

Elaboración de un biofiltro basado en plantas para la mitigación de material particulado y compuestos orgánicos volátiles (COV) en la Universidad Santo Tomás, sede Calle 51.

Andrés Felipe Garzón Falla

Descripción de prototipo

Dirigido por:

Diana Gisset Vela Aparicio

**Universidad Santo Tomás
Facultad Ciencias Ambientales
Programa de Ingeniería Ambiental
Bogotá D.C**

2026

1. Introducción

El material particulado es un aerosol contaminante compuesto de partículas sólidas y/o líquidas suspendidas en el aire, que solo se puede ver de manera microscópica y que pueden ser fácilmente inhalados introduciéndose al sistema respiratorio e incluso al torrente sanguíneo. Este material particulado proviene de diferentes fuentes de emisión como procesos industriales, obras de construcción, chimeneas, incendios, centrales eléctricas y automóviles. Su formación proviene de emisiones directas resultado de reacciones químicas dentro de sus procesos en las que se generan. (EPA, 2025)

La exposición a material particulado asociados por la cercanía a industrias o vías con tránsito regular de vehículos, genera efectos negativos para la calidad de la vida humana. Estas exposiciones pueden provocar molestias o enfermedades graves generando respuestas como asma agravada, infartos de miocardio no mortales, función pulmonar reducida e incluso muerte prematura en personas con relación a enfermedades cardíacas o pulmonares (EPA, 2026). Incluso, la Organización Mundial de la Salud reconoce la contaminación atmosférica como un factor de riesgo para enfermedades no transmisibles siendo comparable con riesgos como dietas poco saludables y el tabaquismo (World Health Organization, 2021),

En el informe mensual de calidad del aire en cuanto a material particulado, en el mes de febrero del año 2025 de la ciudad de Bogotá se evidenció que los niveles más altos de PM10 se registran en la zona de Carvajal–Sevillana, con un valor de $72.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Móvil Fontibón ($55.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y en PM2.5, los niveles más elevados se encontraron en Carvajal-Sevillana ($35.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y en el punto Kennedy ($22.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$). (Secretaría de ambiente de Bogotá, 2025).

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son sustancias caracterizadas por su alta presión de vapor y baja solubilidad en agua. Muchos de ellos se emplean en la fabricación de pinturas, productos farmacéuticos, grasas, aceites, jabones, pesticidas, productos de limpieza y refrigerantes. Estos compuestos pueden emitirse en forma de gas, líquido o sólido, estos pueden generar efectos adversos para la salud humana. Generalmente, estas concentraciones son más elevadas en ambientes interiores que en exteriores ya que se liberan al momento de usarse, incluyendo en su almacenamiento. (EPA, 2026)

Con base en el estudio de “caracterización de compuesto orgánicos volátiles y material particulado en zonas industriales de Bogotá”, en el que se analiza la exposición a COV’s presentes en la ciudad (Gámez, 2026) menciona la selección de 3 ubicaciones con presencia de olores inofensivos, pero relevantes en su intensidad en el que se elige los siguientes lugares:

- Pensilvania, siendo conocida esta zona por su producción de aceites y grasas vegetales y el procesamiento de jabones con poca presencia de flujo vehicular. Estableciéndose dos puntos en la zona en el que se obtuvieron COV’s un rango de 0.2 a 0.4 ppm en el punto 3 y en el punto 4 un rango de 0.4 a 0.6 ppm

- Salazar Gómez presenta la influencia de una industria para el proceso de chocolates junto a la cercanía a una zona con gran influencia vehicular, en el que se establece un solo punto (punto 5) en el que se presentó COV's en un rango entre 0 a 0.4 ppm en el lugar.
- Sevillana, esta es una de las zonas más destacadas por su mala calidad del aire por alto tránsito de vehículos esto debido a el cruce de dos vías importantes de la ciudad de Bogotá siendo la avenida sur y la avenida Boyacá, además de que la zona se presenta con una gran cantidad de industrias cercanas con diferentes enfoques de procesos como de grasas, aceites y/o detergentes en el que se basó en dos puntos de la zona industrial obteniendo un rango en el punto 1 entre 0.2 a 0.4 ppm y en el punto 2 un rango entre 0.6 a 1.2 ppm siendo el rango con mayor concentración.

Las altas concentraciones de material particulado que se presentan de manera continua en estos puntos de la ciudad de Bogotá, afectan directamente a los ciudadanos de estas zonas por lo que se debe encontrar una forma que favorezca a la disminución de material particulado en el lugar y pueda tratar estos tamaños de partícula presente. Se plantea la elaboración de un biofiltro a base de plantas ya que este ofrece una alternativa renovable que ayuda a la filtración y limpieza de contaminantes atmosféricos presentes.

La biofiltración botánica es una combinación de la biofiltración y la fitorremediación, en la que una corriente de aire o agua contaminada atraviesa un biofiltro con alta actividad biológica. Este sistema se maneja con el ingreso de los contaminantes que son removidos mediante procesos biológicos llevados a cabo por los microorganismos y por la interacción de las plantas con los microorganismos presentes en la rizosfera o solo por la misma planta. (Soreanu et al., 2013).

Algunas plantas comunes y/o ornamentales de la sabana de Bogotá como Hiedra común (*Hedera hélix*) y Lengua de suegra (*Sansevieria trifasciata*) pueden usar en la biofiltración botánica. Por parte de la hiedra común, se usa en la incorporación para entornos urbanos que ayuden a mitigar la contaminación por material particulado cercano a vías principales, siendo usados como muros en el que se determina bajo un estudio que demuestra que es excelente para adherir material particulado en el que atrapa grandes cantidades en entornos con alto tráfico. (Sternberg et al., 2010).

Hiedra común (*Hedera hélix*) ha demostrado una alta capacidad de remoción de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y material particulado en diferentes estudios experimentales. En entornos laborales, se ha presenta la eliminación del 100% de benceno y tolueno a concentraciones de 250 ppm en un periodo de 5 a 6 días (Fooladi et al., 2025). Asimismo, se ha evidenciado una tasa de absorción de $0.85 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{cm}^{-2}$, con eficiencias de remoción de benceno entre el 80% y 85% en 72 horas, destacándose una mayor captación en condiciones de luz debido a la apertura estomática, lo que favorece el ingreso de contaminantes a la planta (Gong et al., 2019).

En cuanto al material particulado, el “estudio de la respuesta de las lianas al estrés hídrico y evaluación de su potencial de remediación atmosférica mediante diferentes modelos experimentales” (Hanus-Fajerska et al., 2025) menciona como uso de la planta *Hedera hélix* que actúa como un captador superficial de partículas acumuladas en la parte superior de sus hojas. La investigación realizada en la ciudad de Cracovia clasifica los diferentes tamaños de las partículas recolectadas, en el que se desarrolló bajo condiciones de muestreo tanto diurnas como nocturnas, considerando ubicaciones dentro de la ciudad y en sus zonas aledañas. Como resultado, se obtuvo una categorización del material particulado en función del tamaño esta presenta una acumulación en la parte superior de su hoja como un captador de partículas, a partir del total acumulado siendo de:

- PM10-100 oscilando entre aproximadamente el 50% y más del 70% de acumulación
- PM2,5-10 contribuyó con un 19-37%
- PM0,2-2,5 represento entre un 6 a 11% del PM total que acumulo en el periodo que estuvo expuesto en la ciudad.

Estos resultados evidencian el potencial de *Hedera hélix* como especie adecuada para la mitigación de contaminantes atmosféricos en ambientes urbanos e interiores y la funcionalidad de captación de material particulado.

La *Hedera hélix* evidencia que las condiciones de riego e iluminación influye en su eliminación de PM2.5. En situaciones de estrés hídrico las estomas tienden a cerrarse e incluso generar otras funciones adaptativas como la generación de cera y rugosidad, favoreciendo su captura material particulado y COVs depositándose en la superficie de la hoja, mientras que en la luminosidad no afecta en su proceso de eliminación ya que se genera una remoción de manera superficial de la hoja por lo que la luz no mejora su adsorción. (Choi, Y. K et al., 2021)

Adicionalmente, el PM2.5 y COV's fueron removidos por la filtración por el suelo y la absorción por los microorganismos en el suelo teniendo porcentajes de remoción del total de 8.8 a 10.4% en PM2.5 y 2.5 a 39.1% en COVs. (Choi, Y. K et al., 2021)

En el aprovechamiento de absorción de COVs en la hiedra hélix, se usa como referencia el estudio “Evaluación de la respuesta de *Hedera hélix* en ambientes contaminados mediante técnicas de investigación avanzadas transversales” en el que explica la respuesta de la planta ante un aire rico en tolueno en el que su modo de absorción se genera por medio de la cutícula e incluyendo un aumento de metabolismo cuando se enfrenta a un factor abiótico. (Lisa, G. et al., 2025)

En el estudio se resalta que la planta *Hedera hélix* no presenta mecanismos para tratar el material particulado y a su vez restringe el ingreso al interior de la planta esto debido a que produce una mayor cantidad de cera en su exposición lo que genera una limitación. (Chatterjee, S. et al., 2024).

En caso de que se ingrese material particulado en de las estomas, se pueden generar obstrucciones de manera física dentro de ella y las partículas finas que logren ingresar de manera interna estos pueden afectar con el intercambio de gases, la fotosíntesis, el almacenamiento de agua, la respiración y desarrollo de la planta. (Chatterjee, S. et al., 2024)

La lengua de suegra (*Sansevieria trifasciata*) fue estudiada en la mitigación de compuestos y material particulado generados por el humo de cigarrillo a partir de un diseño experimental de duración total de 30 días, estructurado en ciclos compuestos por 6 días de exposición a los contaminantes seguido de 1 día de recuperación en un espacio de 24m³, obteniendo como resultados en material particulado la remoción en un rango de 140 a 250 µg/m³, en PM1, 147 a 257 µg/m³ en PM2.5 y PM10 con 212 a 455 µg/m³. En cuanto a la remoción de compuestos orgánicos volátiles, se encuentra el formaldehído con un rango de 46% a 69% y acetona con 31% a 61%, agregando la importancia de una distancia preestablecida de 240 cm y 315 cm como óptimas la remoción de PM2.5 y PM10. Estos resultados respaldan el potencial de la especie en la mitigación de COVs y material particulado en ambientes interiores (Permana BH et al., 2022).

La lengua de suegra contiene en su cera cuticular ácido hexadecanoico, el cual desempeña un papel importante en su proceso de adsorción de compuestos orgánicos volátiles. Debido a que es un compuesto graso, los compuestos no polares como el tolueno y el etilbenceno se adhieren con mayor facilidad, además, se resalta que la mayor de su eliminación no está asociada por el número de estomas. (Sriprapat et al., 2014).

Esta planta también presenta capacidad de absorción a través de sus estomas logrando un 89.5% de disminución de CO. Este estudio explica los factores para realizar una buena absorción teniendo una apertura estomática, buena densidad de las estomas y el tamaño de las estomas en el que la lengua de suegra cumple al tener estomas grandes.

La lengua de suegra es una planta CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas), funcionando de mejor manera de noche esta optimiza su intercambio gaseoso adaptándose a condiciones con poca agua, abriendo sus estomas y en ese momento es donde se produce su mayor capacidad de absorción de CO. (Iswoyo, H et al., 2023).

Los gases tóxicos como el CO que ingresan al sistema metabólico al interior de la planta son enviados a las raíces y desintoxicados por microorganismos usando glucósido de pregnano, que es un mecanismo de defensa contra los factores de estrés ambiental de la lengua de suegra, formando el CO en ácidos orgánicos, aminoácidos o azúcares (Tahir y Sitanggang, 2008).

Considerando lo anterior, se propone la elaboración de un biofiltro basado en Hiedra común (*Hedera hélix*) y Lengua de suegra (*Sansevieria trifasciata*). Esta propuesta se plantea como una etapa preliminar para la comprobación de funcionamiento de las plantas, por lo que se

busca realizar la evaluación bajo condiciones de menor concentración, antes de implementarse en un entorno con condiciones con mayor exigencia.

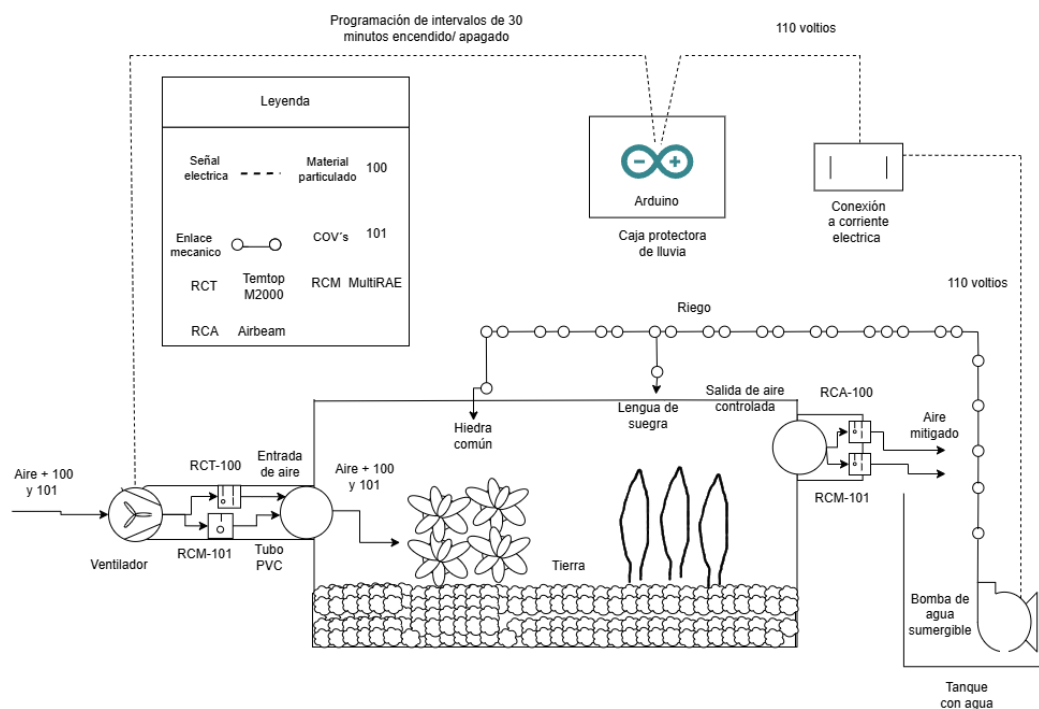
2. Objetivo general

- Evaluar la capacidad de un biofiltro basado en las especies *Hedera hélix* y *Sansevieria trifasciata* para reducir las concentraciones de material particulado (PM10 y PM2.5) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en el entorno de la sede Calle 51 de la Universidad Santo Tomás.

