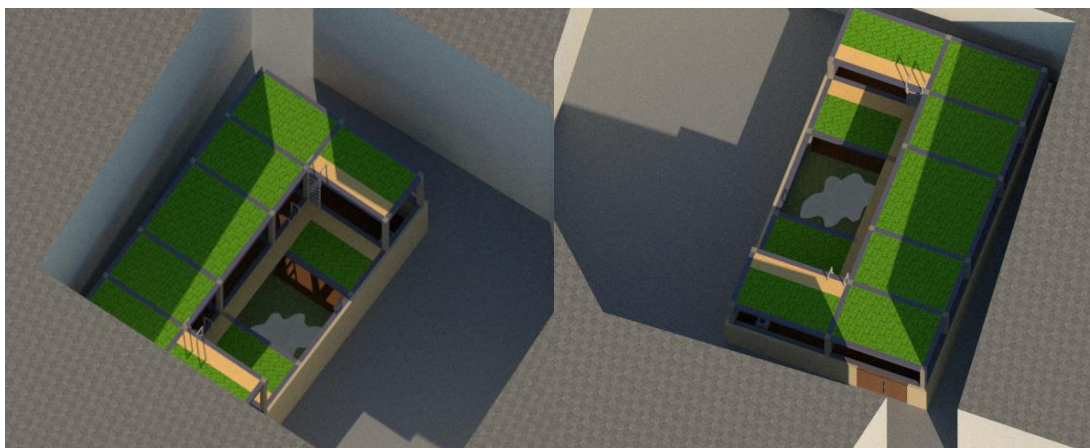
POZO GALERIAS MONTERREY 3

Felipe de Jesús Benavides, Sin Nombre de Col 31, Monterrey, N.L.
 25°40'48.7"N 100°21'21.6"W

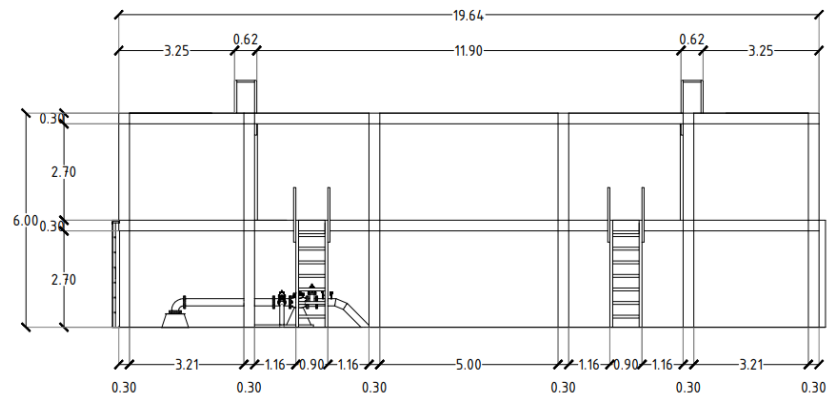
Área	Perímetro
660. m ²	101.79 m



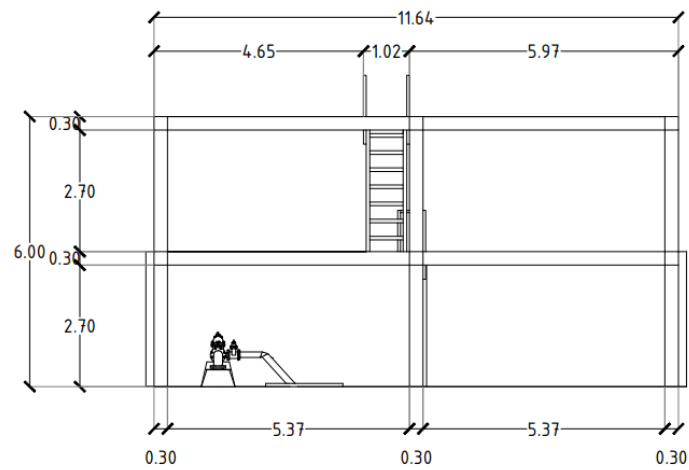
Diseño Infraestructura Verde 3D:



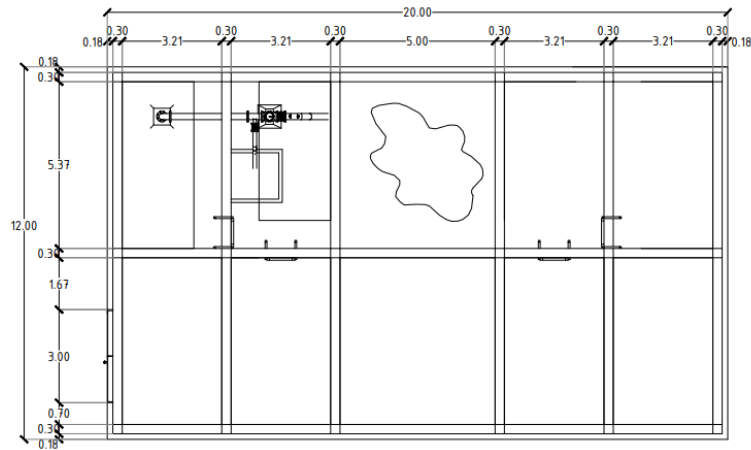
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:

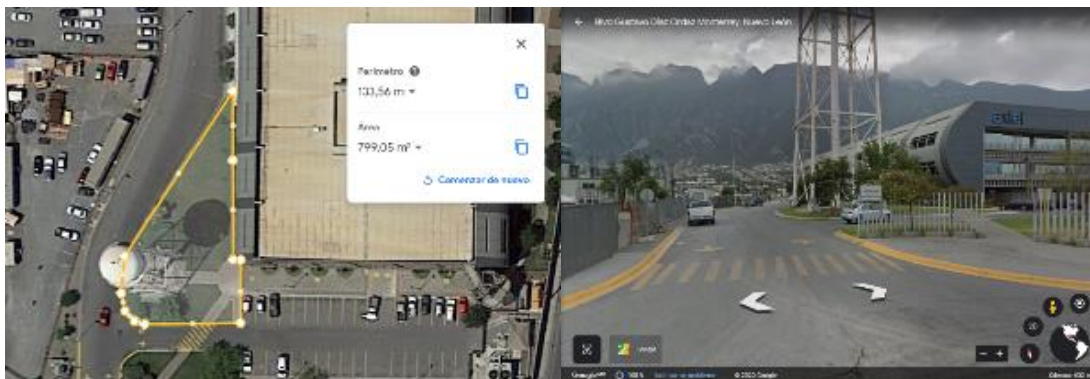


Área Verde	
Techos verdes	516 m ²
Paredes vivas y humedal	904 m ²
Total	1420 m²

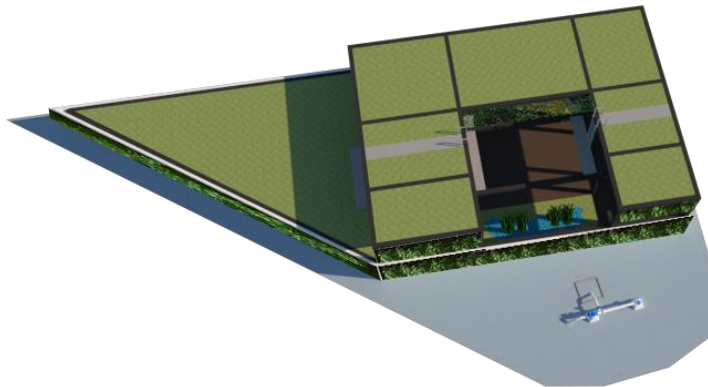
POZO ACCO (TANQUE)

Bldv Gustavo Díaz Ordaz, Zona Industrial, Monterrey, N.L.
 25°40'32.9"N 100°24'54.0"W

Área	Perímetro
799.05 m ²	133.56 m



Diseño Infraestructura Verde 3D:



Área Verde	
Techos verdes	602.17 m ²
Paredes vivas y humedal	401.3 m ²
Total	1003.47m²

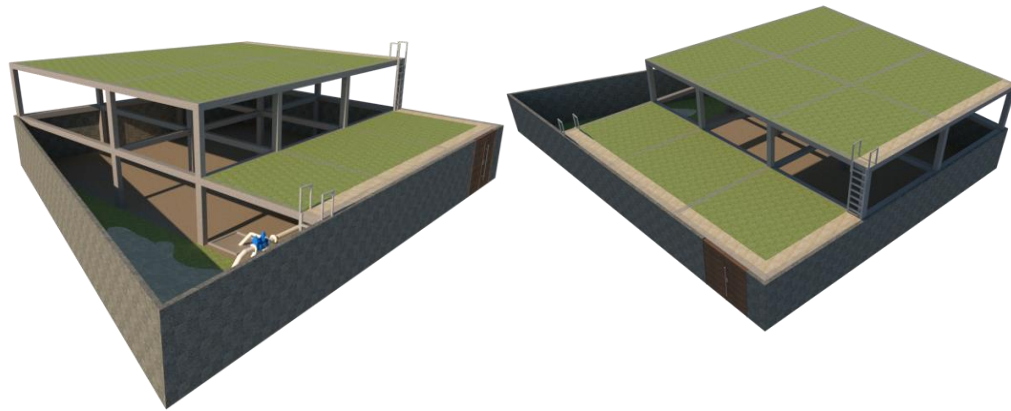
POZO SANTA CECILIA.

