



# Universidad **Mariana**

Evaluación de las concentraciones de Compuestos Orgánicos Volátiles contenidos en el material particulado suspendido en la calle 18 entre las carreras 34<sup>a</sup> y 35 de San Juan de Pasto

Harold Andrés Bastidas Florez

Andrés Felipe Espinosa Arturo

Alvaro Fernando Pachichana Guerrero

Universidad Mariana

Facultad Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

San Juan de Pasto

2024

Evaluación de las concentraciones de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos contenidos en el material particulado suspendido en la calle 18 entre las carreras 34ª y 35 de San Juan de Pasto

Harold Andrés Bastidas Florez  
Andrés Felipe Espinosa Arturo  
Alvaro Fernando Pachichana Guerrero

Informe de investigación para optar al título de: Ingenieros Ambientales

Ing. Juan Carlos Narváez Burgos  
Asesor

Universidad Mariana  
Facultad Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
San Juan de Pasto  
2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007  
Universidad Mariana

## **Agradecimientos**

A lo largo del camino que nos ha llevado a concluir este trabajo de investigación, queremos expresar nuestra más sincera gratitud a quienes desempeñaron un papel fundamental en la culminación de esta etapa.

En primer lugar, agradecemos a Dios, por ser nuestra fuente de sabiduría y guía tanto en el ámbito académico como personal, brindándonos la fortaleza y perseverancia necesarias para cumplir este sueño y culminar esta importante etapa universitaria.

A la Universidad Mariana, agradecemos por darnos la oportunidad de adquirir conocimientos y habilidades, y por ofrecer un entorno propicio para nuestro crecimiento intelectual, lo que hizo posible la realización de esta investigación.

Finalmente, extendemos nuestro más profundo agradecimiento a nuestro asesor, Mg. Juan Carlos Narvaez, por su dedicación, paciencia y valiosa orientación a lo largo de este proceso. Su conocimiento y experiencia fueron fundamentales para guiarnos en cada etapa de la investigación, brindándonos las herramientas necesarias para superar los retos y alcanzar nuestros objetivos.

## **Dedicatoria**

Primero que todo a Dios, por brindarme sabiduría, salud y fortaleza a lo largo de esta etapa universitaria. Gracias por ser mi guía para poder alcanzar este logro tan significativo en mi vida.

A mi madre, Cristina Arturo, cuya persona es la mayor razón en mi vida por la que hoy cumpla esta meta. De ti aprendí que cada esfuerzo sincero trae consigo una buena recompensa. Eres esa persona especial que me inspira a seguir adelante, y este logro es un homenaje a tu apoyo incondicional. Te amo mucho madre.

A mi padre, Richard Espinosa, quien se convirtió en ese consejero para cada paso que se dio en este camino. Me enseñó a mantener la fe incluso en los momentos más difíciles. Gracias por siempre tenerme en tus oraciones y por siempre recordarme que nunca hay que rendirse.

A mis compañeros y amigos, quienes estimo mucho por estar en los momentos más alegres, compartiendo risas, y en los momentos más difíciles, brindándome su apoyo incondicional sin esperar nada a cambio. Su amistad ha sido muy importante durante estos años. Gracias a todos.

Andres Felipe Espinosa Arturo

## **Dedicatoria**

En primer lugar, a Dios, por concederme salud, sabiduría y la fortaleza que me han permitido culminar esta etapa tan importante de mi vida

A mis padres, Marina y Álvaro, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y apoyo incondicional. Gracias por ser el motor que impulsa mi vida y por estar siempre a mi lado en cada paso de este camino. Su amor, sacrificio y aliento me han motivado en todo momento, y no podría haber llegado hasta aquí sin ustedes. Este logro es para ustedes. ¡Los amo y les estaré eternamente agradecido!

A mis hermanos, Cristian, Esteban y Andrés, por estar siempre a mi lado de manera incondicional. Su sabiduría y consejos han sido fundamentales en mi crecimiento como persona. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles y por compartir tanto las alegrías como los desafíos que he enfrentado. Este logro no habría sido posible sin ustedes, y estoy profundamente agradecido por contar con su apoyo en cada paso de este camino.