3.1 Descripción del sistema

Figura 1

Diagrama descriptivo del biofiltro.



El diseño de un biofiltro basado en especies como plantas ornamentales es una alternativa renovable en el que ayuda a la filtración y limpieza de contaminantes atmosféricos por medio de plantas que logren disminuir exposiciones a contaminantes presentes. El biofiltro consiste con una formación de cubo de una altura, largo y ancho de 50 cm, hecho de material de plástico acrílico con un grosor de 5mm en sus paredes y con base de 1 cm. El biofiltro contiene:

- Ingreso de aire por medio de un ventilador de 11 cm de diámetro con un caudal de 0.06842 m³/s a tiempos de 24 horas diarias por intervalos de 30 minutos.
- Tubo de PVC del diámetro del ventilador y una longitud de 30 cm, diseñado para estabilizar el flujo de aire y permitir mediciones de material particulado y COVs, con un puerto de muestreo para la inserción del sensor.
- Bomba sumergible con fuerza máxima de 1200 L/h y altura máxima de potencia de 2 metros en el que se ajusta la potencia al mínimo para su debido riego junto a un tanque con agua.
- Dos tipos de plantas estudiadas en espacios cerrados: Hiedra común (*Hedera hélix*) y Lengua de suegra (*Sansevieria trifasciata*) siendo expuestos a un ambiente afectado en el que trataran el material particulado y los COVs presentes.
- Abertura cuadrada de salida controlada de aire con dimensiones 11*11 centímetros para el ingreso de equipos de medición.

Imagen 1

Vista general del biofiltro construido realizando mediciones



Punto de salida



Punto de entrada

3.2 Requisitos

- Se estableció un lugar con presencia de material particulado y/o compuestos orgánicos volátiles en un espacio abierto en el que inicialmente se realiza una prueba preliminar para comprobación de concentración presente. Para una buena medición, esta puede incluirse en un espacio intramural y extramural.
- Se adecuó el prototipo en el entorno establecido con cercanía a conexión eléctrica para el debido funcionamiento del ventilador y el motor de agua.
- Disponibilidad de uso de agua para el debido riego de plantas, usando un contenedor para el almacenamiento de agua.
- Protección de ingreso de agua en las conexiones Arduino ya que esto provocaría un corto circuito o un fallo en la programación.
- Se comprobó fuerza del motor por aparte para ser ajustada a su mínima potencia y ser puesta en el sistema de riego.
- Se debe de tener en cuenta el funcionamiento del ventilador cumpliendo sus espacios de 30 minutos de intervalo, se debe de asegurarse que no existan filtraciones de aire en el biofiltro.
- Asegurarse de que no existan escapes de aire en el biofiltro en las entradas, salidas y en el mismo espacio de las plantas ya que esto afectaría las mediciones.
- Mantener las plantas en una zona sombra ya que las plantas presentan afectaciones con largos periodos de tiempo al sol directo.

4 Elección del lugar para respectiva medición

Se eligió la carrera 13 con calle 52 (Centro de atención psicológica IPS) apuntando hacia el occidente con una distancia de 8 metros entre avenida y punto de captación del biofiltro, con presencia de edificaciones en su alrededor de más de dos pisos, cuenta con una cercanía de 64 metros a el semáforo en la calle 51 con carrera 13 en el que permanecen los vehículos para el paso peatonal para nuevamente arrancar y seguirse movilizand, además, se elige este punto para medición debido a la facilidad de permanencia en un lugar seguro perteneciente a la universidad, a su vez se comporta como vía alternativa en sentido norte- sur ya que en la zona se presentan afectaciones por obras de la primera línea del metro sobre la vía principal carrera 14 o Avenida Caracas (Movilidad de Bogotá, 2025).Asimismo se presenta una gran carga vehicular en la carrera Séptima siendo otro eje importante del tránsito de la ciudad junto con la carrera 11 en el que se presenta mala calidad del aire en material particulado ultrafino o Black Carbon. (Segura-Contreras Julián F y Franco Juan F., 2015.) dando así una carga vehicular representativa en la evaluación de contaminantes atmosféricos y la instalación del biofiltro.

Se realizan varios muestreos preliminares los días 16 abril en un horario entre 3:11 pm a 3:41 pm y 4:36 a 5:05, 20 de abril de 11:35 am a 12:49 pm en el lugar para la confirmación de material particulado proveniente de la carrera 13 y en COV's se recopiló los datos obtenidos

en entrada ya que esas mediciones vienen del aire sin tratar que está anterior al biofiltro, por lo que los siguientes datos fueron conseguidos del punto establecido.

Tabla 1

Resumen de los datos obtenidos de las pruebas preliminares y recopiladas en COV's de las entradas del biofiltro

	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	COV's ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Máximo	73.33	46	0,58
Mínimo	3.66	3.33	0
Promedio	11.61	10.67	0,13

Nota: No se realizaron mediciones de COV's al mismo tiempo que las pruebas preliminares de PM, ya que no se contaba con el acceso al equipo en esos momentos.

Se usa de referencia las mediciones obtenidas previamente en la avenida Calle 13 #65-21 siendo el punto 5 del documento, que tiene una movilidad de tránsito relativamente parecido al del sitio escogido en el trabajo y obtuvo las siguientes mediciones, en el que solo se registran máximos y mínimos. (Gámez, 2026)

	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	COV's ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Máximo	10	8	0.4
Mínimo	5	3	0

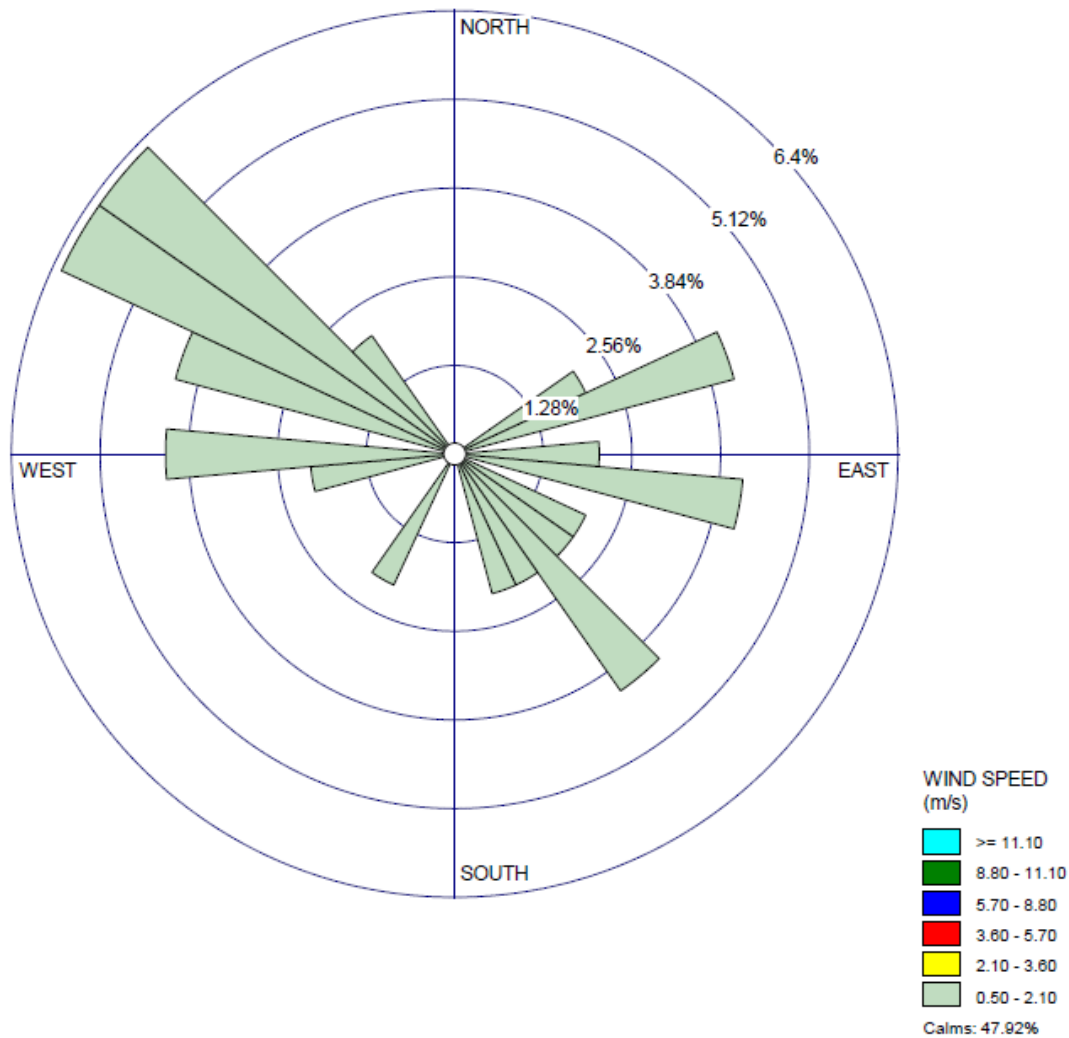
Nota: Tabla realizada a partir de los datos obtenidos del trabajo realizado por Gámez

Se refleja una condición de resultados de rangos superiores en material particulado, en cambio en COV's se presentan mediciones cercanas a las del punto escogido, por lo que se selecciona el punto escogido ya que presenta una concentración que puede ser usada para un periodo de prueba por parte del biofiltro de manera experimental, para tener conocimiento si el sistema logra mitigar la concentración.

Se realiza una recolección de datos de dirección de viento a partir de los días 16 de abril y 20 de abril en el que se realizaron las mediciones preliminares del lugar, cabe resaltar que estos datos fueron extraídos de la estación móvil de la Séptima ya que no se presenta otra estación de calidad del aire cercana al punto a tomar, cuyos resultados fueron los siguientes:

Figura 2

Rosa de vientos durante las mediciones preliminares en la estación móvil la séptima.



Se observa una predominancia de viento hacia la parte noroeste con un cercano 6.4% y se ve reflejado una segunda predominancia hacia el sentido sureste con presencia de vientos muy bajos permaneciendo en el rango 0.5 m/s a 2.1 m/s con bastante porcentaje de vientos en calma o que no se logró cuantificar en el lugar por lo que sugiere que en el entorno escogido tendría vientos de muy poca fuerza, de manera que hay poca dispersión del material particulado.

5 Preparación de las plantas

Las plantas se riegan con agua del grifo y después con agua destilada para la remoción de particuladas adheridas en sus hojas, se separan en espacios diferentes debido a que se tiene un tiempo de riego diferente de una a otra ya que el riego de la lengua de suegra en caso de que se presente en la tierra sequedad y al escarbar un poco siga con falta de agua, se procede a regar siendo cada 3 semanas sus periodos de riegos, mientras que la hiedra común se riega cada 2 a 3 veces por semana en temporada de bastante sol o en caso de que se presente una tierra seca se procede a regar.

La lengua de suegra no resiste fuertes heladas por lo que se debe permanecer en un rango de temperaturas entre 21 a 25°C siendo esta la más óptima tanto en temperatura en suelo como en aire. (La Malfa et al., 1988), mientras que la *Hedera hélix* se mantiene en una temperatura media diaria de 24 ± 4 °C, sin embargo, tiene una mayor resistencia a las heladas por lo que no se vería gravemente afectada. (Pollet et al., 2009).

Se determina realizar un riego a las plantas de manera semanal con 4 litros de agua establecida de manera empírica observando todo el biofiltro tenga la tierra húmeda, esto para su función vital y la no generación de polvo debido a la sequedad en la tierra y el ventilador encendido lo que podría aumentar en material particulado en la salida, afectando las mediciones esperadas.

6 Operación del sistema

6.1 Arranque del sistema

Inicio de flujo de aire por intervalos de media hora en el que las plantas se exponen bajo un periodo de adaptación de una semana: para las siguientes semanas se extraen resultados bajo exposición de material particulado y COVs presentes en el lugar, por lo que se debe tener en cuenta posibles afectaciones en sus hojas, enfermedades o plagas.

6.2 Seguridad

Se realiza una verificación del funcionamiento en el que no se generen escapes de aire por los alrededores del cubo, generación de un cortocircuito, comprobación de intervalos de tiempo del ventilador y en caso de inicio de sistema de riego, la confirmación de un buen flujo y adecuado a la planta correspondiente y a su vez detectar un posible goteo en la estructura, ya que esto podría afectar con las mediciones y de la mitigación realizada por las plantas.