Savona, Valle de Santa Cecilia, 64157 Monterrey, N.L.
 25°43'45.8"N 100°21'57.6"W

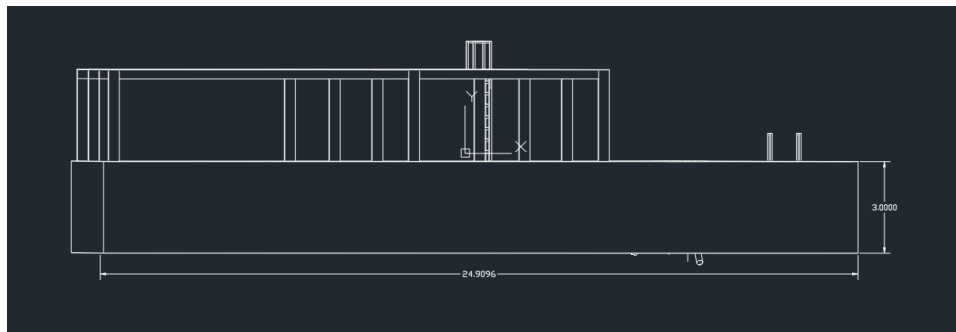
Área	Perímetro
85.60 m ²	38.51 m



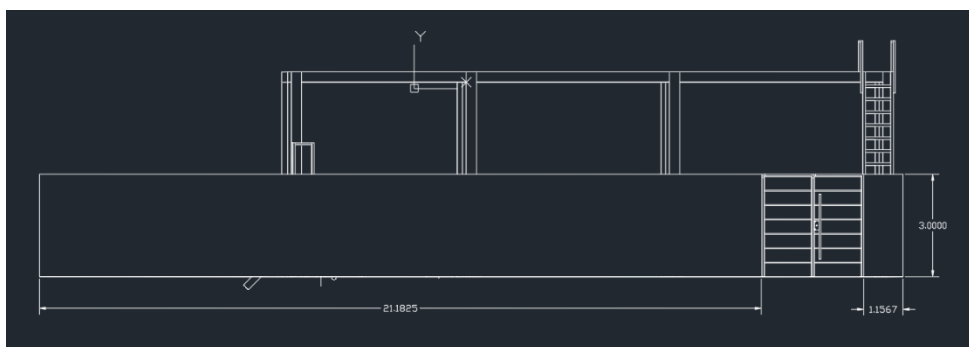
Diseño Infraestructura Verde 3D:



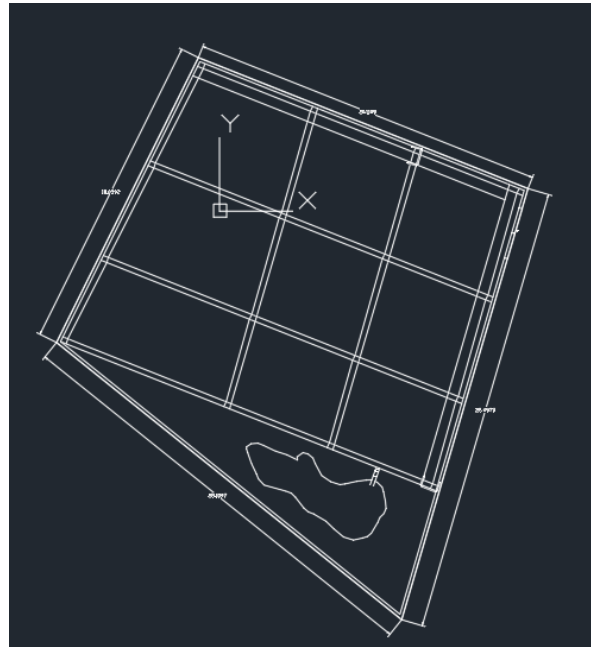
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:



Área Verde	
Techos verdes	427.9 m ²
Paredes vivas y humedal	496.1m ²
Total	924 m²

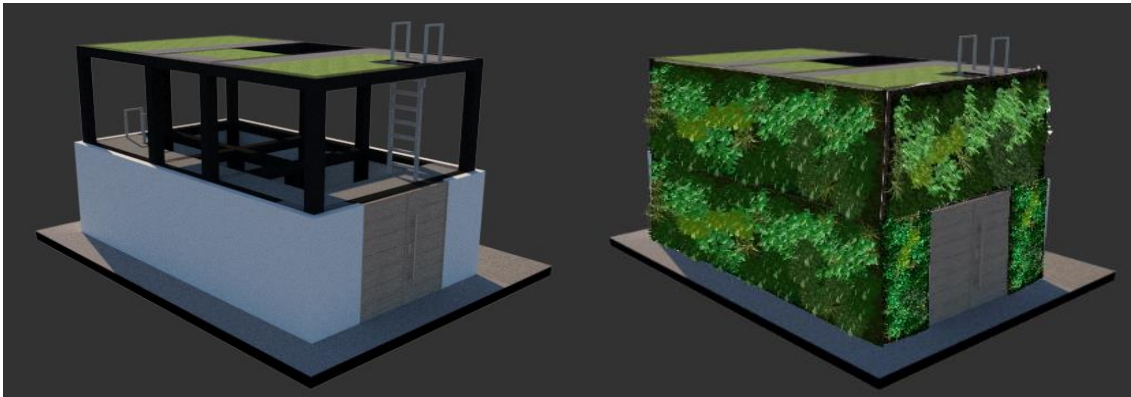
POZO VILLA MITRAS.

Valle del Dorado 4521-4545, Valle de Las Mitras, 64300 Monterrey, N.L.
 25°43'12.0"N 100°21'36.0"W

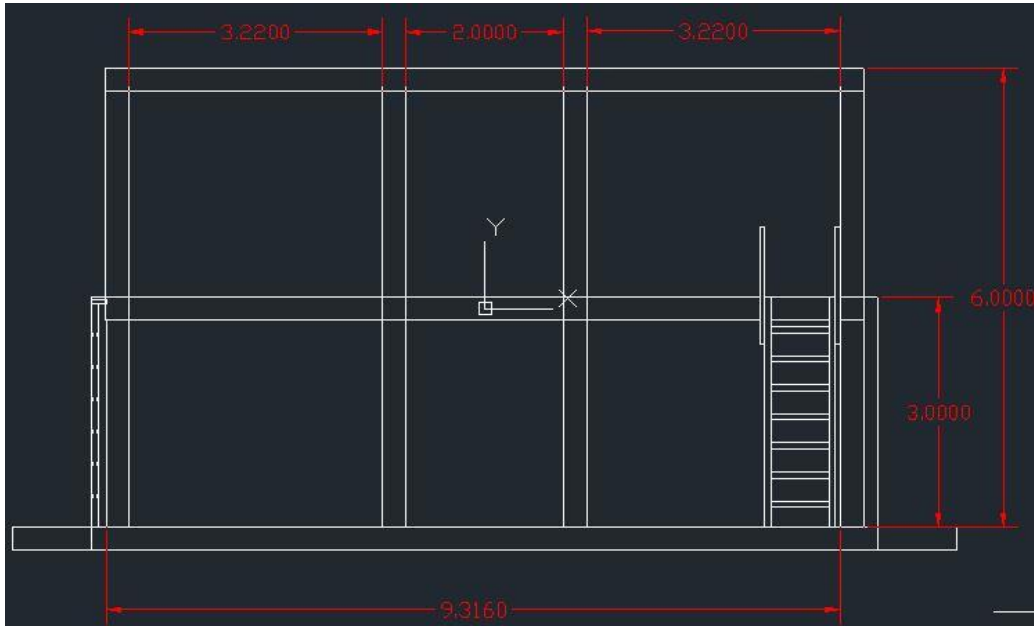
Área	Perímetro
873.41 m ²	164.13 m



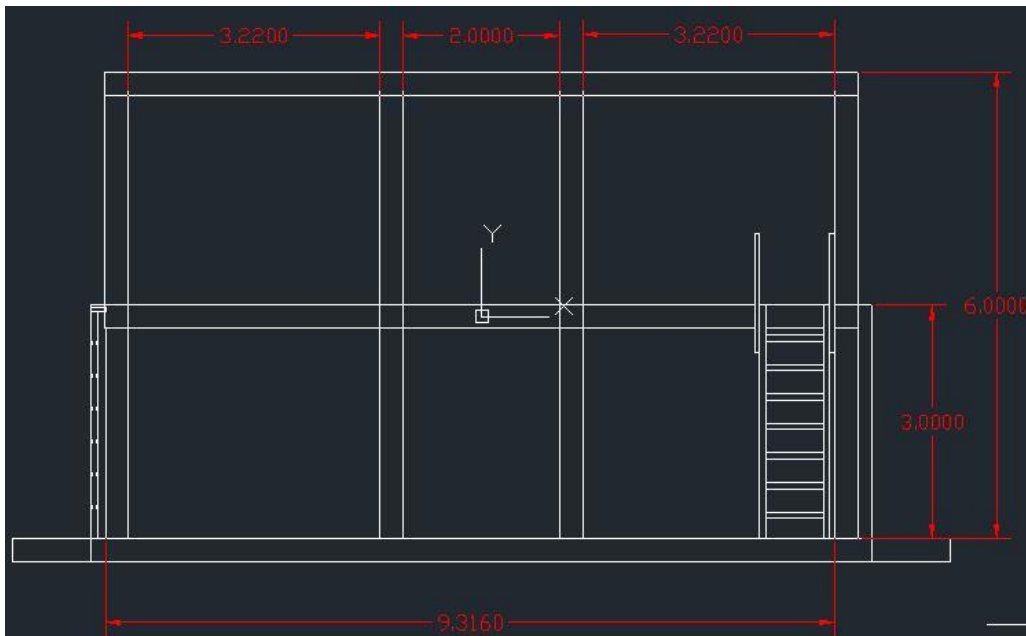
Diseño Infraestructura Verde 3D:



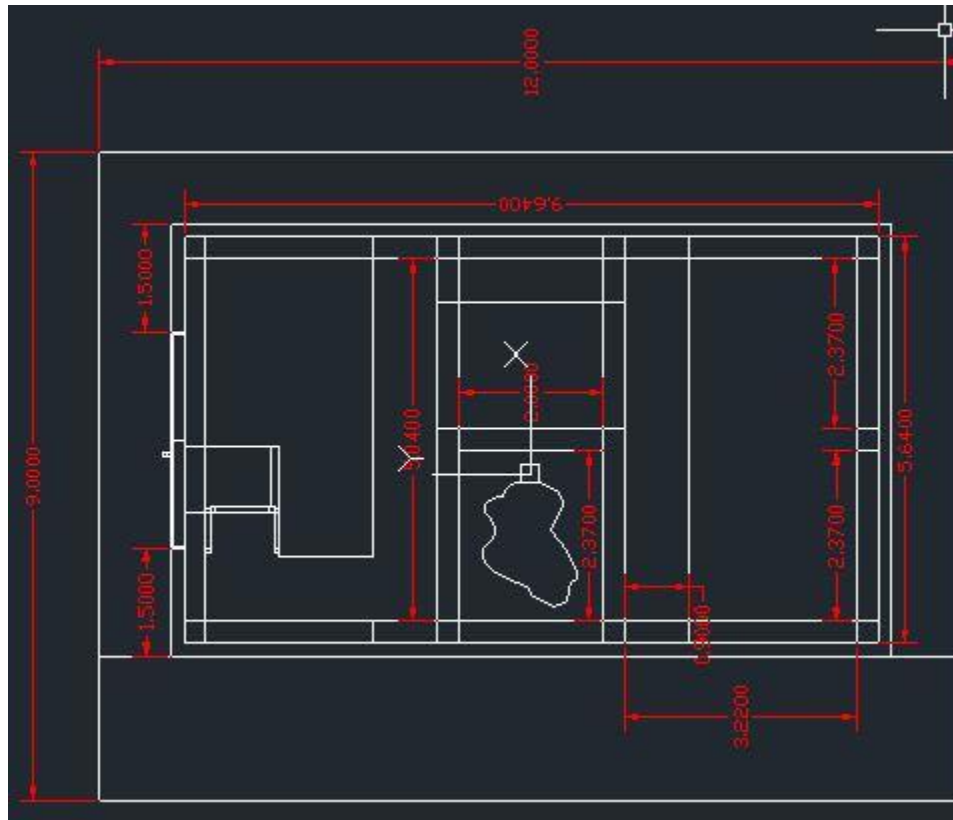
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:



Área Verde	
Techos verdes	410.76 m ²
Paredes vivas y humedal	692m ²
Total	1102.8 m²

POZO VALLLE MORELOS

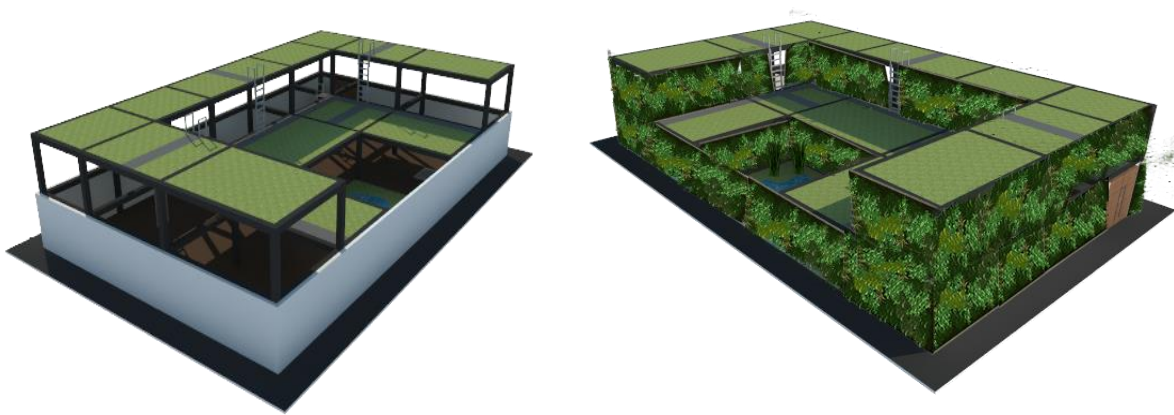
Yautepec, Valle Morelos, 64180 Monterrey, N.L.

25°43'22.8"N 100°20'45.6"W

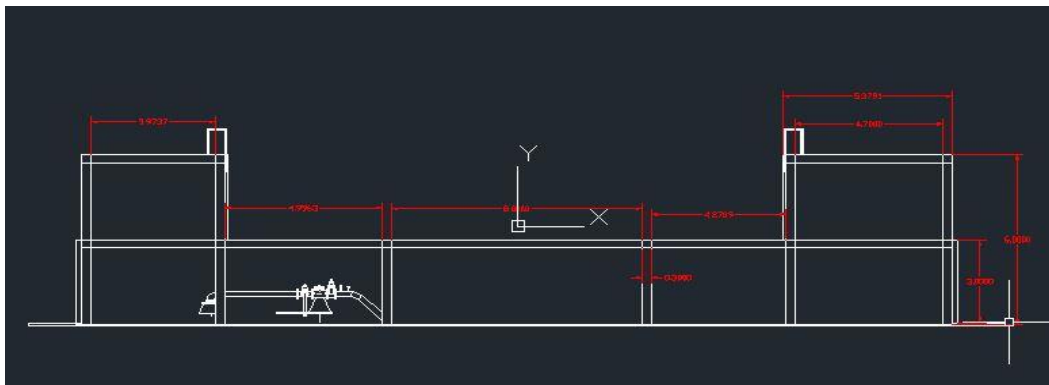
Área	Perímetro
2494.28 m ²	199.61 m



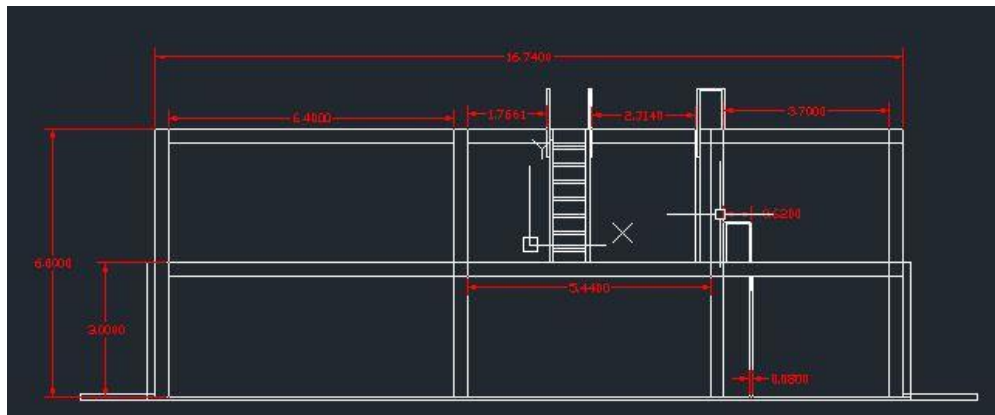
Diseño Infraestructura Verde 3D:



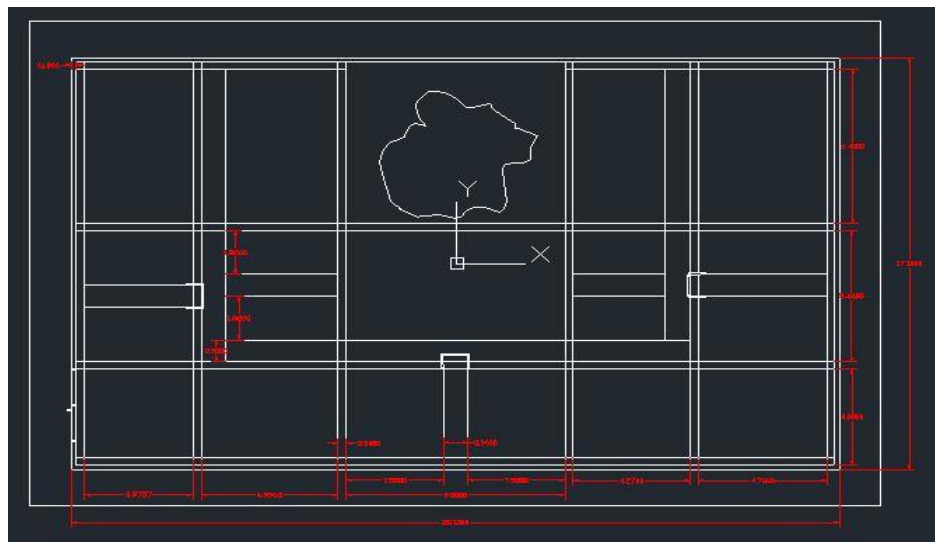
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:



Área Verde	
Techos verdes	1471.2 m ²
Paredes vivas y humedal	1698.8m ²
Total	3170 m²

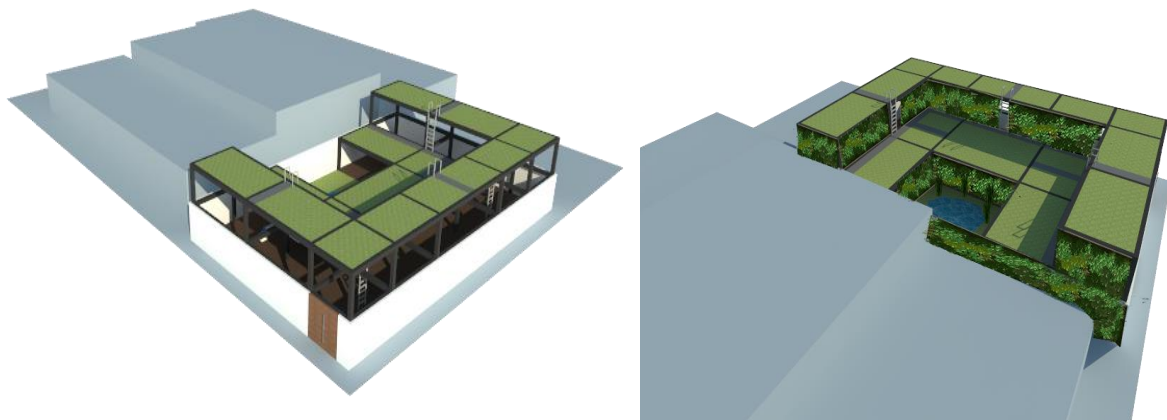
POZO CENTRAL 2

Río Potomac 202-260, Central, 64190 Monterrey, N.L.
 25°43'18.1"N 100°20'24.0"W

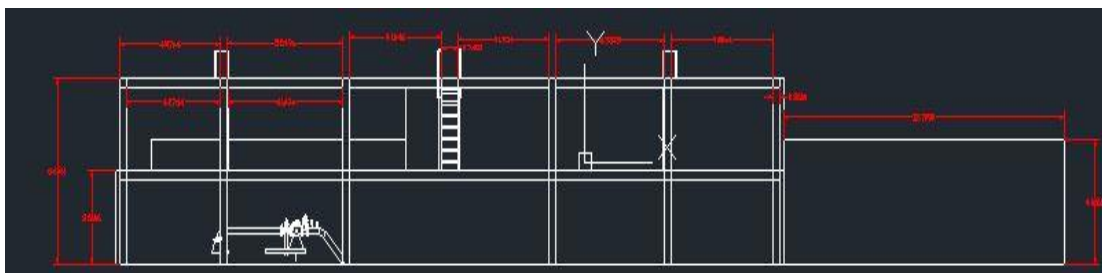
Área	Perímetro
1953.3 m ²	190.19 m



Diseño Infraestructura Verde 3D:



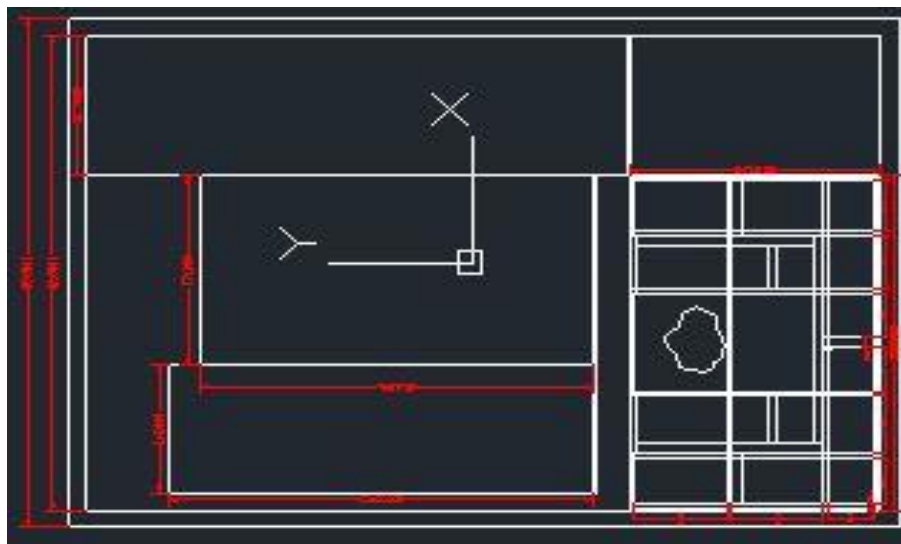
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:



Área Verde	
Techos verdes	1071.8 m ²
Paredes vivas y humedal	1535.2m ²
Total	2607 m²

POZO NUEVA MORELOS

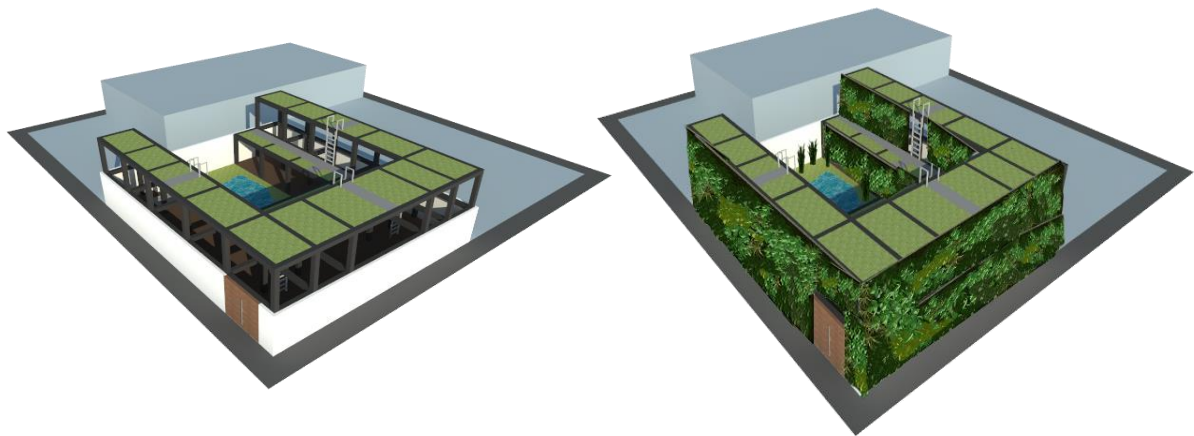
Isla 214-206, Morelos, 64180 Monterrey, N.L.

25°43'08.0"N 100°20'49.2"W

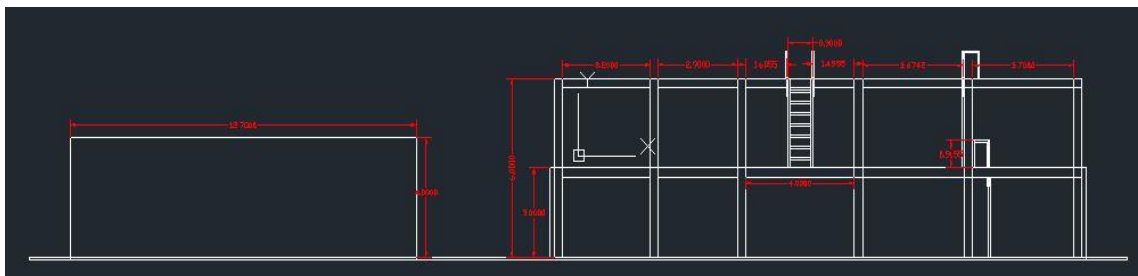
Área	Perímetro
274.91 m ²	88.77 m



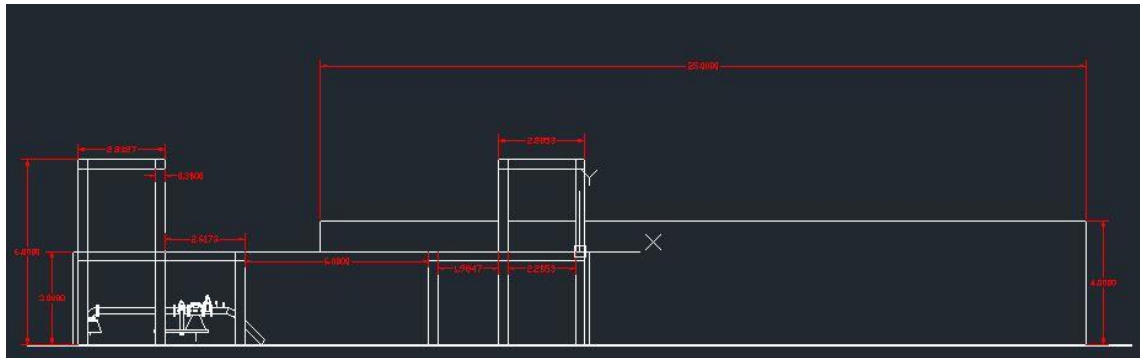
Diseño Infraestructura Verde 3D:



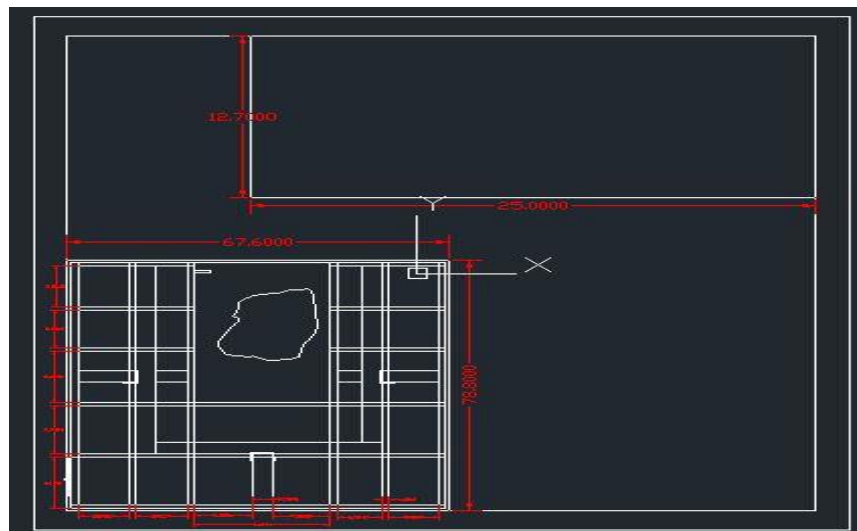
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:



Área Verde	
Techos verdes	255.74 m ²
Paredes vivas y humedal	673 m ²
Total	928.74 m²