Alvaro Fernando Pachichana Guerrero

## **Dedicatoria**

Primero a Dios, quien me ha guiado por un buen camino, me ha dado la persistencia en este arduo y largo trayecto, por darme la sabiduría necesaria para sacar adelante y culminar mis estudios universitarios.

A mi novia Natalia y a mi hijo Juan José, quienes han sido mi motivación y mi motor para salir adelante. Todos los logros y metas son por ustedes y para ustedes; siempre estaré a su lado y saldré adelante por ustedes. Los amo demasiado, son lo mejor que me ha pasado.

A mi padre, Harold Edmundo, quien ha sido aquel que, con mucho esfuerzo y amor por su hijo, ha dado todo por él. Gracias, padre, por ser ese ejemplo a seguir y aquel que ha estado a mi lado en todo momento, por ser ese amigo incondicional. Te amo, padre.

A mi madre, Aldiany, quien supo criar y amar a sus hijos de forma ejemplar. Gracias, madre, por estar presente de forma incondicional a mi lado; eres la mejor madre y amiga de este mundo. Te amo mucho, madre mía.

A mi hermano Mario, por ser ese compañero de vida y quien ha aportado su grano de arena para compartir este logro. Gracias, hermano, este logro es tuyo.

A mis compañeros y amigos que han estado a mi lado durante todos estos años, les agradezco por su apoyo incondicional y por todos los momentos vividos; siempre estarán presentes en mi corazón. Gracias a todos.

Harold Andrés Bastidas Flórez

## Contenido

Introducción .....	14
1. Resumen del proyecto .....	16
1.1. Antecedentes .....	17
1.2. Justificación y planteamiento del problema .....	19
1.2.1. Justificación.....	19
1.2.2. Planteamiento del problema .....	20
1.2.3. Hipótesis.....	22
1.3. Objetivos .....	22
1.3.1. Objetivo general .....	22
1.3.2. Objetivos específicos.....	22
1.4. Área de estudio.....	23
1.5. Descripción de metodologías .....	24
1.5.1. Estandarización del procedimiento para análisis de TSP y COVs.....	24
1.5.1.1. Revisión de literatura .....	24
1.5.1.2. Selección de equipos y reactivos.....	24
1.5.1.3. Optimización de condiciones cromatográficas .....	24
1.5.1.4. Desarrollo de procedimientos.....	25
1.5.2. Análisis de partículas TSP y COVs.....	25
1.5.2.1. Toma de muestras.....	25
1.5.2.2. Preparación de la muestra .....	26
1.5.2.3. Análisis de las muestras. ....	27
1.5.2.3.1. Análisis por cromatografía de gases.....	27
1.5.2.3.2. Análisis por cromatografía líquida de alta eficiencia.....	28
1.6. Diseño experimental.....	29
1.7. Línea de investigación y área temática .....	30
2. Resultados y discusión .....	31
2.1. Estandarización del procedimiento de análisis de TSP y (COVs) en aire a partir de métodos de análisis instrumental.....	31
2.1.1. Glosario .....	31

2.1.2. Descripción de equipos .....	32
2.1.3. Guía de Procedimiento para la Captura de Muestras .....	37
2.1.3.1. Pesaje del filtro antes y después de tomar la muestra .....	38
2.1.3.2. Calibración de la bomba Criffer Acura 4 .....	39
2.1.3.3. Instalacion de la bomba Criffer Acura 4 .....	40
2.1.3.4. Preparación de la muestra. ....	40
2.1.3.5. Análisis de la muestra por cromatografía de gases .....	41
2.1.3.6. Análisis de la muestra por HPLC .....	42
2.1.4. Validación del procedimiento .....	43
2.1.4.1. Prueba número 1 GC/MS .....	43
2.2. Análisis Concentración de COVs y TSP .....	46
2.2.1. Cyclopentano, 4 methyl.....	48
2.2.2. Heptano .....	48
2.2.3. Ciclohexano.....	48
2.2.4. Acetona.....	49
2.2.5. Nonanal .....	50
2.2.6. Decenal (E).....	50
2.2.7. Undecenal .....	51
2.2.8. Decadienal (E,E) .....	51
2.2.9. Tolueno.....	52
2.3. Relación entre los niveles de concentración de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y otras variables ambientalmente determinantes.....	53
2.3.1. Ciclopenteno, 4-metil .....	56
2.3.2. Heptano .....	57
2.3.3. Ciclohexano.....	58
2.3.4. Acetona.....	59
2.3.5. Nonanal .....	61
2.3.6. 2-Decenal (E) .....	62
2.3.7. 2-Undecenal .....	63
2.3.8. 2,4-decadienal (E,E).....	64
2.3.9. Tolueno.....	65