7 Monitoreo y medición

7.1 Equipos y parámetros de medición

Los parámetros para evaluar incluyen las concentraciones de entradas y salidas de material particulado y COVs, mientras que el flujo de aire tanto en entrada y salida del sistema y tiempo de retención de los gases en el biofiltro solo se realizó en la primera semana.

El material particulado PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀ se midió en la salida del biofiltro con el equipo Airbeam, que registra los datos a través de la aplicación Aircasting, mientras que el Temtop M2000 se usó para registrar el material particulado entrante en PM_{2.5} y PM₁₀. Al mismo tiempo para la medición de COVs se usó un detector de gases MultiRAE, que mide la concentración de gases por medio de sensores específicos para oxígeno, amoníaco, sulfuro de hidrógeno y COVs.

Estas mediciones permitirán determinar la eficiencia de remoción de material particulado y COVs del sistema que se registrarán por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Concentración entrada} - \text{Concentración salida}}{\text{Concentración entrada}} * 100 = \% \text{ Remoción}$$

Y se verifican por medio de la prueba de t en caso de ser dos grupos de medidas con un porcentaje de confianza del 95% la siguiente formula:

$$t = \frac{\bar{d}}{\frac{sd}{\sqrt{n}}}$$

t= Estadística de la prueba t

sd= Desviación estándar de las diferencias

d= Media de las diferencias entre cada par de observaciones

n= Número de pares de observaciones.

Los registros de concentración se realizaron en un periodo de 2 horas establecidas de 3:00 PM a 5:00 PM o 4:00 PM a 6:00 PM por medio del equipo Airbeam, Temtop y MultiRAE. Este último equipo tuvo una rotación de 10 minutos entre entrada y salida al realizarse en un periodo de 2 horas y se realizaron 6 mediciones de entrada y salida que luego se promediaron por día por lo que sus datos pueden ser menor a la resolución que tiene el equipo. Los equipos recopilan la información registrada con una frecuencia de 1 minuto almacenando el valor promedio de las mediciones obtenidas en ese intervalo, a excepción del Airbeam que se promedió sus datos para igualarlos a los demás equipos.

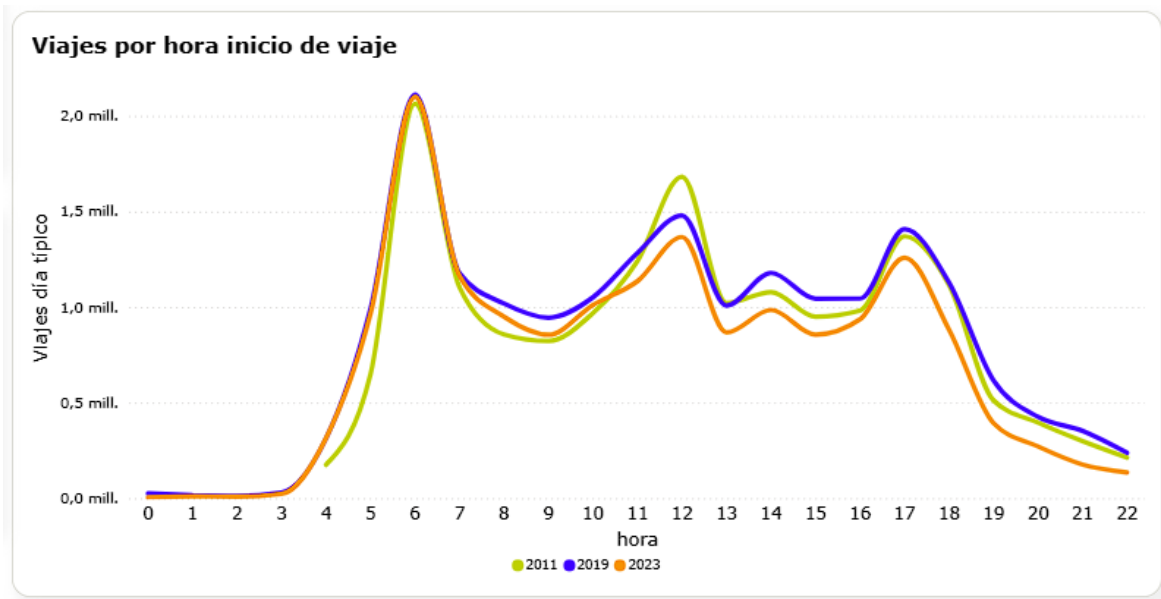
Se recopilan los datos de entrada antes del biofiltro por lo que el aire que ingresa y se capta en la entrada es totalmente sin tratar y en la medición de salida que esta después del biofiltro ya se ven los resultados afectados posiblemente por la presencia de las hojas de las plantas.

7.2 Hora de medición

El horario de medición de material particulado y compuestos orgánicos volátiles se estableció dependiendo del nivel de tránsito del lugar seleccionado, de acuerdo con la movilidad de tránsito acordadas hora pico y hora no pico (Fig. 3), definidas por la encuesta de movilidad de la ciudad de Bogotá del año 2023. La hora pico está representada por los picos de automóviles activos transitados en la hora del día en el que se realizaran una medición en la jornada.

Figura 3

Viajes día típico por hora en los años 2011, 2019 y 2023 realizado por el observatorio de movilidad de Bogotá.



Las mediciones realizadas se realizaron en un periodo 2 horas de lunes a viernes en los que se clasifica la información en base a la hora del día, establecida como hora valle en un periodo entre (3:00 PM a 4:29 PM) y la hora pico en un periodo (4:30 PM a 6:00 PM) referenciándonos de los viajes día típico del año 2023 realizado por el observatorio de movilidad de Bogotá siendo hora valle viajes día típico menores de 1 millón y hora pico viajes día típico mayores a 1 millón de vehículos. Cabe resaltar que las mediciones se hacían en un periodo de medición entre 3 a 6 PM, con una duración de 2 horas por lo que se podrían hacer 3 a 5 PM y 4 a 6 PM.

8 Resultados

8.1 Caudal

Se realizó mediciones de caudales tanto de entrada y salida en el que se mide el diámetro para hallar el área y la velocidad siendo importantes para el cálculo del caudal.

$$\text{Área de entrada circular} = \pi r^2$$

$$\text{Área de entrada} = \pi * (5.5 \text{ cm})^2 = 95.0332 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área de entrada} = 0.00950 \text{ m}^2$$

$$\text{Área de biofiltro con espacio de tierra} = 35 \text{ cm} * 50 \text{ cm} = 1750 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área de biofiltro con espacio de tierra} = 0.175 \text{ m}^2$$

$$\text{Área de salida cuadrada} = L^2$$

$$\text{Área de salida} = (11 \text{ cm})^2 = 121 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área de salida} = 0.0121 \text{ m}^2$$

Se realizaron varias mediciones de velocidad de entrada y salida del sistema. Tanto en la entrada y salida se efectuó las mediciones en diferentes puntos de la sección transversal (Centro, arriba, abajo, izquierda y derecha) para así tener un resultado promediado por medio del anemómetro cuyos resultados obtenidos fueron:

Tabla 2

Velocidad de entrada y salida

Velocidad de entrada (m/s)	Velocidad de salida (m/s)
9.3	2.0
6.8	1.3
7.9	1.0
5.4	0.8
6.6	1.5
Promedio= 7.2	Promedio= 1.32

Se obtiene resultados variados, esto debido a que se realizaron las mediciones en lados diferentes por lo que se refleja en que lados recae más el flujo del aire

Se sigue la ecuación:

$$\text{Caudal} = \text{Velocidad} * \text{Area}$$

$$\text{Caudal de entrada} = 7.2 \text{ m/s} * 0.00950 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal de entrada} = 0.06842 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Caudal de salida} = 1.32 \text{ m/s} * 0.0121 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal de salida} = 0.01597 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se evidencia una retención de aire por el biofiltro, la tierra, la expansión de un diámetro de 11 cm a un espacio cubico de 50 cm*35 cm*50 cm haciendo que se disminuya su caudal de entrada.

8.2 Tiempo de retención

En base a estos resultados se realiza el cálculo de tiempo de retención del biofiltro:

$$\text{Tiempo de retención} = \text{Volumen} / \text{Caudal}$$

$$\text{Volumen del biofiltro con tierra} = 50 \text{ cm} * 50 \text{ cm} * 35 \text{ cm} = 87,500 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen del biofiltro} = 87,500 \text{ cm}^3 * \frac{1 \text{ m}^3}{1.000.000 \text{ cm}^3} = 0.0875 \text{ m}^3$$

$$\text{Tiempo de retención salida} = \frac{0.0875 \text{ m}^3}{0.01597 \text{ m}^3/\text{s}} = 5.47902 \text{ s}$$

Significa que el flujo es bastante rápido dentro del biofiltro por lo que se debe usar un ventilador de menor velocidad.

8.3 Remoción de material particulado

Se recopiló los datos realizados en las mediciones establecidas en el que se usa la información al tamaño de partícula en PM10 y PM2.5 ya que a pesar de tener mediciones de PM1 por parte del airbeam, no se tomaron en cuenta ya que no se tiene conocimiento de la concentración de entrada porque el equipo del Temtop M2000 no mide ese tamaño.

8.3.1 Concentración y remoción en PM10

Tabla 3

Remoción de PM 10

Dia	Entrada PM 10 (µg/m³)	Salida PM10 (µg/m³)	Remoción %
jun-18	5,98	3,78	36,79
jun-19	6,06	2,56	57,76
jun-22	5,13	3,16	38,40
jun-23	8,23	3,17	61,48
jun-24	6,49	3,98	38,67
jun-25	3,89	1,62	58,35
jun-26	10,2	3,08	69,80
jun-30	4,16	2,56	38,46
jul-01	4,21	2,31	45,13
jul-02	3,24	1,92	40,74
jul-03	7,04	3,74	46,88
jul-06	5,01	2,98	40,52
jul-09	4,88	1,49	69,47
jul-10	6,18	3,43	44,50

A partir de los resultados de las mediciones de las concentraciones de entrada se obtiene un rango $10.20 \mu\text{m}^3 - 3.24 \mu\text{m}^3$ en PM10 presentándose una variación considerable y una salida con un rango entre $3.98 \mu\text{m}^3 - 1.49 \mu\text{m}^3$ dando una mejor precisión y control de material retenido por las plantas.

Se presenta un promedio de entrada $5,76 \mu/m^3$ en PM10 al biofiltro mientras que en la salida se obtiene un promedio de $2,83 \mu/m^3$ demostrando un promedio de retención por parte de las plantas y la tierra.

Se resalta la entrada de material particulado del día junio 26 teniendo una gran cantidad con $10.2 \mu/m^3$ en promedio y con una salida mucho menor de $3.08 \mu/m^3$, lo que puede indicar una retención excelente en grandes concentraciones. Asimismo, se presenta en el día Julio 2 se presenta un ingreso de $3.24 \mu/m^3$ y una salida de $1.92 \mu/m^3$ lo que puede reflejar que las plantas no lograron retener material particulado en una gran medida.

Se presenta un promedio de remoción del 49,05% en PM10 con un rango entre 69.48% - 36.79% en PM10 lo que indica que se presenta una remoción dentro del sistema en material particulado de mayor tamaño a 2.5 PM.

En base a los datos obtenidos por la prueba t en entrada y salida en PM10 en el que se tuvieron 14 observaciones con un grado de libertad de 13, siendo el resultado de t de 7.068 y valor p con dos colas de 0,0000084 de manera que existen diferencias entre entrada y salida.

8.3.2 Concentración PM2.5 entrada, salida y remoción

Tabla 4

Remoción de PM 2.5

Día	Entrada PM 2.5 μ/m^3	Salida PM2.5 μ/m^3	Remoción %
jun-18	3,66	2,91	20,49
jun-19	3,53	3,23	8,50
jun-22	3,16	2,65	16,14
jun-23	4,86	2,86	41,15
jun-24	3,94	3,24	17,77
jun-25	2,38	1,43	39,92
jun-26	5,83	2,63	54,89
jun-30	2,59	2,09	19,31
jul-01	2,62	1,98	24,43
jul-02	2,01	1,69	15,92
jul-03	4,33	3,42	21,02
jul-06	3,03	2,37	21,78
jul-09	2,99	1,41	52,84
jul-10	3,78	3,23	14,55

Se presenta en entrada en un rango entre $5.83 \mu/m^3$ – $2.01 \mu/m^3$ y un rango de salida entre $3.42 \mu/m^3$ – $1.41 \mu/m^3$ por lo que se presenta una entrada y salida controlada en el que se dan datos precisos a comparación de la entrada de PM10.

Se tiene un promedio de ingreso de PM 2.5 de $3.498 \mu/m^3$ y una salida en promedio de concentración de $2.460 \mu/m^3$ lo que representa un ingreso bajo de concentraciones, he incluso menor a comparación de PM10 este tamaño de partícula presenta mayor dificultad para retener por parte de las plantas.

Se presenta una pérdida de registro de mediciones de las primeras dos semanas se atribuye a la falta de un punto controlado de entrada y salida que fue agregado después del 18 de junio obteniendo resultados que demuestra la falta de esta modificación necesaria al biofiltro ya que se presentaban mediciones muy distorsionadas he incluso obteniendo más concentraciones entrada que en salida, por lo que era necesario agregar modificación.

Se presenta un promedio de remoción de 26,32% en PM2.5 con un rango 54.88% - 8.28% en el que se visualiza dispersión en los datos de remoción.

Se realiza una prueba t para verificación de datos en el que se tuvieron en cuenta 14 observaciones, 13 grados de libertad siendo el resultado de la prueba t de 4.566 con valor p de dos colas de 0,000529.