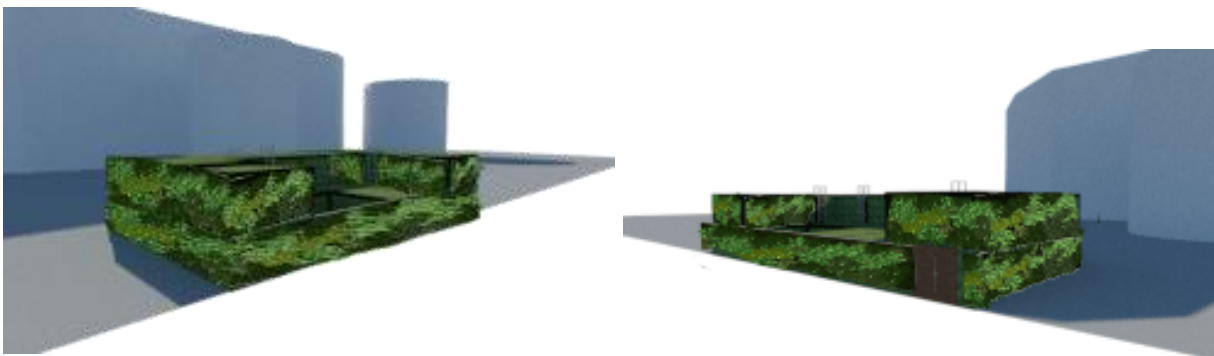
POZO ESTADIO DE BEISBOL

Niños Héroes, Parque Niños Héroes, Monterrey, N.L.
 25°43'09.1"N 100°18'54.0"W

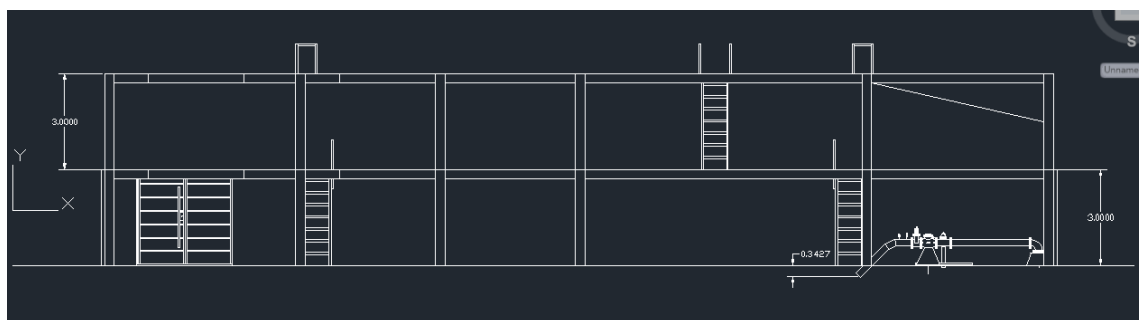
Área	Perímetro
519.15 m ²	97.76 m



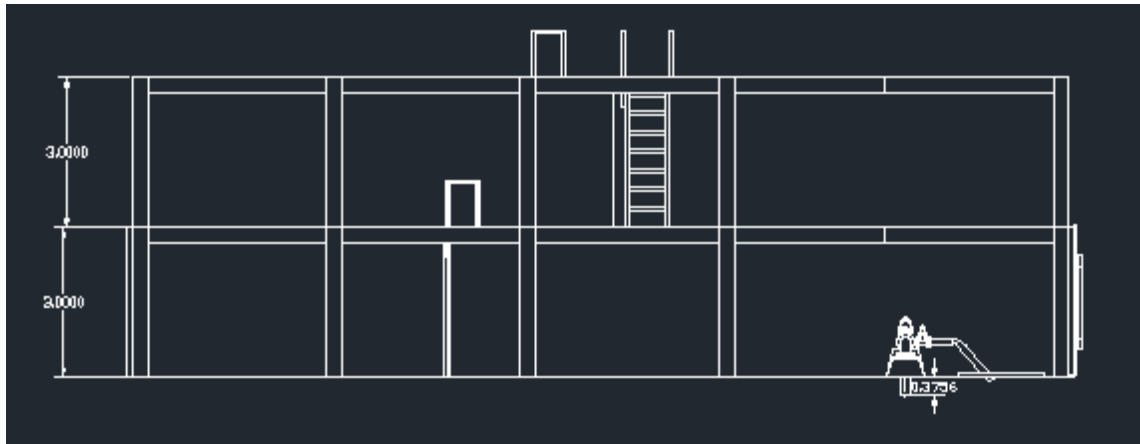
Diseño Infraestructura Verde 3D:



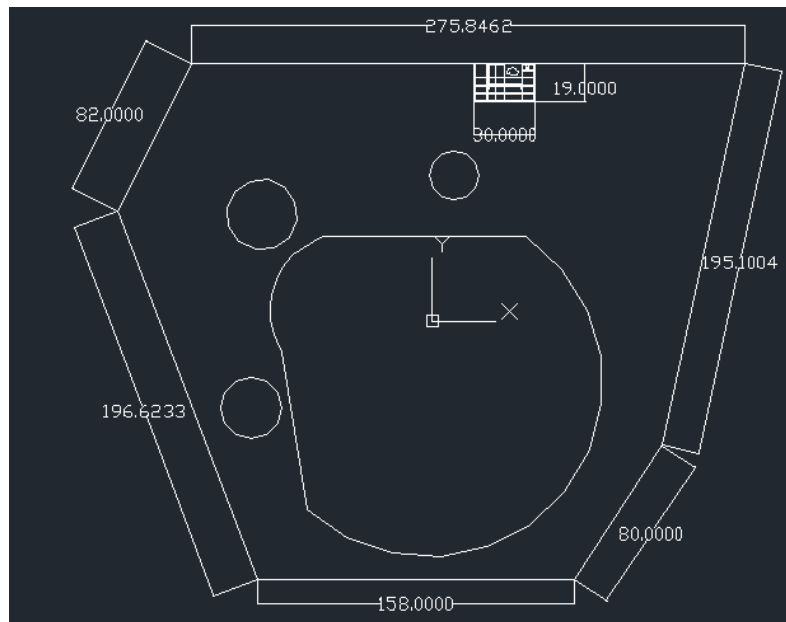
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:



Área Verde	
Techos verdes	511.71m ²
Paredes vivas y humedal	684.3 m ²
Total	1196.01 m²

POZO SORIANA LINCONL

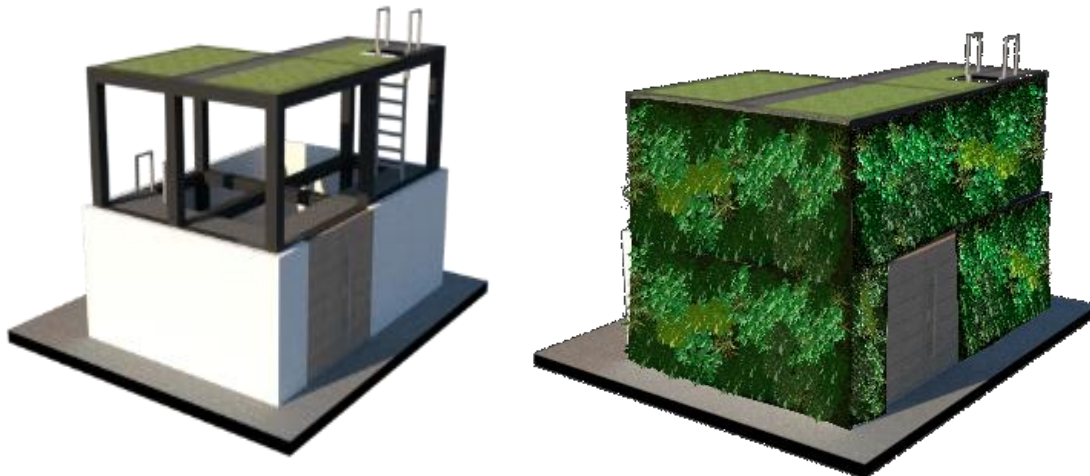
Mitras Nte., 64320 Monterrey, N.L.

25°42'55.8"N 100°20'56.4"W

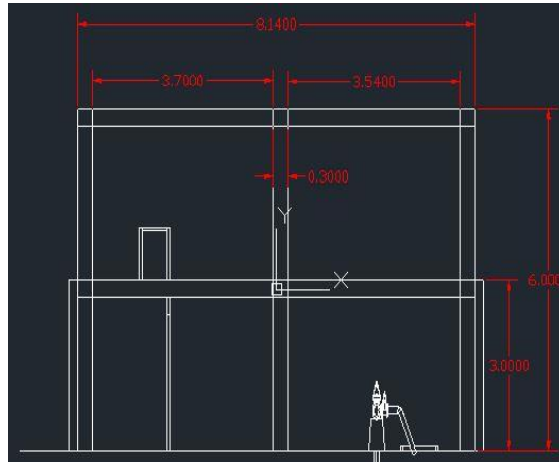
Área	Perímetro
201.29 m ²	65.71 m



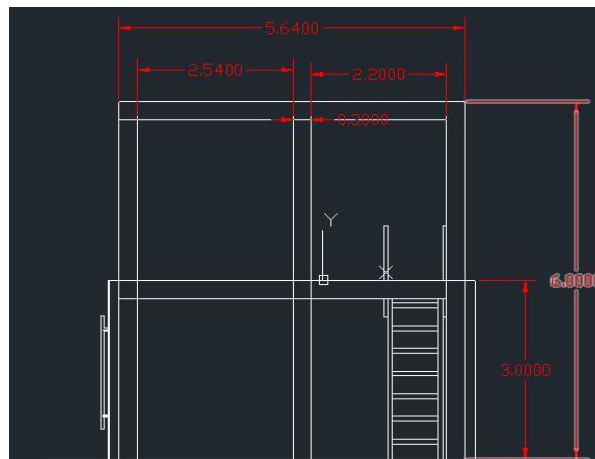
Diseño Infraestructura Verde 3D:



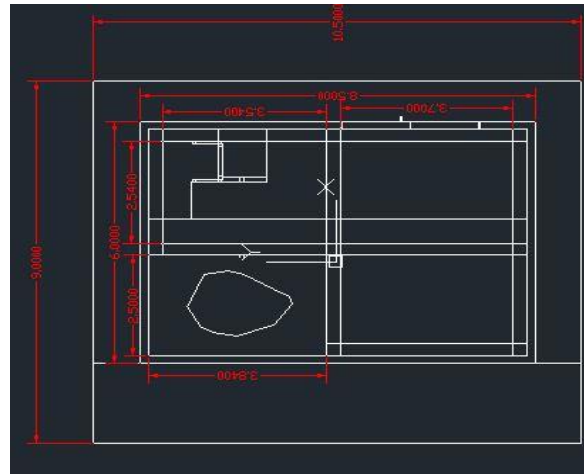
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:



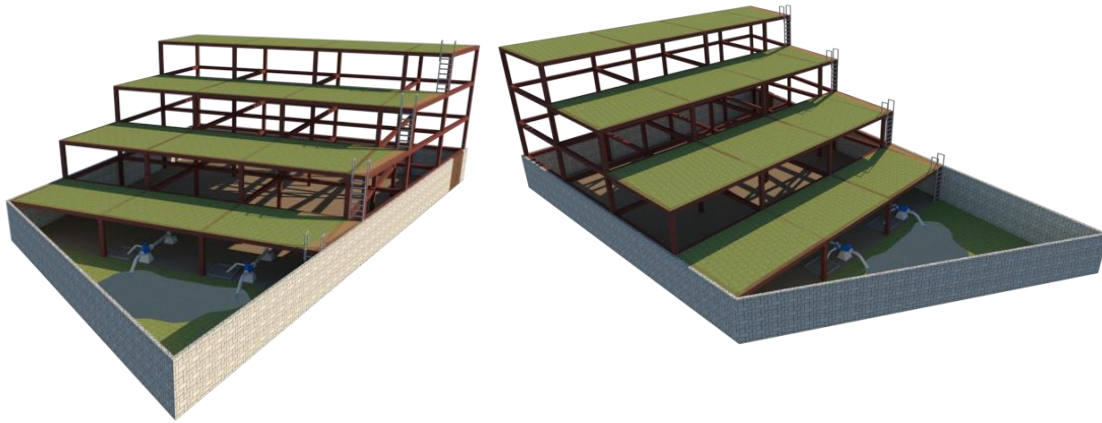
Área Verde	
Techos verdes	230.4 m ²
Paredes vivas y humedal	401.3 m ²
Total	631.7 m²

POZO BUROCRATAS DEL ESTADO Y FEDERALES
 Burócratas del Estado, 64380 Monterrey, N.L.
 25°42'32.0"N 100°21'50.4"W

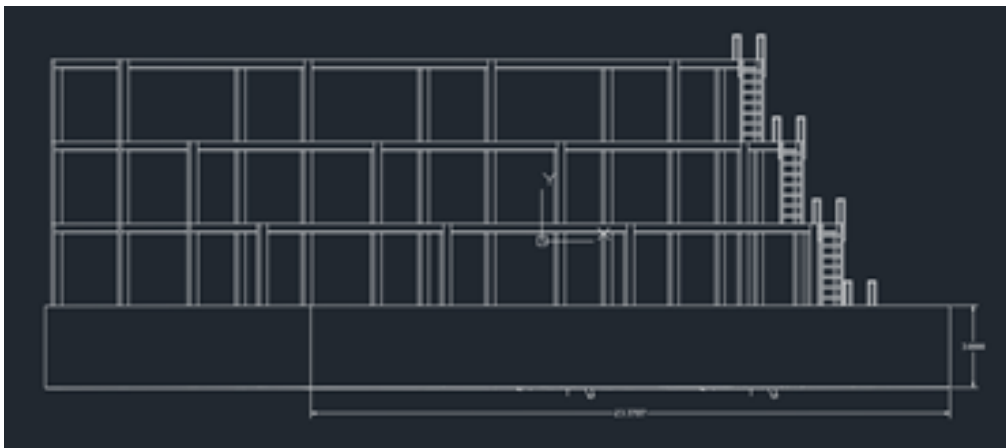
Área	Perímetro
2405.98 m ²	208.3 m



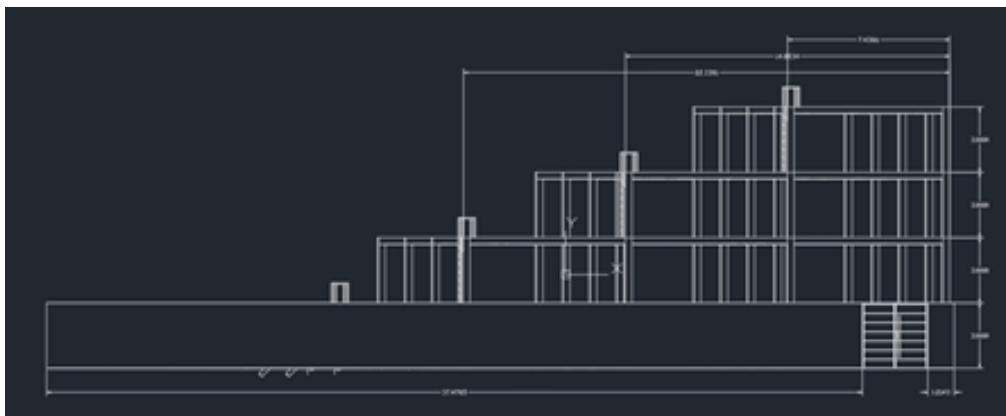
Diseño Infraestructura Verde 3D:



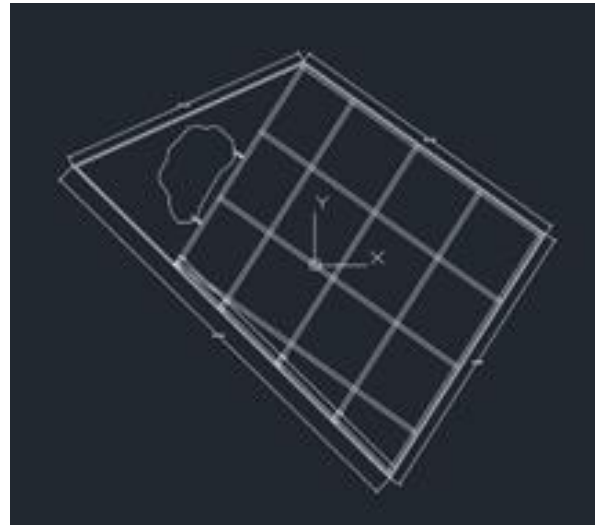
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:



Área Verde	
Techos verdes	792.5 m ²
Paredes vivas y humedal	1885.2 m ²
Total	2677.7 m²

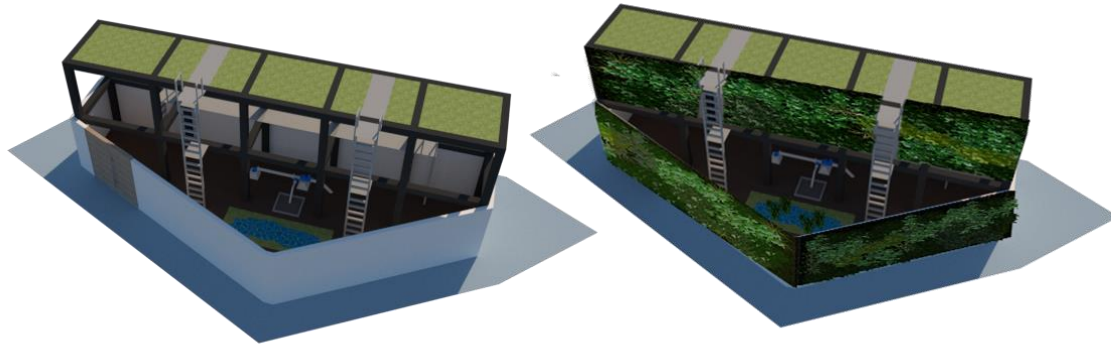
POZO ANTIGUO CAMINO A VILLA DE GARCÍA

Eje Metropolitano 34, Burócratas del Estado, 64380 Monterrey, N.L.
 25°42'40.3"N 100°21'39.6"W

Área	Perímetro
218.75 m ²	62.17 m



Diseño Infraestructura Verde 3D:



Área Verde	
Techos verdes	132.1 m ²
Paredes vivas y humedal	335.9m ²
Total	468 m ²

POZO ABRAHAM LINCOLN 1

Uruapan 3824-3804, Industrial Hab. Abraham Lincoln, Monterrey, N.L.
 25°42'43.2"N 100°21'21.6"W

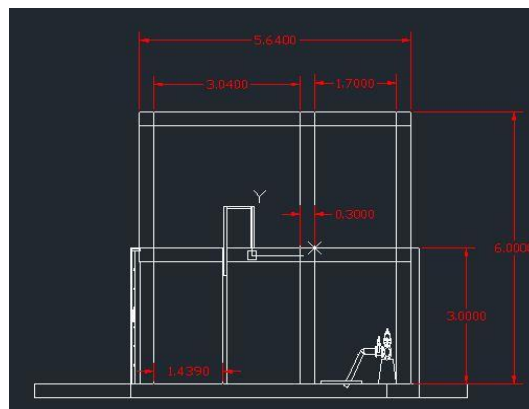
Área	Perímetro
38.74 m ²	13.53 m



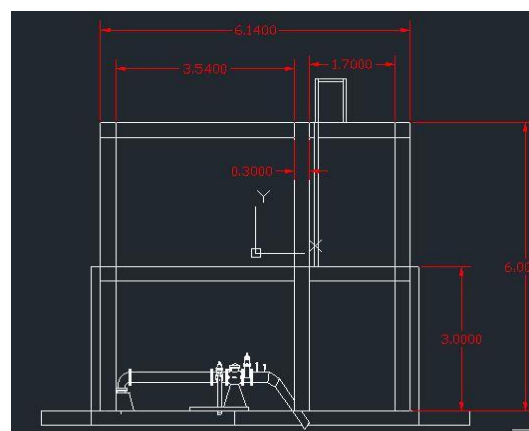
Diseño Infraestructura Verde 3D:



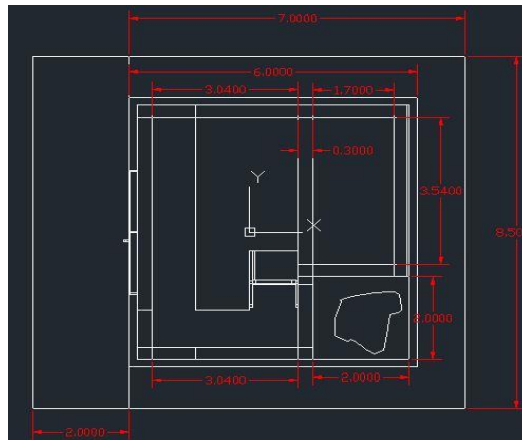
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:



Área Verde	
Techos verdes	75 m ²
Paredes vivas y humedal	135.9 m ²
Total	210.9 m²