8.4 Variación hora valle y hora pico

Se realiza una comparación de material particulado en una hora pico y en una hora valle para conocer el comportamiento del biofiltro ante una mayor concentración o menor, a su vez se comprueba si realmente en la zona se presenta un aumento de acumulación al presentarse mayor tráfico vehicular.

Estos datos son pertenecientes a las mediciones realizadas en un periodo de medición de 2 horas en los que se clasifica la información en base a la hora del día, establecida como hora valle en un periodo entre (3:00 PM a 4:29 PM) y la hora pico en un periodo (4:30 PM a 6:00 PM)

En cuanto a la concentración de material particulado en entrada entre hora pico y hora valle en base a la prueba t en PM10 se presenta con 13 observaciones ($gl=12$) un resultado t de 0.570 con un valor p (dos colas) de 0.579. En PM2.5 bajo los mismos números de datos recopilados se presenta un resultado de t de 0.529 con un valor P (dos colas) de 0.606.

8.4.1 Hora pico en PM 2.5 y PM 10

Tabla 5

Concentración de PM 10 y PM2.5 en hora pico

Dia	Hora pico					
	Entrada		Salida		Remoción %	
	PM 10 ($\mu g/m^3$)	PM 2.5 ($\mu g/m^3$)	PM 10 ($\mu g/m^3$)	PM 2.5 ($\mu g/m^3$)	PM 10 ($\mu g/m^3$)	PM 2.5 ($\mu g/m^3$)
jun-18	6,1	3,7	4,5	3,3	26,22	10,81

jun-19	4,8	2,9	2,3	2,6	52,66	12,23
jun-22	4,8	3	2,2	2	53,75	33,97
jun-23	7,3	4,3	2,6	2,5	64,05	42,83
jun-24	8	4,9	5,6	4,3	30,49	13,22
jun-25	3,5	2,1	1,7	1,4	50,91	33,12
jun-26	9,7	5,6	2,8	2,4	71,46	57,16
jun-30	5,3	3,4	3,9	3,1	26,53	7,53
jul-01	4,2	2,6	1,9	1,7	54,46	35,56
jul-02	3,3	2,1	1,8	1,6	45,41	24,45
jul-03	7,3	4,5	4	3,7	44,84	16,87
jul-06	5,2	3,2	3,3	2,6	35,77	16,99
jul-09	5,2	3,2	1,7	1,6	67,16	49,68
jul-10	6,2	3,8	3,4	3,2	44,49	14,51
Promedio	5,8	3,5	3	2,6	47,73	26,35

Se muestra una variación de datos de entrada en PM10 entre $9.7 \mu/m^3$ – $3.3 \mu/m^3$ en cambio, en PM2.5 se presenta en un rango de entrada $5.6 \mu/m^3$ – $2.1 \mu/m^3$ por lo que se presenta de manera más precisa la concentración. Aparte se presenta un rango de salida en PM10 $5.6 \mu/m^3$ – $1.7 \mu/m^3$ y en PM 2.5 $4.3 \mu/m^3$ – $1.4 \mu/m^3$ por lo que se entiende que, a comparación de la entrada, se realiza una disminución de material particulado en la salida. En hora pico se tiene un promedio general de remoción en hora pico fue de 47.73% en PM10 y 26.35% en PM2.5.

Se presenta un promedio de entrada en PM10 del $5.8 \mu/m^3$ y en PM2.5 $3.5 \mu/m^3$ en cambio en la salida en PM10 se tiene un promedio de salida en $3 \mu/m^3$ y en PM2.5 $2.6 \mu/m^3$.

Se resalta la medición del día junio 26 que presenta una concentración de entrada del 9.7 con una salida $2.8 \mu/m^3$ en PM 10 y una entrada de $5.6 \mu/m^3$ con una salida de $2.4 \mu/m^3$ en PM2.5 lo que indica una buena remoción realizada por el biofiltro.

Se tiene en cuenta dos mediciones exactas en entrada siendo los días 6 y 9 de julio en los que se presenta una diferente salida, reflejándose una mejor remoción del día 9 lo que da a entender que existe una variable que hizo que se impulsara de mejor manera la retención. El rango de remoción en PM 10 en hora pico fue entre 71.46% - 26.22% y en PM 2.5 se presenta un rango de 57.16% a 7.53%.

El promedio general de remoción en hora pico fue de 47.73% en PM10 y 26.35% en PM2.5.

Se realiza una prueba t para verificación de datos en el que se considera la diferencia de entrada y salida en PM10 en hora pico con 14 observaciones, 13 grados de libertad con un resultado de prueba t de 7.063 con valor P de dos colas de 0,0000085. En PM2.5 en hora pico en entrada y salida se maneja con las mismas 14 observaciones, 13 grados de libertad en el que la prueba t obtuvo un resultado de 4.527 con valor p de dos colas de 0.000569.

8.4.2 Hora valle en PM 2.5 y PM 10

Tabla 6

Concentración en PM10 Y PM2.5 en entrada y salida en hora valle

	Hora valle					
	Entrada		Salida		Remoción %	
Día	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 10	PM 2.5
jun-18	5,8	3,6	2,6	2,4	55,02	32,53
jun-19	7,9	4,4	3	4,1	62,25	6,74
jun-22	5,6	3,4	4,3	3,5	23,3	-1,68
jun-23	10,3	6	7,1	5,6	31	6,97
jun-24	4,7	2,8	2,1	2	54,86	27,63
jun-25	4,4	2,7	1,5	1,4	65,9	46,81
jun-26	10,8	6,2	3,5	3	67,9	52,16
jun-30	2,6	1,6	0,8	0,8	68,85	49,78
jul-01	4,2	2,6	3,5	2,9	16,04	-10,29
jul-02	3	1,8	2,2	2	26,54	-9,44
jul-03	6,6	4,1	3,3	2,9	50,4	28,79
jul-06	4,1	3,2	2,2	1,9	46,99	40,34
jul-09	3,4	2	0,6	0,6	82,68	71,1
Promedio	5,6	3,4	2,8	2,5	50,13	26,26

En base a los resultados de las mediciones de entrada en PM10 se exhibe en un rango entre $10.8 \mu\text{m}^3$ a $2.6 \mu\text{m}^3$, en PM2.5 se encuentra en un rango de entrada entre $6.2 \mu\text{m}^3$ a $2 \mu\text{m}^3$ por su parte en la salida se presenta entre un rango en PM10 de $7.1 \mu\text{m}^3$ a $0.6 \mu\text{m}^3$ teniendo una salida más precisa y en salida en PM 2.5 se observa un rango entre $5.6 \mu\text{m}^3$ a $0.6 \mu\text{m}^3$ siendo más preciso que la salida en PM10.

El promedio de entrada en PM10 y PM2.5 fue de $5.6 \mu\text{m}^3$ y $3.4 \mu\text{m}^3$ a su vez el promedio en salida de PM10 y PM2.5 es de $2.8 \mu\text{m}^3$ y $2.5 \mu\text{m}^3$ lo que representa una disminución de concentraciones por parte del biofiltro tanto en valle como en hora pico.

En la hora valle en cambio se da en un rango entre 82.68% - 16.04% en PM 10 y en PM2.5 está en 57.16 y 7.53% y el promedio de remoción en PM10 es de 50.13% y en PM2.5 26.26%.

Se destacan los días junio 23 y junio 26 que teniendo concentraciones cercanas en entrada, se obtiene una salida diferente siendo mayor la disminución de salida del día 26 con un $3.5 \mu\text{m}^3$ que del día 25 con $7.1 \mu\text{m}^3$ por lo que se observa como fluctúa las remociones por parte del biofiltro a pesar de tener una concentración parecida, en entornos iguales sin alguna variable que pueda afectar directamente.

No se presenta medición de hora valle del día julio 10 ya que se realizaron las mediciones en hora pico.

Se presentan varias remociones negativas en PM2.5 en los días junio 22, julio 1 y julio 2 en la hora valle precisamente, esta anomalía es analizada en la sección 9.3

Se realiza una comparación de datos en pm 10 en hora valle entre entrada y salida en la prueba t en el que se contiene 13 observaciones con 12 grados de libertad en el que el resultado de la prueba t es de 5.764 y valor p (dos colas) 0,0000896. En PM2.5 entre entrada y salida con el mismo uso de datos en el que la prueba t fue de 2.875 con un valor p (dos colas) de 0.014.

8.5 Variación motor encendido – apagado

El impulso generado por el ventilador tiene posibilidad de alteraciones de material particulado dentro del biofiltro al levantarse tierra muy fina por esta misma fuerza, lo que puede afectar las mediciones de salida, a su vez este ventilador tiene como función de ingresar una mayor cantidad de material particulado exterior, que, por simple llegada de material al biofiltro, por lo que se realiza esta variación para entender mejor el funcionamiento del ventilador dentro del biofiltro.

8.5.1 Entrada ventilador encendido - apagado PM10 y PM2.5

Tabla 7

Entrada ventilador encendido - apagado PM10 y PM2.5

Dia	Entrada motor encendido		Entrada motor apagado	
	PM 10 (µg/m3)	PM 2.5 (µg/m3)	PM 10 (µg/m3)	PM 2.5 (µg/m3)
Junio 18	7,95	4,86	4,59	2,74
Junio 19	8,88	5,06	2,94	1,83
Junio 22	5,02	3,03	5,2	3,27
Junio 23	9,47	5,62	6,98	4,1
Junio 24	5,61	3,34	8,2	5,12
Junio 25	3,18	1,97	4,7	2,87
Junio 26	11,1	6,38	9,14	5,17
Junio 30	4,36	2,75	3,92	2,41
Julio 1	4,57	2,84	3,74	2,32
Julio 2	3	1,88	3,5	2,16
Julio 3	7,36	4,47	6,69	4,18
Julio 6	4,83	2,93	5,2	3,15
Julio 9	4,88	2,99	N/A	N/A
Julio 10	6,18	3,78	N/A	N/A

El rango de entrada en motor encendido se da en una concentración de $11.1 \mu/m^3 - 3 \mu/m^3$ en PM10 y respectivamente $6.38 \mu/m^3 - 1.88 \mu/m^3$ en PM2.5. Simultáneamente se tiene un rango de $9.14 \mu/m^3 - 2.94 \mu/m^3$ en PM10 y $5.17 \mu/m^3 - 1.83 \mu/m^3$ en PM2.5 en entrada de motor apagado reflejando una dispersión mayor en PM10 en ingreso de aire en motor encendido que en apagado, en cambio en PM2.5 se presenta un flujo de concentración más preciso en motor apagado que en motor encendido.

El promedio de entrada de motor encendido fue de $6.17 \mu/m^3$ en PM10 y $3.71 \mu/m^3$ en PM2.5 y a la par se presenta un promedio de entrada de motor apagado de $5.4 \mu/m^3$ en PM10 y $3.28 \mu/m^3$ en PM2.5 lo que presenta un leve aumento en el ingreso de material particulado realizado por el ventilador.

En la comparación de datos por medio de la prueba t se comparan entradas de motor encendido/ apagado con 12 observaciones, 11 grados de libertad ya que no se tomaron las muestras hechas de los días julio 9 y julio 10 ya que no se presentaron datos en motor apagado por lo que no se puede realizar la comparación, resultado de la prueba t de 1.322 con valor p (dos colas) de 0.213. En PM2.5 se realiza la prueba con la misma cantidad de datos de observaciones y grados de libertad que en PM10 siendo el resultado de la prueba t de 1.228 y probabilidad con dos colas de 0.245.

8.5.2 Salida ventilador encendido - apagado en PM10 y PM2.5

Tabla 8

Salida ventilador encendido - apagado en PM10 y PM2.5

Dia	Salida motor encendido			Salida motor apagado		
	PM1 ($\mu g/m^3$)	PM 10 ($\mu g/m^3$)	PM 2.5 ($\mu g/m^3$)	PM1 ($\mu g/m^3$)	PM 10 ($\mu g/m^3$)	PM 2.5 ($\mu g/m^3$)
Junio 18	1,67	1,92	1,81	3,67	5,93	4,16
Junio 19	3,31	3,7	4,86	1,1	1,17	1,23
Junio 22	1,92	2,19	2,07	2,95	4,15	3,22
Junio 23	2,98	3,7	3,24	2,33	2,66	2,48
Junio 24	2,77	3,6	3,04	3,27	4,7	3,6
Junio 25	1,63	2,07	1,78	1,09	1,23	1,17
Junio 26	3,11	4,11	3,41	1,64	1,9	1,74
Junio 30	2,47	3,54	2,77	1,25	1,46	1,34
Julio 1	2,5	3,29	2,72	1,13	1,25	1,18
Julio 2	1,7	2,03	1,85	1,37	1,79	1,5
Julio 3	3,44	4,16	3,74	2,82	3,27	3,07
Julio 6	2,99	4,44	3,33	1,38	1,64	1,49
Julio 9	1,32	1,49	1,41	N/A	N/A	N/A

Julio 10	2,99	3,43	3,23	N/A	N/A	N/A
----------	------	------	------	-----	-----	-----

Se presenta la variable PM1 debido a que el equipo airbeam se instaló en la salida del biofiltro por lo que se puede tener esta consideración en los resultados dados.

El rango de material de salida de motor encendido en PM1 fue de $3.44 \mu/m^3$ a $1.32 \mu/m^3$, en PM2.5 va entre $4.86 \mu/m^3$ a $1.41 \mu/m^3$ y en PM 10 se encuentra en un rango entre $4.44 \mu/m^3$ a $1.49 \mu/m^3$. Mientras que en salida de motor apagado de presenta en PM1 $3.67 \mu/m^3$ a $1.1 \mu/m^3$, PM 2.5 $4.16 \mu/m^3$ a $1.17 \mu/m^3$ y en PM10 $5.93 \mu/m^3$ a $1.17 \mu/m^3$.

Se presenta un promedio de concentraciones de salida de motor encendido en PM1 de $2.48 \mu/m^3$, PM2.5 de $2.80 \mu/m^3$ y PM10 de $3.11 \mu/m^3$, simultáneamente se presenta de concentración de salida de motor apagado un promedio en PM1 de $2 \mu/m^3$, en PM2.5 de $2.18 \mu/m^3$ y en PM 10 de $2.6 \mu/m^3$ presentando una salida de material particulado sin necesidad de un ventilador encendido.

Se observa una anomalía en las mediciones del día junio 19 en el que se presenta mayor material particulado en PM2.5 que en PM10 tanto en motor encendido como en motor apagado.

Se presenta dos muestras en los días julio 9 y julio 10 en el que no se obtienen datos de salida ya que se realizó un cambio en la configuración de funcionamiento en el ventilador para reducir su velocidad, lo que afectó la programación encendido/apagado cada 30 minutos, por lo que solo se obtuvieron resultados en motor encendido en esos días.

Al hacer comparaciones de concentraciones en salida motor encendido y apagado en PM10 se realizó con 12 observaciones ($gl = 11$) teniendo una prueba t de 1.066 con un valor p (dos colas) de 0.309. En PM 2.5 en salida motor encendido y apagado se usaron las mismas cantidades de datos teniendo como resultado en la prueba t de 1.569 con un valor p de 0.145 y en PM1 la prueba t fue de 1.658 con un valor P de (dos colas) 0.123.

8.5.3 Remoción en motor encendido y apagado

Tabla 9

Remoción en motor encendido y apagado

Dia	Remoción en motor encendido		Remoción en motor apagado	
	PM 10 ($\mu g/m^3$)	PM 2.5 ($\mu g/m^3$)	PM 10 ($\mu g/m^3$)	PM 2.5 ($\mu g/m^3$)
Junio 18	75,8	62,8	-29,2	-51,8
Junio 19	58,3	4,0	60,2	32,8
Junio 22	56,4	31,7	20,2	1,5
Junio 23	60,9	42,3	61,9	39,5

Junio 24	35,8	9,0	42,7	29,7
Junio 25	34,9	9,6	73,8	59,2
Junio 26	63,0	46,6	79,2	66,3
Junio 30	18,8	-0,7	62,8	44,4
Julio 1	28,0	4,2	66,6	49,1
Julio 2	32,3	1,6	48,9	30,6
Julio 3	43,5	16,3	51,1	26,6
Julio 6	8,1	-13,7	68,5	52,7
Julio 9	69,5	52,8	N/A	N/A
Julio 10	44,5	14,6	N/A	N/A
Promedio	45,0	20,1	50,6	31,7

Se presenta un rango de remoción en PM10 entre 73% a 8.1% y PM 2.5 entre 59% a -13.7% cuando el motor se encuentra encendido, en cambio en motor apagado se presenta un rango de remoción de 79.2% a -29.2% en PM10 y en PM2.5 66.3% a -51.8% lo que presenta datos muy dispersos en remoción tanto en motor encendido como en motor apagado.

Se tiene un promedio general de remoción de material particulado de 45% en PM 10 y 20.1% en PM2.5 en motor encendido, en remoción con el motor apagado se presenta un promedio de 50.6% en PM10 y 31.7% en PM2.5.

Se presentan datos negativos en los días junio 18 con -29.2% en PM10 y -51.8% en PM2.5 en motor apagado y en los días junio 30 en PM2.5 con -0.7%, julio 6 con -13.7% en ventilador encendido..

8.6.1 Día de la semana con mayor material particulado en PM10

Tabla 10

Día de la semana con mayor material particulado en PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Primera muestra ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5,13	4,26	6,49	5,97	2,76
Segunda muestra ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5,01	8,23	4,21	3,89	10,20
Tercera muestra ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		4,16		3,24	7,04
Cuarta muestra ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				4,88	6,18
Promedio	5,07	5,55	5,35	4,49	6,54

Las concentraciones promedio de PM10 por día de la semana se presenta en un rango que va entre 4.49 μm^3 a 6.54 μm^3 de concentración en la semana. En promedio por día se tiene una concentración del día Lunes de 5.07 μm^3 , Martes 5.55 μm^3 , Miércoles 5.35 μm^3 , Jueves 4.49 μm^3 y Viernes 6.54 μm^3 .

Se presentaron días con menores muestras esto debido a que fueron días que eran festivos en el que no se podían realizar mediciones o se realizaba alguna modificación en el biofiltro lo que no permitió realizarse una medición de ese día.

8.6.2 Día de la semana con mayor material particulado en PM2.5

Tabla 11

Día de la semana con mayor material particulado en PM2.5

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Primera muestra	3,16	4,76	3,94	3,67	2,49
Segunda muestra	3,03	4,86	2,62	2,38	5,83
Tercera muestra		2,59		2,01	4,33
Cuarta muestra				2,99	3,78
Promedio	3,10	4,07	3,28	2,76	4,11

Las concentraciones en material particulado 2.5 por día de la semana se presenta en un rango entre 4.11 a 2.76 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la semana. El promedio diario por día de la semana correspondiente al lunes fue 3.1 μm^3 , martes 4.07 μm^3 , miércoles 3.28 μm^3 , jueves 2.76 μm^3 y viernes 4.11 μm^3 .

Se presentan datos precisos en los días lunes, en cambio los días Viernes se presentan datos más dispersos.

8.7 Concentración en COVs en entrada y salida junto a su remoción

Tabla 12

Concentración de COVs en entrada y salida y remoción

Día	Entrada COVs (ppm)	Salida COVs (ppm)	% Remoción COVs
Junio 9 Martes	0,6	0,5	14,8
Junio 10 Miércoles	0,1	0,3	-132,4
Junio 11 Jueves	0,0	0,1	-427,0
Junio 12 Viernes	0,0	0,0	N/A
Junio 16 Martes	0,0	0,0	-759,1
Junio 18 Jueves	0,0	0,2	-972,0
Junio 19 Viernes	0,0	0,0	N/A

Junio 22 Lunes	0,0	0,0	N/A
Junio 23 Martes	0,0	0,2	-1847,7
Junio 24 Miércoles	0,1	0,2	-74,0
Junio 26 Viernes	0,1	0,2	-198,8
Junio 30 Martes	0,3	0,4	-27,9
Julio 1 Miércoles	0,1	0,1	-152,0
Julio 2 Jueves	0,1	0,2	-57,9
Julio 3 Viernes	0,2	0,2	-0,9
Julio 6 Lunes	0,3	0,2	23,1
Julio 9 Jueves	0,4	0,5	-33,1
Julio 10 Viernes	0,1	0,1	-29,7

Se presenta una entrada de COV's en un rango entre 0.6 a 0 ppm y en la salida entre 0.5 a 0 ppm lo que representan mediciones de muy poca presencia de este grupo de sustancias químicas.

El promedio de entrada de COV's es de 0.1 ppm y de salida es de 0.2 ppm.

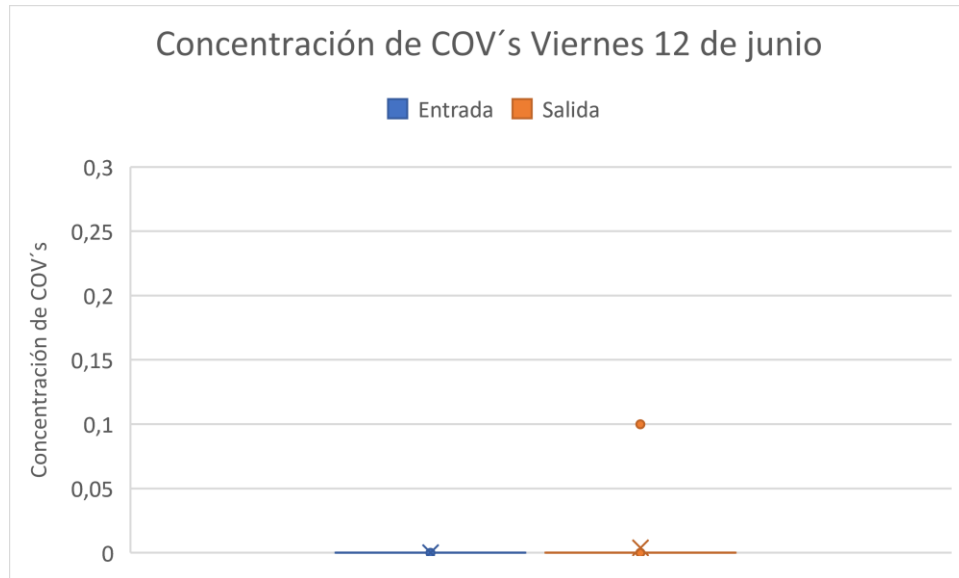
Se presenta dos mediciones que demuestran más entrada de COV's que en salida siendo los días junio 9 martes con una entrada 0.6 ppm una salida de 0.5 ppm y el día 6 de Julio con una entrada de 0.3 ppm y una salida de 0.2 ppm.

Junio 12, junio 16, junio 19 y junio 22 en el que las entradas fueron de 0 ppm junto con salidas de 0.01 a 0.02 (promedio día) por lo que se realiza una gráfica de cajas y bigotes para conocer a profundidad porque se presenta este dato en salida ya que el equipo solo marca hasta una sola unidad.

Datos de concentración de COVs (ppm) día 12 de junio.

Grafica 1

Cajas y bigotes de las concentraciones de COV's del día Viernes 12 de junio



Nota: Los datos fueron extraídos de los registros de entrada y salida obtenidos por el equipo multirae cuyos datos los promedia en intervalos de 1 minuto.

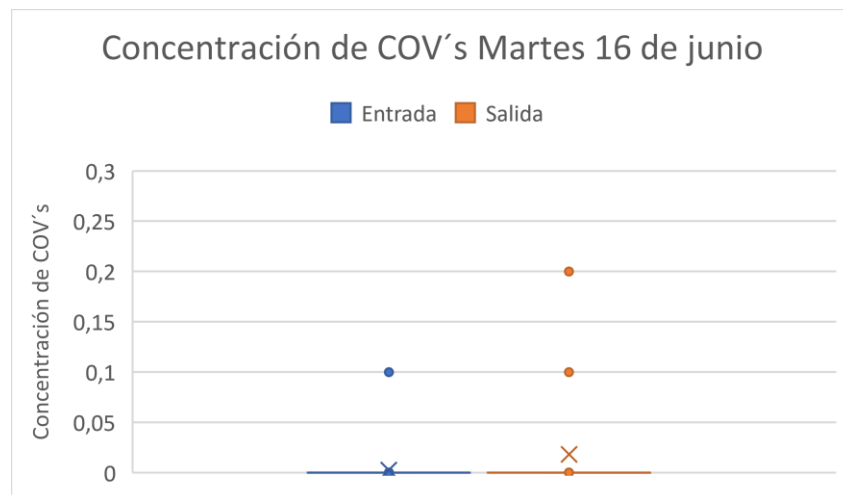
Los resultados presentaron solo dos mediciones con una salida baja de 0.1 ppm en COV's en el biofiltro mientras que los demás datos se encuentran en 0 tanto en entrada como en salida.

Se realiza una prueba t del día 12 de junio en cuyo uso de datos totales fueron 29 observaciones ($gl = 28$) con un resultado t de -1.44 con un valor p (dos colas) 0.161.

Datos del día junio 16 en COV's (ppm)

Grafica 2

Cajas y bigotes de las concentraciones de COV's del día martes 16 de junio



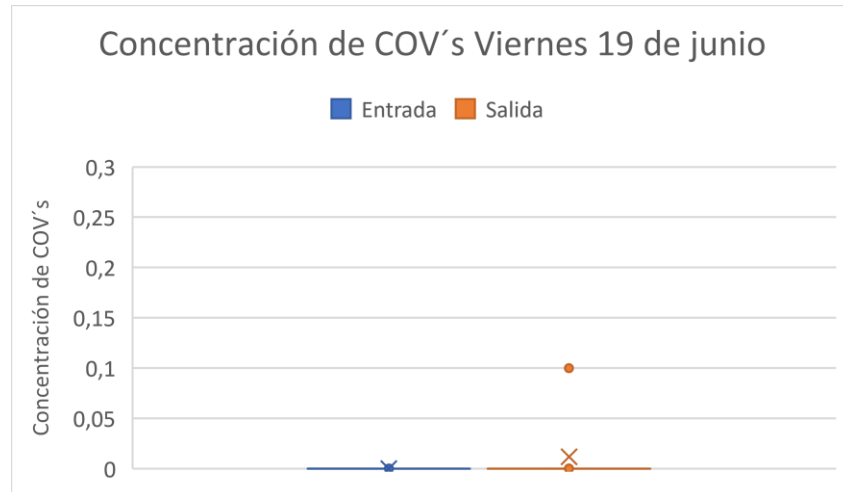
Se presenta una sola medición en entrada de 0.1 y en salida se tienen 2 datos en 0.1 y 2 datos en 0.2, los demás datos fueron en 0 en sus resultados.

Reafirmando los resultados obtenidos se realiza una prueba t en el cual se conlleva con un total de 33 observaciones ($gl=32$) con un dato final en la prueba de -1.971 con un valor p (dos colas) de 0.057.