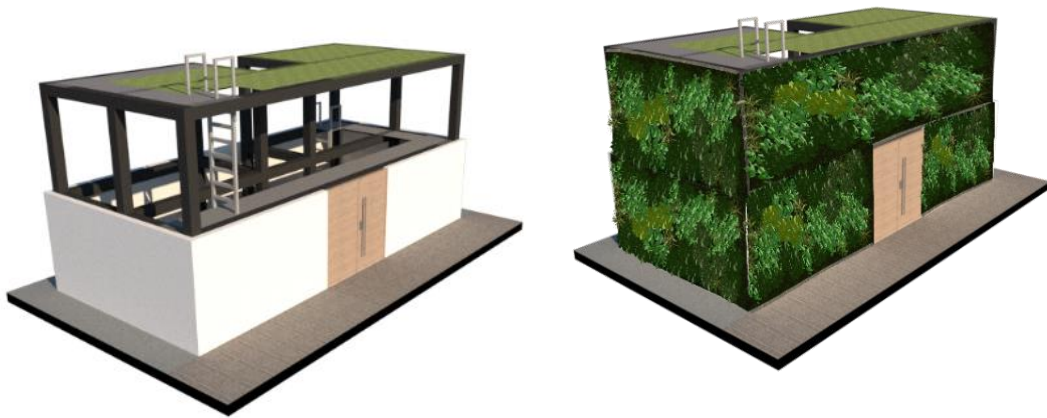
POZO ABRAHAM LINCOLN 2

Ixtapa 525, Mitras Nte., 64320 Monterrey, N.L.
 25°42'40.7"N 100°21'07.2"W

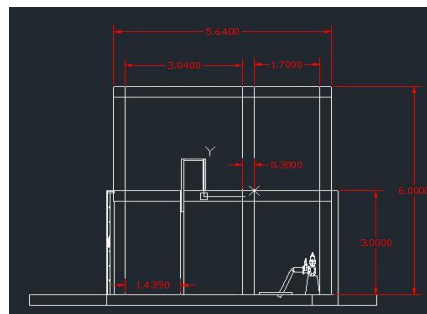
Área	Perímetro
38.74 m ²	223.53 m



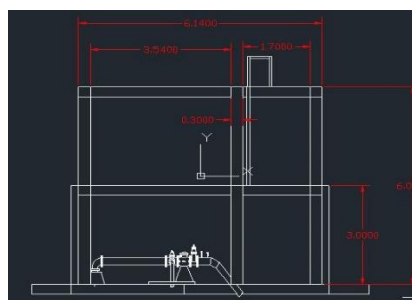
Diseño Infraestructura Verde 3D:



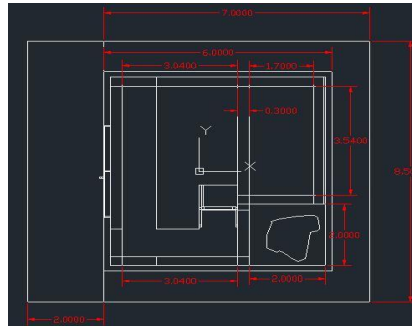
Corte Longitudinal:



Corte Transversal:



Vista En Planta:



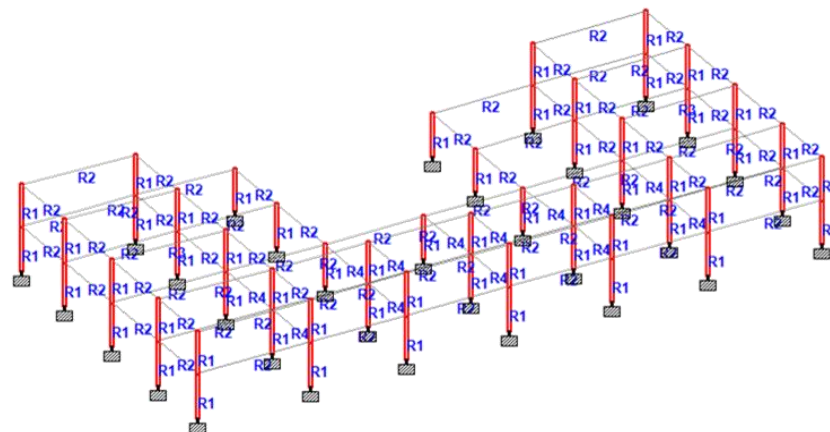
Área Verde	
Techos verdes	75 m ²
Paredes vivas y humedal	135.9 m ²
Total	210.9 m²

APENDICE B

MODELADO ESTRUCTURAL DE POZO TOPO CHICO 4:

Los techos tienen una pendiente de 2%. En el caso de las columnas, todas soportan las cargas propias de un techo verde y sus respectivas capas. Se consideraron cargas muertas de 200 Kg/m para la parte inferior y 150 Kg/m para la parte superior del sistema de infraestructura verde, y unas cargas vivas de 120 Kg/m y de 80 Kg/m, respectivamente.

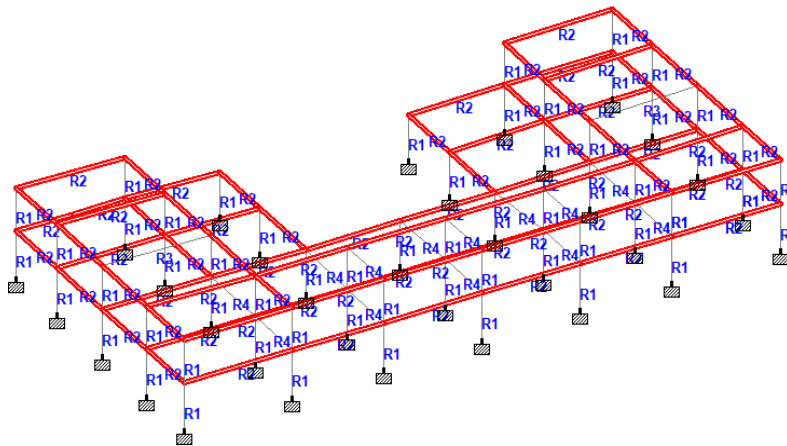
Teniendo un resultado de la modelación donde el modelo de vigas, de columnas y polines pasan positivamente respecto a las cargas con sus respectivos porcentajes.



Sección de las columnas del sistema de infraestructura verde – Pozo Topo Chico 4.

Características de estructura Columna HSS.

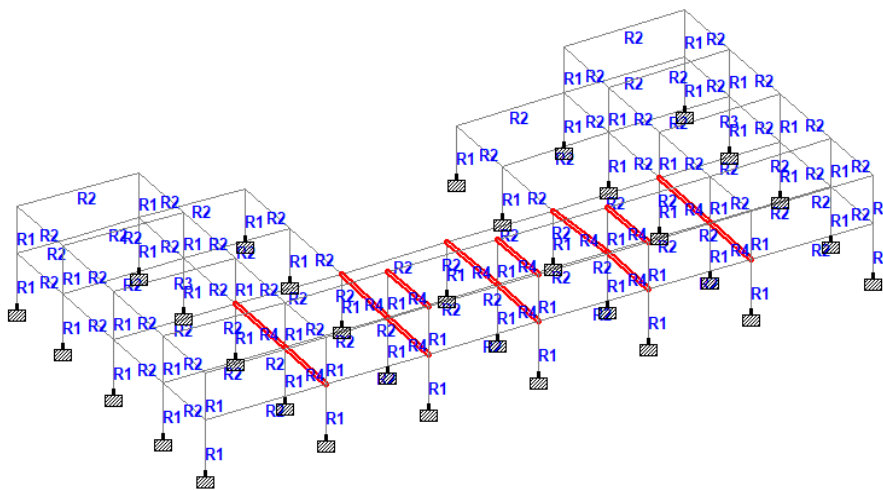
Estructura	Dimensiones exteriores (Pulgadas)	Espesor (Pulgadas)	Peso (Kg/pza)
Columna HSS	6" x 6"	0.187	264



Sección de las vigas cargadoras del sistema de infraestructura verde – Pozo Topo Chico 4.

Características de estructura Viga W.

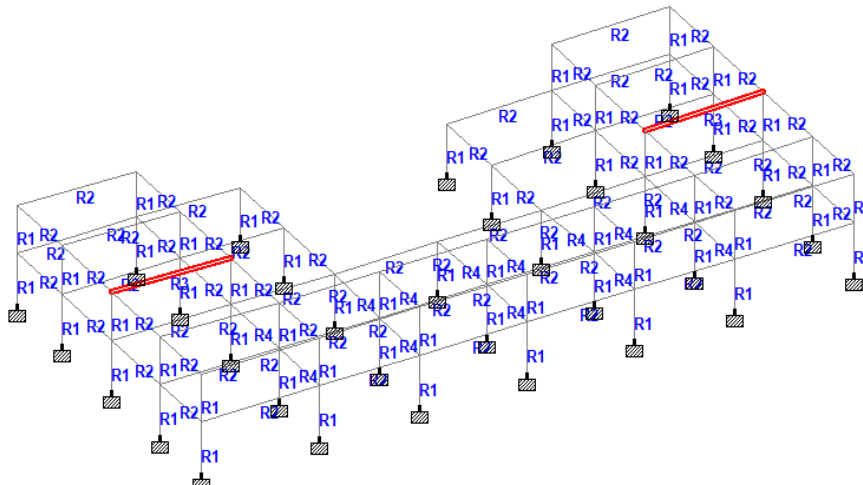
Estructura	Dimensiones exteriores (Pulgadas)	Peso (Kg/pza)	Peralte (Pulgadas)	Ancho del patín (Pulgadas)	Espesor del patín (Pulgadas)	Espesor del alma (Pulgadas)
Viga W	8" x 5 1/4"	26.8	8.14	5.25	0.33	0.23



Sección de los polines del sistema de infraestructura verde – Pozo Topo Chico 4.

Características de estructura Polines HSS.

Estructura	Dimensiones exteriores (Pulgadas)	Espesor (Pulgadas)	Peso (Kg/pza)
Polines HSS	4" x 4"	0.375	314



Sección de las vigas anchas para circulación del sistema de infraestructura verde – Pozo Topo Chico 4.