Datos del día junio 19 en COV's (ppm)

Grafica 3

Cajas y bigotes de las concentraciones de COV's del día Viernes 19 de junio



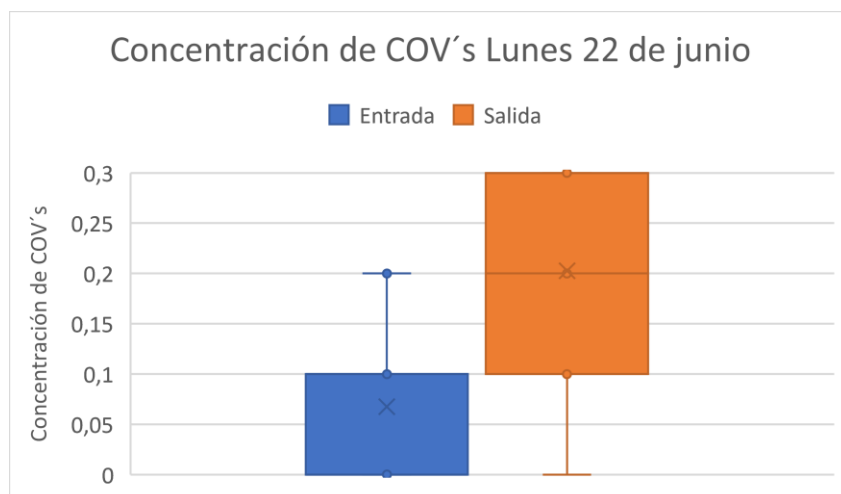
Por parte de la entrada se presenta 0 en todas sus mediciones en cambio, en la salida se presentaron 7 mediciones con presencia de 0.1 ppm de COV's.

Se realiza la prueba del día junio 19 en el que se obtuvieron 60 observaciones ($gl=59$) teniendo un resultado de -2.791 con un valor p (dos colas) de 0.007.

Datos del día junio 22 en COV's (ppm)

Grafica 4

Cajas y bigotes de las concentraciones de COV's del día Lunes 22 de junio



Grafica 4. Cajas y bigotes de las concentraciones de COV's del día lunes 22 de junio

Se obtiene datos de presencia COV's en entrada en un rango entre 0 a 0.1 y en salida en un rango entre 0 a 0.3 ppm del día 22 de junio.

En base a los datos de concentración de COV's del día lunes 22 de junio se recolectaron 39 observaciones (gl = 38) el resultado de la prueba t fue de -9,26 con un valor p (dos colas) de 0,00000000003.

Se realiza una comprobación por medio de la prueba t en comparación de concentraciones de entrada y salida de todas las mediciones obtenidas en el muestreo teniendo 18 observaciones (gl = 17) con un resultado de -3.286 con un valor P (dos colas) de 0.004.

8.8 Afectación de hora pico/hora valle en COV's

Tabla 13

Afectación de hora pico/hora valle en COV's

Dia	COV's	
	Entrada hora pico (ppm)	Entrada hora valle (ppm)
Junio 12 viernes	0,0	0,0
Junio 16 martes	0,0	0,0
Junio 18 Jueves	0,0	0,0
Junio 19 Viernes	0,0	0,0
Junio 22 Lunes	0,0	0,0
Junio 23 Martes	0,0	0,0
Junio 24 Miércoles	0,2	0,0
Junio 26 Viernes	0,1	0,1
Junio 30 Martes	0,4	0,3
Julio 1 Miércoles	0,0	0,1
Julio 2 Jueves	0,1	0,1

Julio 3 Viernes	0,1	0,4
Julio 6 Lunes	0,3	0,2
Julio 9 Jueves	0,4	0,2
Julio 10 Viernes	0,1	N/A

Se inició desde el día 12 de junio esto debido a que las mediciones anteriores los equipos presentaban una falta de calibración con el tiempo real de la medición.

El rango de entrada en hora pico entre 0.4 ppm a 0 ppm y en la entrada de hora valle oscila entre 0.4 a 0 ppm lo que representa un registro de datos con una salida menor a la entrada.

El promedio de entrada en hora en pico es de 0.1 ppm y de entrada en hora valle es de 0.1 ppm.

Los resultados realizados por la prueba t en COV's hora pico – hora valle en el que se usa la hipótesis nula de que no existe diferencia entre en hora pico y hora valle se usaron 14 observaciones (gl = 13) obteniendo en la prueba t 0.988 con un valor P de 0.341.

8.9 Variación motor encendido en COV's

Tabla 14

Variación motor encendido en COV's

	Entrada motor encendido	Entrada motor apagado
Dia	COV's (ppm)	COV's (ppm)
Junio 12 Viernes	0,0	0,0
Junio 16 Martes	0,0	0,0
Junio 18 Jueves	0,0	0,0
Junio 19 Viernes	0,0	0,0
Junio 22 Lunes	0,0	0,0
Junio 23 Martes	0,0	0,0
Junio 24 Miércoles	0,1	0,1
Junio 26 Viernes	0,1	0,0
Junio 30 Martes	0,3	0,2
Julio 1 Miércoles	0,0	0,0
Julio 2 Jueves	0,2	0,1
Julio 3 Viernes	0,3	0,2
Julio 6 Lunes	0,3	0,2
Julio 9 Jueves	0,4	N/A
Julio 10 Viernes	0,1	N/A
Promedio	0,2	0,1

A partir de la medición del 18 de junio se presenta una modificación en el biofiltro en el que se agrega un tubo de 33 cm de longitud para homogeneizar el fluido del aire proveniente del ventilador.

Se obtiene un rango de entrada con ventilador encendido 0.3 ppm a 0 ppm y en entrada con ventilador apagado 0.2 ppm a 0 ppm se presenta mayor distribución de concentración con el motor encendido.

El promedio de entrada del ventilador encendido es de 0.2 ppm y en entrada del ventilador apagado es de 0.1 ppm.

El análisis estadístico evidenció en la prueba t realizada en COV's en entrada de motor encendido – apagado con hipótesis nula en el que no se encuentra diferencia entre la entrada de motor encendido y la entrada de motor apagado se usa 13 observaciones (gl = 12) un resultado de 2.28 y un valor p (dos colas) de 0.042.

8.10 Dia de la semana con más COV's presentes en el lugar

Tabla 15

Concentración de COV's presentes en el lugar por día

Entrada COV's					
Muestra	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Primera muestra	0,0	0,6	0,1	0,0	0,0
Segunda muestra	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0
Tercera muestra		0,0	0,1	0,1	0,1
Cuarta muestra		0,3		0,4	0,23
Quinta muestra					0,1
Promedio	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

Los rangos promediados por los días de la semana se oscilan en 0.2 ppm a 0.1 ppm. El promedio por día de la semana es: lunes 0.2 ppm, martes 0.2 ppm, miércoles 0.1 ppm, jueves 0.1 ppm y los viernes 0.1 ppm.

El promedio de concentración por día de la semana en COV's fue de lunes 0,2 ppm, martes 0.2 ppm, miércoles 0.1 ppm, jueves 0,1 ppm y viernes 0.1 ppm.

9.Análisis de datos

La presencia de material particulado y COV's afecta la calidad del aire del entorno por lo que se plantea como alternativa para evaluación de mitigación el biofiltro basado en plantas, en el que se evalúa sus resultados de concentraciones de entrada y salida se usan en diferentes variables para identificar posibles aumentos o disminuciones en la eficiencia de mitigación

como lo son el ventilador encendido/ apagado, caudal, hora pico o hora valle, y el día de la semana con mayor concentración en la semana.

9.1 Caudal de entrada y salida

De acuerdo a los datos de caudal de entrada y salida realizados en la sección 8.2 se observa una salida de caudal mucho menor que el cálculo de caudal de salida, lo que sugiere que hay disminución esto debido a la expansión de ese aire a un espacio más amplio y en menor medida la presencia de tierra y plantas que obstaculizan el flujo y generan una retención de aire.

Al obtenerse este resultado en el trabajo del biofiltro se encuentra un comportamiento similar fue reportado por Permana BH et al. (2022), quienes emplearon un biofiltro vegetal con una profundidad de sustrato de 10 cm con un caudal de entrada de 0,20 – 0,23 m³/s y un caudal de salida de 0,0018 m³/s, evidenciando una reducción del flujo de aire al atravesar el medio filtrante, representando un caudal incluso mayor al que se obtiene en el biofiltro.

9.2 Concentración de PM10 y PM 2.5 en entrada y salida

A partir de los resultados de las mediciones realizadas en entrada se presenta un promedio de 5.76 µ/m³ en PM10 y 3.498 µ/m³ en PM 2.5 en la zona está en su mayoría proveniente del tránsito de vehículos procedente del escape, también existe la generación por el desgaste de los frenos, neumáticos o resuspensión por la alta movilidad (Thorpe & Harrison, 2008) existe la posibilidad del humo generado por personas que cruzaron fumando tabaco o trabajadores de aseo que al momento de barrer resuspenden el material particulado.

Estos promedios y rangos más altos reportados en un día general, se comparan con la resolución 2254 del 2017 normatividad para la calidad del aire en el artículo 2, parágrafo 1 establece los niveles máximos permisibles de PM10 y PM2.5 en una exposición de 24 horas de 75 µ/m³ y 37µ/m³ lo que se concluye a partir de las mediciones de 2 horas que se realizan en promedios diarios, que ningún dato llega a superar los parámetros permisibles vigentes en la zona.

En PM2.5 se presenta un comportamiento igual con respecto al material particulado de 10 micras en el que se presenta una remoción por parte del biofiltro en el que se obtiene un promedio de entrada de 3.5 µ/m³ y una salida de 2.46 µ/m³ sugiriendo que el biofiltro logra retener material particulado, pero demuestra mayor dificultad para captarlo esto debido a la poca distancia que tiene el biofiltro entre la entrada y salida y la velocidad del flujo del aire. Permana et al. (2022) indica que esta eficiencia depende de estas variables y es que la partícula menor a 2.5 micras presenta una dificultad mayor al comportarse como un gas, por lo que flotan con mucha facilidad.

Se presenta un promedio de remoción de material particulado de 10 micras de 49.05% y en 2.5 micras de 26.32% por lo que se puede resaltar que el biofiltro si está realizando remoción,

pero con variaciones de remociones dando a entender que el biofiltro no tiene una remoción estable.

El trabajo del biofiltro comparado al trabajo de biofiltración botánica en habitaciones realizado por Irga et al. (2017) realizaron un diferente sistema siendo una pared vegetal vertical que otorga resultados de eficiencia de $53,51 \pm 15,99$ % para PM10 y $48,21 \pm 14,71$ % para PM2,5. Por lo que da a indicar que el biofiltro presenta una remoción menor a comparación de otros sistemas, he incluso confirma las variaciones de resultados de remoción por parte de un biofiltro.

También, se reporta que la máxima eficiencia de remoción de material particulado total se obtuvo con un caudal de $0.01125 \text{ m}^3/\text{s}$ en un biofiltro de 0.25 m^2 de área de filtración, al tener un área de 0.25 m^2 similar a nuestro biofiltro que filtra ese aire con un caudal de $0.06842 \text{ m}^3/\text{s}$ de entrada, indicaría por qué se obtiene una remoción menor a comparación del trabajo de Irga y está enfocado en que lleva a un caudal más alto y un menor tiempo de retención en el biofiltro que se está usando. (Irga et al., 2017).

En base a los datos obtenidos por la prueba t en entrada y salida en PM10 se obtiene un resultado positivo evidencia siendo mayor la concentración en entrada que en salida y en base a la hipótesis nula se rechaza ya que presenta un valor menor que p con significancia de 0.05 lo que indica que la hipótesis alternativa revela que hay una diferencia entre entrada y salida en PM10. De manera similar ocurre en PM2.5 en entrada y salida de la prueba t ya que se obtiene un valor p menor al establecido lo que también sugiere que existe una diferencia en entrada y salida del biofiltro en los dos parámetros.

9.3 Variación de hora pico y hora valle en PM2.5 y PM10

En hora pico el promedio de entrada en PM10 fue del $5.8 \mu/\text{m}^3$ y en salida fue de $3 \mu/\text{m}^3$, a su vez en PM2.5 obtuvo un promedio de entrada de $3.5 \mu/\text{m}^3$ y en salida de $2.6 \mu/\text{m}^3$ lo que sigue confirmando que el biofiltro si está realizando una disminución de concentración de material particulado.

En la hora valle se presentó un promedio de entrada de PM 10 de $5.6 \mu/\text{m}^3$ y una salida de $2.8 \mu/\text{m}^3$, asimismo en PM2.5 el promedio en entrada fue de $3.4 \mu/\text{m}^3$ y el de salida es de $2.5 \mu/\text{m}^3$ lo que en base a los datos recopilados existe una mayor concentración en la hora pico que en la hora valle, sin embargo, no son concentraciones tan diferentes.

En base al estudio realizado por Srimuruganandam y Shiva Nagendra (2010) reportan que la mayores concentraciones fueron durante las horas pico en PM10, PM2.5 y PM1 en la ciudad de Chennai, a pesar de que no sea el mismo entorno y situación si logra confirmar que existe una mayor concentración en hora pico, lo que no se ve reflejado en los datos realizados en las mediciones de la calle 51, lo que se sugiere que tiene un flujo continuo entre las 3 a 5 PM justamente en la zona por lo que no se logra realmente diferenciar estas concentraciones.

En los datos registrados por la prueba t en PM10 hora pico se obtuvo un valor menor al nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula de entrada igual a la salida ya que presenta una diferencia entre entrada y salida en hora pico, a su vez en PM2.5 hora pico se presenta un mismo valor menor al nivel de significancia lo que indica que también se rechaza la hipótesis nula en hora pico.

En cambio, en la prueba t en PM10 en hora valle entre entrada y salida se presenta un valor p menor al nivel de significancia por lo que se encuentra una diferencia en entrada y salida, asimismo en pm2.5 cumpliendo una diferencia en entrada y salida en el que se rechaza en los dos casos la hipótesis nula.

En cuanto a la concentración de material particulado en entrada entre hora pico y hora valle se presenta un dato mayor al nivel de confianza de 0.05 por lo que se toma la hipótesis nula en el que no se presenta diferencia en hora pico y hora valle en PM10 y en PM2.5 se presenta al igual que en PM10 y un nivel mayor por lo que se determinar que no existe diferencia en la hora pico y la hora valle basado en los registros recopilados en el experimento.

9.4 Remoción en hora pico y hora valle en PM10 y PM2.5

El promedio de remoción de material particulado de 10 micras en hora pico es de 47.73% y en 2.5 micras es de 26.35% al compararse con la remoción de concentración se disminuye un poco remoción en PM 10 al presentarse en 49.05% y en PM2.5 obtuvo un ligero cambio de 26.32% a 26.35% lo que indica que el biofiltro tuvo un comportamiento igual al de la hora pico.

El promedio de remoción de PM10 en hora valle fue de 50.13% y en PM 26.26%, se destaca el aumento de remoción en hora valle a comparación de hora pico del 2.4% en el que al manejarse en concentraciones bajas no se encuentra un cambio relevante.

La mayoría de los estudios sobre biofiltros vegetales han evaluado la eficiencia de remoción de material particulado bajo condiciones controladas de laboratorio como en el artículo perteneciente de Irga et al (2017) este realiza en condiciones controladas he incluso se ajusta el caudal del aire para conocer su efecto, el artículo de Permana BH et al. (2022) presenta unas mediciones dentro del biofiltro para conocer la distancia de remoción de material particulado procedente del humo del cigarrillo en una zona controlada, para así conocer su flujo o tienen una emisión directa de material particulado como en el trabajo de Ibrahim et al. (2018) generaron artificialmente por quema de un papel impregnada con Diesel. Sin embargo, son escasas las investigaciones que analizan el desempeño de estos sistemas durante diferentes periodos de movilidad vehicular y más precisamente en remociones en jornadas de horas pico y las horas valle, por lo que este estudio ayuda a aportar información en este enfoque.

9.5 Variación de entrada de motor encendido y apagado en PM10 y PM 2.5

En el cálculo de los datos por medio de la prueba t basándonos en la hipótesis nula de que no existe diferencia en entradas de motor encendido/ apagado en PM10 en el que se obtiene un valor p mayor al nivel de significancia por lo que se acepta la hipótesis nula e indica que no existe una diferencia de entrada en motor encendido y en motor apagado, En PM2.5 se obtiene un valor p mayor al de significancia por lo que también se acepta la hipótesis nula de que no existe diferencia en motor encendido y apagado y en PM1 se tiene un valor mayor al de significancia igual que los resultados anteriores por lo que también se acepta la hipótesis nula.

También se debe de tener en cuenta el incremento de la concentración de material particulado registrado con el ventilador encendido al que se puede asociar a un aumento de transporte de partículas generado por el flujo de aire. Theron et al. (2020) demuestra que al inicio de flujo de un ventilador produce la resuspensión de material que queda depositado, incrementando la cantidad de partículas presentes en la corriente de aire, por lo que puede también ser una indicación del aumento de concentración en entrada, ya que se cuenta con una programación de 30 minutos encendido y 30 minutos apagado.

Se destaca las mediciones de los días 22 junio, 24 junio, 25 junio, 2 julio y 6 julio representando el 35% de los datos que demuestran un aumento mayor de material particulado en motor apagado que en motor encendido en PM10 y un 41% de los datos en PM2.5, por lo que se puede asociar a entradas de viento intenso en dirección a dentro del biofiltro o que se generara grandes concentraciones en el periodo de tiempo apagado del ventilador e ingresara el material. Sin embargo, esto corresponde a una proporción menor del total de las mediciones, por lo que en general la materia presenta mayor concentración cuando el motor este encendido, por lo que se puede asociar a entradas de viento intenso en dirección a dentro del biofiltro.

9.6 Variación de salida de ventilador encendido y apagado en PM 10, PM2.5 y PM1

La anomalía presentada en las mediciones del día junio 19, se puede explicar a que como se ve en los datos registrados en la tabla 8 se observa que este comportamiento se presentó en ambas condiciones de operación del sistema de motor encendido y apagado por lo que no se atribuye al funcionamiento del biofiltro ni del ventilador sino que podría estar relacionado con una variación puntual del proceso de medición en el que el sensor tuvo un error en su medición o la medición se realizó de manera incorrecta ese día.

Se determina las concentraciones en salida motor encendido y apagado en pm10 por medio de la prueba t en el que se basa la hipótesis nula en que no hay diferencia en la salida con motor encendido – apagado obteniendo un resultado en PM1, PM2.5 y PM10 un valor p mayor al nivel de significancia por lo que se concluye que no existe diferencia entre la salida con motor encendido y apagado y se acepta la hipótesis nula.

9.7 Remoción en motor encendido y apagado

Se presentaron valores negativos los días junio 30 con -0.7% en PM2.5 y julio 6 con -13.7% cuando el motor este encendido lo que sugiere que se genera una resuspensión de material particulado al encenderse el ventilador, como se referenció anteriormente Theron et al. (2020) explica como muchas de las partículas que permanecen depositada en el espacio, lo que aumenta sus concentraciones de salida o la posibilidad de un error por la incertidumbre de medición que tienen los equipos. Cabe resaltar los valores negativos generados los días junio 18 con -29.2% en PM10 y -51.8% en PM2.5 en motor apagado, esto no representa un comportamiento común en el biofiltro, lo que se sugiere que sea una resuspensión de partículas proveniente del viento que ingreso dentro del biofiltro cuando el ventilador se apagó, error de medición o posible afectación por parte del sustrato al estar seco.

9.8 Dia de la semana con mayor concentración en PM10 y PM2.5

En PM10 se registra el día viernes como el mayor día con generación de material particulado en promedio con $6.54 \mu/m^3$, seguido del día martes con $5.55 \mu/m^3$, se compara con el trabajo realizado por Mura et al. (2020) en el que agrupan la información de concentraciones de material particulado de 10 micras del año 2009 a 2018 con las estaciones de monitoreo de Bogotá resaltando los días viernes con mayor generación seguido de los días martes lo que confirma que en el lugar establecido tiene un mismo patrón en la ciudad. En los resultados obtenidos en PM2.5 se presenta el día con mayor concentración en promedio el día viernes $6.54 \mu/m^3$ seguido del día martes $5.55 \mu/m^3$ usando de referencia el trabajo de Mura et al. (2020) en base a los datos conseguidos se destaca que los mismos días viernes y martes fueron los días con mayor material particulado, lo que sugiere que el trabajo obtiene el mismo patrón de generación a nivel distrital. Cabe resaltar que se presentan pocos resultados los días lunes y miércoles por lo que no se puede tener un resultado claro por falta de datos en todos los días de la semana.

9.9 Concentración en COV's en entrada y salida

La mayoría de los datos presentados en salida se mostraron mayores concentraciones en la salida que en la entrada, lo que indicaría que no se está removiendo COV's por parte del biofiltro, pero se resalta los datos de los días junio 11, junio 16, junio 19 y junio 22 en el que las entradas fueron de 0 ppm junto con salidas de 0.01 a 0.02 (promedio día) indicando que existe algo dentro del biofiltro que produce más COVs, ya que se no se está teniendo resultados iguales tanto de entrada y salida.

Se realizó resultados en la prueba t de los días junio 11, junio 16, junio 19 y junio 22 en el que se descartan los dos primeros días ya que se considera que no existe una diferencia en entrada y salida, sin embargo, los días 19 y 22 se obtuvieron una diferencia en entrada y salida ya que fueron resultados menores al 95% de significancia por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa en los dos últimos días.

Usando de referencia el trabajo Alonso et al. (2022) se determina los COVT bajo los siguientes rangos de medición ya que mucho de los compuestos pueden presentar daños a la salud en grandes o menores concentraciones o en largos periodos de tiempo se establece:

Tabla 16

Rangos de medición para COVT

Recomendación	COVT (ppm)
No es aceptable	>0.61
Exposición únicamente temporal	0.2 – 0.61
Inofensivo	0.1 – 0.2
Nivel 2 valor objetivo	0.05 – 0.1
Nivel 1 valor objetivo	0 – 0.05

El promedio de entrada de COV's obtenidos en los resultados es de 0.1 ppm y de salida es de 0.2 ppm aun teniendo concentraciones bajas en promedio, no representa un peligro.

El trabajo presentado por Yang et al. (2009) identifica *que Sansevieria trifasciata* emite de forma natural COVs entre ellos 3-hidroxi-2-butanona, 4-hidroxi-4-metil-2-pentanona, 3,4-dimethyl-2-hexanona, 1-hexanol, D-limonena, 3,3,5-trimetilciclohexanol, 1-octanol, metil salicilato, butil butirate, tetradecanol e isopropil miristato. Además, los autores se reporta una concentración total de 427,1 diurno y en la noche 130.3 esto expresado en equivalentes de δ -carvona, evidenciando generación de COVs por parte de la planta, mayormente en el día.

La hiedra común en cambio se tiene idea de que puede generar COVs, pero no tiene una referencia bibliográfica que lo logre demostrar, por lo que se puede asociar a los COVs presentes en la mayoría de plantas en el que se liberan y a su vez la misma tierra genera COVs entre los que se encuentran los más comunes que serían etanol, formaldehído, acetaldehído, ácido acético, ácido fórmico, acetona, isopreno, monoterpenos, sesquiterpenos, bencenoides, sulfuro de dimetilo y furanos, esto extraído de la información del trabajo de comprensión de proceso de flujos de COV biogénicos del suelo, realizado por Tang et al. (2019) en el que se logra identificar compuestos que si pueden afectar las mediciones de salida.

Se presentan datos promedio en el rango de exposición únicamente temporal, pero no llega a cumplirse bajo el parámetro de no aceptable establecido por Alonso et al. (2022).

Se resalta en la tabla 13 en las mediciones junio 9 y julio 6 se presenta remoción en los COVs, en el que se sugiere que se presenta una concentración alta proveniente del exterior del biofiltro que fue lo suficientemente alta para que no fuera enmascarada por la generación producida por el biofiltro permitiendo que el efecto de remoción del biofiltro fuera evidente siendo de un 14,8% del día junio 9 y 23.1% del día julio 6.

Se evidencia por medio de los datos usados en entrada y salida de COV's en la prueba t bajo la hipótesis nula de que no hay diferencia en entrada y salida se obtiene un valor t negativo ($t = -3.286$) con un valor p ($p = 0.00436$) menor al nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa con una diferencia entre la entrada y la salida en el que indica un incremento de la concentración en la salida con respecto a la entrada.

9.10 Variable de hora pico/hora valle en COVs

En base a los resultados de la prueba t en la variable de hora pico/ hora valle en entrada de COV's nos basamos en la hipótesis nula de que no existe diferencia tanto en entrada hora pico y entrada hora valle en el que se obtiene un resultado de valor p ($p = 0.341$) reflejando un número mayor al nivel de significancia por lo que se acepta la hipótesis nula de que no hay diferencia en entrada hora pico y entrada hora valle.

Se usa de referencia el trabajo realizado por Franco et al. (2015) en el que se realiza una caracterización e identificación e COVs en Bogotá, en el que el sitio 1 se llega a acerca al lugar de medición del biofiltro en el que se resalta que no hay actividad industrial, se presenta bajos niveles de contaminación del aire y tiene una actividad vehicular mediana por lo que la zona se caracteriza por tener actividad económica residencial y comercial, esto indica que la presencia de COV's en la zona en la que se está haciendo mediciones tiene unas bajas concentraciones y a su vez se puede asociar al flujo vehicular como posible actividad principal de generación por las emisiones de vehículos a gasolina explicando la posibilidad de bajas concentraciones de COV's en las mediciones.

9.11 Variación entrada motor encendido/ apagado en COV's

El promedio de entrada del ventilador encendido es de 0.2 ppm y en entrada del ventilador apagado es de 0.1 ppm lo que permite plantear que en motor encendido logra ingresar el COV's dentro del biofiltro compuestos de más dificultad de volatilización ya que se presenta una distancia considerable 8 metros entre avenida y biofiltro ya que se presenta un andén de por medio y a su vez en material particulado, cabe resaltar que existe la posibilidad de que sea COV's pertenecientes del biofiltro que puedan afectar directamente las mediciones de salida en ventilador apagado.

Se evidenció por medio de la prueba t realizada a los datos de entrada de motor encendido en COVs bajo la hipótesis nula de que no existe diferencia en entrada de motor encendido y en entrada de motor apagado, por lo que el resultado de la prueba ($t = 0.042$) da un resultado menor al del nivel de significancia por lo que se rechaza y demuestra que existe una diferencia de COV's en entrada de motor encendido que cuando esta apagado.

9.12 Día de la semana con mayor concentración de COV's.

Se obtuvo en base a las muestras realizadas por día de la semana que los días lunes se genera mayor concentración con 0.2 ppm junto a los días martes con 0.2 ppm mientras que los demás días se tiene un promedio de 0.1 ppm, es importante saber que estos resultados tienen una limitación por falta de datos y se recomienda mayor cantidad de datos para una mejor precisión, además, los resultados en el lugar fueron relativamente bajos por lo que se recomienda realizarse en una zona con mayor concentración.