Características de estructura Viga Ancha W.

Estructura	Dimensiones exteriores (Pulgadas)	Peso (Kg/pza)	Peralte (Pulgadas)	Ancho del patín (Pulgadas)	Espesor del patín (Pulgadas)	Espesor del alma (Pulgadas)
Viga ancha para circulación W	21" x 12 1/4"	150.3	21.36	12.29	0.80	0.50

APENDICE C

DISEÑO DE EXPERIMENTOS CONCENTRACIÓN DE PM10 EN HOJAS:

Para estudiar la deposición de partículas de PM10 en una especie de planta (*Sedum reflexum*) se sometió a un análisis de la superficie de sus hojas mediante un estudio gravimétrico. Se ejecutó un diseño de experimentos factorial 2k de dos niveles para evidenciar los factores que tienen mayor influencia en la capacidad de retención de PM10. Se eligieron los factores que pueden influir en la deposición de partículas de PM10 en las hojas, tales como: la concentración de PM10 en el aire, la humedad relativa ambiental, y la temperatura.

Utilizando el software Statgraphics, se analizó la variable de respuesta.

- Número de factores experimentales: 3
- Número de bloques: 1
- Número de respuestas: 1
- Número de corridas: 20, incluyendo 6 puntos centrales por bloque
- Grados de libertad para el error: 10
- Aleatorizar: Sí

. Factores experimentales.

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
Concentración de PM10	50	75	ug/m ³	Sí
Humedad relativa	30	70	% RH	Sí
Temperatura	10	30	°C	Sí

Respuestas	Unidades
Deposición	gramos por centímetro cuadrado

En la tabla siguiente se observan las estimaciones para cada efecto estimado y las interacciones. Así como el error estándar de cada efecto, el cual demuestra su error de muestreo. Se muestra también que el factor de inflación de varianza

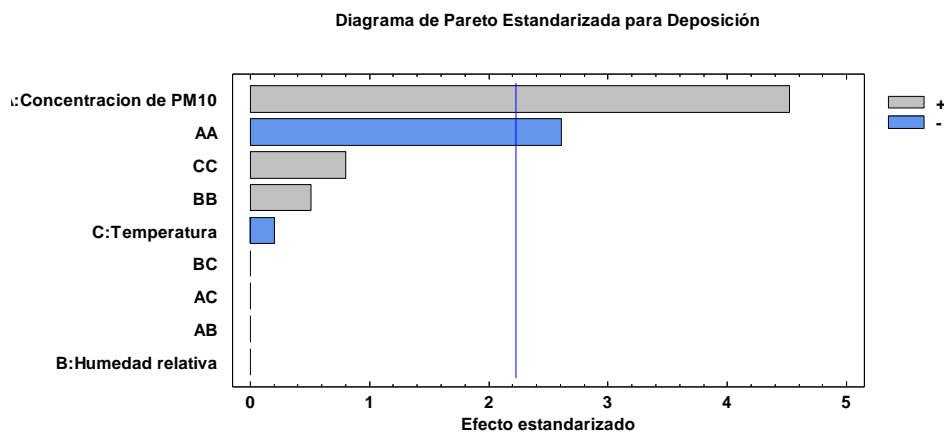
(V.I.F.) más grande, es de 1.01827. En un diseño perfectamente ortogonal, cada factor sería igual a 1. Factores de 10 o mayores generalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Efectos estimados para deposición (g/cm²)

Estimaciones para cada efecto estimado.

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	0.0649077	0.00184386	
A:Concentracion de PM10	0.0110566	0.00244673	1.0
B:Humedad relativa	0.0	0.00244672	1.0
C:Temperatura	-0.000492583	0.00244673	1.0
AA	-0.00621809	0.00238182	1.01827
AB	0.0	0.0031968	1.0
AC	0.0	0.0031968	1.0
BB	0.00120653	0.00238182	1.01827
BC	0.0	0.0031968	1.0
CC	0.00191365	0.00238182	1.01827

Como se observa en el Diagrama de Pareto, la aportación más grande la hacen las interacciones con la concentración de PM10 en el aire.



Interacciones de variables.

La tabla ANOVA evidencia la variación de la Deposición de PM10 para todos los efectos. Es decir que prueba la significancia estadística de cada efecto contrastando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. Para este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, mostrando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%, y se ubican fuera de la zona de aceptación de la hipótesis, entonces, existe al menos una variable que influye la experimentación.

ANOVA.

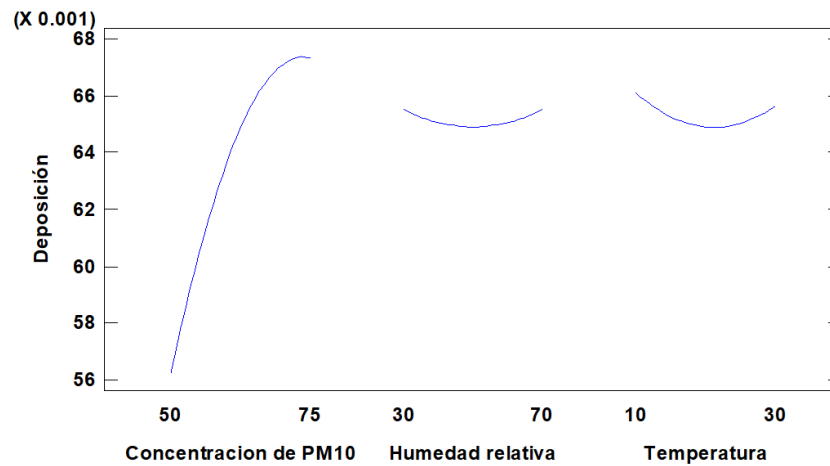
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Concentracion de PM10	0.000417382	1	0.000417382	20.42	0.0011
B:Humedad relativa	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
C:Temperatura	8.28416E-7	1	8.28416E-7	0.04	0.8445
AA	0.000139302	1	0.000139302	6.82	0.0260
AB	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BB	0.00000524469	1	0.00000524469	0.26	0.6234
BC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CC	0.0000131937	1	0.0000131937	0.65	0.4404
Error total	0.000204391	10	0.0000204391		
Total (corr.)	0.00079455	19			

R-cuadrada = 74.2759 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 51.1243 porcentaje%

La siguiente Figura, nos muestra los efectos relacionados a la deposición, los valores estadísticos nos arrojan los efectos de cada sobre la variable de respuesta. Se puede observar que la concentración de PM10 tiene mayor efecto sobre la deposición de partículas. Mientras que la humedad relativa y la temperatura presentan un comportamiento muy parecido.

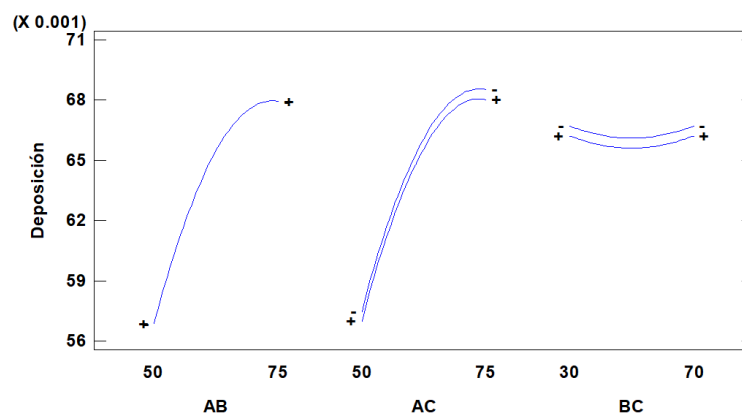
Gráfica de Efectos Principales para Deposición



Efectos sobre variable de respuesta.

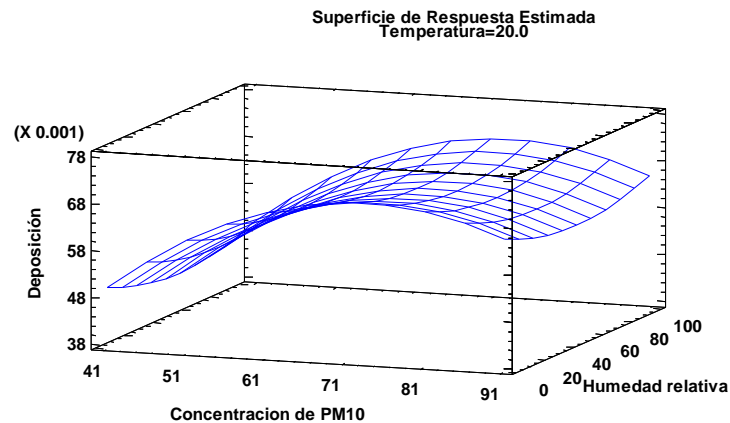
La siguiente figura muestra la interacción entre los efectos para la variable de respuesta. Se puede observar que las interacciones entre los efectos presentan un comportamiento similar. Siendo la interacción AB (Concentración de PM10 y humedad relativa) la que muestra una mayor influencia sobre la deposición de partículas.

Gráfica de Interacción para Deposición



Interacción sobre variable de respuesta

En la siguiente Figura, se puede evidenciar las estimaciones de la variable respuesta que indica la combinación de mayor concentración de PM10 en el aire, mayor humedad relativa y una temperatura de 20°C, se tendría una mejor deposición de partículas en las hojas.



Estimaciones de variable de respuesta.

Conclusión del experimento

En este experimento se utilizaron dos niveles (bajo y alto) para tres factores (concentración de PM10, Humedad relativa y temperatura). La deposición de PM10 en la especie *Sedum reflexum*, es influenciada principalmente por el factor de la concentración de PM10 en el aire. La interacción de factores que logra mayor influencia sobre la variable de respuesta es la de concentración de PM10 en el aire y humedad relativa. En el análisis ANOVA, el único factor que presentó valores menores al valor de significancia (0.05) fue el de la concentración de PM10, por lo tanto, influye fuertemente sobre la deposición de partículas en las hojas de *Sedum reflexum*.