10 Conclusiones

El biofiltro a partir de las plantas hiedra común y lengua de suegra demostró una capacidad para disminuir las concentraciones de material particulado presentes en el aire en el que se obtuvo una remoción promedio del 49,05 % para PM10 y del 26,32 % para PM2.5, evidenciando un mejor rendimiento en la retención de partículas de mayor tamaño, sin embargo se necesita una reducción de velocidad por parte del ventilador, ya que se presenta una velocidad alta que no logra tener una mejor eficiencia en su remoción.

Las concentraciones de material particulado fueron ligeramente mayores durante la hora pico que en la hora valle. No obstante, la diferencia fue pequeña y no produjo cambios importantes en la eficiencia de remoción del biofiltro, lo que sugiere que el sistema mantuvo un comportamiento similar bajo ambas condiciones de monitoreo.

En los compuestos orgánicos volátiles (COV) no se evidenció una remoción constante en las mediciones, e incluso se obtuvieron resultados muy dispersos, lo que podría estar asociado a la velocidad del ventilador, los COV generados naturalmente por las plantas y el sustrato pueden influir en las concentraciones medidas a la salida del biofiltro, dificultando la identificación de una remoción continua de estos compuestos por lo que se necesita agregar un sistema de detección más sensible..

Se recomienda optimizar variables con el diseño del sistema, velocidad del ventilador, uso de sensores tanto en PM10, PM2.5, PM1 y COVs en entrada y salida para tener mediciones más certeras, además de profundizar en la identificación de compuestos generados dentro del biofiltro para así separar los compuestos provenientes de manera externa y no tener en cuenta los generados de manera interna.

En los datos obtenidos en hora valle y hora pico con la confirmación realizada por la prueba t no se presenta ninguna diferencia en las mediciones registradas por lo que se puede asociar a un flujo continuo en el lugar en el que no marca una diferencia significativa a su vez se puede estar relacionada con la lejanía de 8 metros entre avenida a biofiltro lo que también verse afectada el ingreso de material particulado ya que se dispersaría en ese espacio.

La variación con ventilador encendido y apagado con la verificación realizada en entrada y salida en PM no se presenta diferencia en los datos que demuestre que el ventilador logra ingresar una mayor cantidad de material dentro del biofiltro, en cambio en COV's en entrada

se presenta una comprobación significativa en entrada lo que indica que el ventilador podría impulsar una mayor concentración de compuestos orgánicos dentro del sistema.

Los días con mayor concentración de PM10 y PM2.5 a pesar de los pocos datos obtenidos y que no todos los días tuvieron la misma cantidad de muestras, se presenta un patrón similar a la generación de material particulado registrado a nivel distrital de Bogotá por lo que sugiere que en la zona presenta un comportamiento comparable con la tendencia de la ciudad, por parte de COV's parte de sus bajas concentraciones y la falta de información comparable en la ciudad de Bogotá por día de la semana no fue posible establecer una tendencia.

Recomendaciones

11.1 Durante el proceso de remoción de material particulado y compuestos orgánicos volátiles

Se necesita hacer una verificación antes del inicio de medición para la comprobación de que el equipo esté funcionando correctamente y tenga una salida de caudal adecuado, se comprueba a mayor tiempo de exposición de las plantas la adsorción obtenida en sus plantas, como de sus posibles daños a las hojas.

11.2 Instalación de sensores

Se requiere la instalación de sensores de temperatura para monitoreo al interior del biofiltro para una afectación en las plantas por la alta temperatura interna en el biofiltro o una baja temperatura que pueda dañar la planta.

Sensor de humedad para la supervisión de riego en la planta, a su vez al tener una tierra bastante seca genera levantamiento de material particulado por el ventilador encendido por lo que afectaría las mediciones, por lo que se recomienda un suelo húmedo.

Se propone instalar un sensor de material particulado y compuestos orgánicos volátiles en la entrada y salida del biofiltro para tener datos más precisos de las concentraciones de ingreso y salida. De esta forma, y serían más precisos los datos al estar simultáneamente.

11.3 Espacio cerrado

Al permanecer en un espacio cerrado las plantas, pueden generar las siguientes complicaciones si no se maneja con atención:

Humedad excesiva: Al regarse la planta y llevarse a estar expuesta bajo luz directa del sol en un periodo de tiempo se generaría una evaporación del biofiltro causando un efecto invernadero dentro del cubo, lo que aumentaría su temperatura generando un estrés hídrico y a aumentar la posibilidad de crecimiento de hongos o moho.

11.4 Traslado de biofiltro

En caso de requerirse un traslado del biofiltro, se recomienda sostenerlo desde la base y no desde las paredes, ya que estas podrían quebrarse por la carga de peso ejercida sobre las laterales. Asimismo, se debe separar el tanque de agua y la bomba de agua de la conexión de red de tuberías para no generar inconvenientes y tener precaución con las conexiones entre ventilador, sensores y el sistema Arduino.

12. Referencias

Sternberg, T., Viles, H., Cathersides, A., & Edwards, M. (2010). Dust particulate absorption by ivy (*Hedera helix* L.) on historic walls in urban environments. *Science of the Total Environment*, 409(1), 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.022>

Gong, Y., Zhou, T., Wang, P., Lin, Y., Zheng, R., Zhao, Y. y Xu, B. (2019). Fundamentos de las plantas ornamentales para la eliminación de benceno en el aire interior. *Atmosphere*, 10 (4), 221. <https://doi.org/10.3390/atmos10040221>

Hanus-Fajerska, E., Kamińska, I., Kruszyna, C. et al. Estudio de la respuesta de las lianas al estrés hídrico y evaluación del potencial de remediación del aire mediante diferentes modelos experimentales. *Plant Soil* (2025). <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07647-5>

Permana, B. H., Thiravetyan, P., & Treesubsuntorn, C. (2022). Effect of airflow pattern and distance on removal of particulate matters and volatile organic compounds from cigarette smoke using *Sansevieria trifasciata* botanical biofilter. *Chemosphere*, 295, 133919. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133919>

Li J, Chen S, Zhong J, Lin S, Pang S, Tu Q, Agranovski I. Removal of formaldehyde from indoor air by potted *Sansevieria trifasciata* plants: dynamic influence of physiological traits on the process. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2024 Nov;31(54):62983-62996. doi: 10.1007/s11356-024-35366-4. Epub 2024 Oct 29. PMID: 39470907; PMCID: PMC11599484.

Pollet, B., Steppe, K., Dambre, P., van Labeke, M. C., & Lemeur, R. (2009). Temperature integration of *Hedera helix* L.: Quality aspects and growth response. *Scientia Horticulturae*, 120(1). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.10.001>

(La Malfa, Et al 2., Noto, G., Pulvirenti, S., Parrini, F. and Casarotti, D. (1988). response of *sansevieria trifasciata* var. *laurentii* to soil temperature modifications by means of waste heat. *Acta Hort.* 229, 283-290 DOI: 10.17660/ActaHortic.1988.229.30

Secretaria de ambiente de Bogotá. (2025). *Informe mensual de la Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá* – RMCAB. PA10-PR04-M3. <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Informe%20Mensual%20Calidad%20del%20Aire%20Febrero%202025.pdf>

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Fooladi M, Moogouei R, Jozi SA, Golbabaie F, Tajadod G. Estudio de viabilidad de la eliminación de benceno y tolueno del aire mediante fitorremediación. J Health Saf Work 2021; 11 (3) :433-444. <http://jhs.w.tums.ac.ir/article-1-6537-en.html>

María F. Gámez. (2026). Caracterización de compuestos orgánicos volátiles y material particulado en zonas industriales de Bogotá, Colombia: Análisis de exposición, Universidad Santo Tomás.

Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés) | US EPA. (24 de junio, 2025). US EPA. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-PM-por-sus-siglas-en-ingles>

¿Qué son los compuestos orgánicos volátiles (COV)? | US EPA. (13 de enero, 2026). US EPA. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-volatile-organic-compounds-vocs>

Choi, Y. K., Song, H. J., Jo, J. W., Bang, S. W., Park, B. H., Kim, H. H., Kim, K. J., Jeong, N. R., Kim, J. H., & Kim, H. J. (2021). Morphological and Chemical Evaluations of Leaf Surface on Particulate Matter_{2.5} (PM_{2.5}) Removal in a Botanical Plant-Based Biofilter System. Plants (Basel, Switzerland), 10(12), 2761. <https://doi.org/10.3390/plants10122761>

Lisa, G., Cretescu, I., Tanase, C. et al. Evaluación de la respuesta de Hedera helix en ambientes contaminados mediante técnicas de investigación avanzadas. J Therm Anal Calorim 150, 9181–9194 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14312-7>

Chatterjee, S., Mandal, M., Kakkar, M., Basak, G., Khan, N. B., Chakraborty, R., Popek, R., Sarkar, A., & Barman, C. (2024). An insight to strategical responses of particulate pollution in plants: From phenome to genome. En *Plant Stress* (Vol. 14). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100671>

Sriprapat, W., Suksabye, P., Areephak, S., Klantup, P., Waraha, A., Sawattan, A., & Thiravetyan, P. (2014). Uptake of toluene and ethylbenzene by plants: Removal of volatile indoor air contaminants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 102, 147–151. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.01.032>

Iswoyo, H., Bahrin, A. y Ganing, W. (2023). Fitorremediación por Sansevieria sp. mediante la absorción de Monóxido de Carbono (CO). Agrovigor: Jurnal Agroekoteknologi, 16 (1), 46-52. doi: <https://doi.org/10.21107/agrovigor.v16i1.18258>

Encuestas de Movilidad en Bogotá – Historia y Datos. (2019). Movilidad de Bogotá <https://observatorio.movilidadbogota.gov.co/tableros/encuestas-de-movilidad>

Bogotá refuerza el control al carril preferencial de la Carrera 13 | SDM. (2025). Movilidadbogota.Gov.Co. <https://www.movilidadbogota.gov.co/bogota-refuerza-el-control-al-carril-preferencial-de-la-carrera-13>

Segura-Contreras Julián F, Franco Juan F. Exposición de peatones a la contaminación del aire en vías con alto tráfico vehicular.(2015), 18, 2, pp.179-187. ISSN 0124-0064. <https://doi.org/10.15446/rsap.v18n2.47209>.

Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente | US EPA. (2018, June 4). US EPA. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-PM-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>

Thorpe, A., & Harrison, R. M. (2008). Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. *Science of the Total Environment*, 400(1–3), 270–282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.007>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 2254 de 2017: Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf>

Irga, P. J., Paull, N. J., Abdo, P., & Torpy, F. R. (2017). An assessment of the atmospheric particle removal efficiency of an in-room botanical biofilter system. *Building and Environment*, 115, 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.035>

Srimuruganandam, B., & Shiva Nagendra, S. M. (2010). Analysis and interpretation of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁) emissions from the heterogeneous traffic near an urban roadway. *Atmospheric Pollution Research*, 1(3), 184–194. <https://doi.org/10.5094/APR.2010.024>

Ibrahim, S. N. F., Zahir, M. Z. M., Ahmad, S. S. S., Othman, N., & Ahmad, M. A. (2018). Design and development of botanical indoor air biofilter (BIAB) system for particulate matter removal in indoor environment. *MATEC Web of Conferences*, 192, 02035. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819202035>

Theron, F., Debba, D., & Le Coq, L. (2020). Local experimental methodology for the study of microparticles resuspension in ventilated duct during fan acceleration. *Journal of Aerosol Science*, 140, 105477. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.105477>

Ochoa, L. M. (2020). Influencia del material particulado atmosférico sobre la mortalidad urbana: un estudio de caso en relación con el uso del suelo en la ciudad de Bogotá (Colombia). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/25391>

Justo Alonso, M., Moazami, T. N., Liu, P., Jørgensen, R. B., & Mathisen, H. M. (2022). Assessing the indoor air quality and their predictor variable in 21 home offices during the Covid-19 pandemic in Norway. *Building and environment*, 225, 109580. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109580>

Yang, DS, Son, K., & Kays, SJ (2009). Compuestos orgánicos volátiles que emanan de plantas ornamentales de interior. *HortScience*, 44 (2), 396–400. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.396>

Tang, J., Schurgers, G., & Rinnan, R. (2019). Process understanding of soil BVOC fluxes in natural ecosystems: A review. *Reviews of Geophysics*. 57, 966–986. <https://doi.org/10.1029/2018RG000634>

Franco, J. F., Pacheco, J., Behrentz, E., & Belalcázar, L. C. (2015). Characterization and source identification of VOC species in Bogotá, Colombia. *Atmósfera*, 28(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(15\)72155-7](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(15)72155-7)

Blanchard, CL, Tanenbaum, S., & Lawson, DR (2008). Diferencias entre los niveles de contaminantes atmosféricos entre semana y fin de semana en Atlanta; Baltimore; Chicago; Dallas-Fort Worth; Denver; Houston; Nueva York; Phoenix; Washington, DC; y áreas circundantes. *Journal of the Air & Waste Management Association* , 58 (12), 1598-1615. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.12.1598>

Soreanu, G., Dixon, M., & Darlington, A. (2013). Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants: A mini-review. *Chemical Engineering Journal*, 229, 585–594. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.074>

Tahir, M. I., & Sitanggang, M. (2008). 165 Exclusive Sansevieria. *AgroMedia*.

Mura I, Franco JF, Bernal L, Melo N, Díaz JJ and Akhavan-Tabatabaei R (2020) A Decade of Air Quality in Bogotá: A Descriptive Analysis. *Front. Environ. Sci.* 8:65. doi: 10.3389/fenvs.2020.00065