3. Conclusiones .....	67
4. Recomendaciones .....	68
Referencias bibliográficas .....	69
Anexos.....	90

## **Índice de Tablas**

Tabla 1. Condiciones del cromatógrafo .....	28
Tabla 2. Condiciones operativas para cromatografía de HPLC .....	28
Tabla 3. Diseño experimental.....	29
Tabla 4. Metodología para la preparación de la muestra .....	41
Tabla 5. Fechas de muestreo .....	46
Tabla 6. Mapa de color de correlación de COVs y TSP .....	47
Tabla 7. Escala de colores para mapa de correlación.....	47
Tabla 8. Mapa de color de correlación Pearson de COVs con otras variables .....	54
Tabla 9. Escala de colores para mapa de correlación.....	55

## Índice de Figuras

Figura 1. Mapa base de ubicación de zona de estudio, Universidad Mariana .....	23
Figura 2. Bomba de muestreo Criffer Acura 4.....	26
Figura 3. Equipo Soxhlet.....	26
Figura 4. Rotoevaporador.....	27
Figura 5. Diagrama para la calibración del equipo Criffer Acura 4.....	33
Figura 6. Diagrama equipo Termohigrómetro .....	33
Figura 7. Diagrama equipo Anemómetro.....	34
Figura 8. Diagrama equipo Balanza Analítica .....	35
Figura 9. Diagrama extracción de COVs mediante el método Soxhlet .....	35
Figura 10. Diagrama análisis por cromatografía.....	36
Figura 11. Diagrama cromatógrafo de gases.....	37
Figura 12. Caudalímetro.....	40
Figura 13. Cromatógrafo de gases.....	42
Figura 14. Gráfica muestra 1 .....	43
Figura 15. Resultados muestra 1 .....	44
Figura 16. Niveles máximos permisibles de Tolueno y su correlación con PST .....	52

## **Índice de Anexos**

Anexo A. Fechas de muestreo.....	90
Anexo B. Resultados M2 .....	91
Anexo C. Resultados M3 .....	91
Anexo D. Resultados M4 .....	92
Anexo E. Resultados muestra nula.....	92
Anexo F. Instalación de la bomba.....	93
Anexo G. Punto de muestreo.....	93

## **Introducción**

La presencia de compuestos orgánicos volátiles (COVs) en el medio ambiente representa un desafío significativo, con repercusiones graves para la salud humana y la biodiversidad. Estos compuestos se emiten por diversas fuentes, incluyendo procesos industriales, uso de solventes, y la quema de combustibles fósiles (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.). Según un informe reciente de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), la exposición prolongada a los COVs se asocia con una variedad de efectos adversos para la salud humana. Además, algunos COVs, como el benceno, son clasificados como cancerígenos para los seres humanos (Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer [IARC], 2018). La OMS destaca la importancia de controlar las emisiones de COVs y mitigar la exposición humana a estos contaminantes potencialmente peligrosos, especialmente en entornos urbanos e industriales donde las concentraciones tienden a ser más altas (OMS, 2021). Los COVs pueden adherirse a las partículas suspendidas totales (PST) presentes en la atmósfera, alterando su comportamiento y biodisponibilidad en el ambiente (Liu et al., 2023). Las PST, que comprenden partículas de diversos tamaños y composiciones, actúan como transportadores efectivos de estos compuestos orgánicos, pudiendo modificar su tiempo de residencia en la atmósfera y sus patrones de exposición humana (Wang et al., 2022).

El objetivo de este trabajo de grado es analizar las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) presentes en las partículas suspendidas totales del aire ambiente de la calle 18, entre las carreras 34a y 35 de San Juan de Pasto. Los COVs pueden ser inhalados fácilmente y algunos pueden penetrar profundamente en los pulmones, contribuyendo al riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2022). La exposición prolongada a ciertos COVs se ha asociado con efectos adversos para la salud, incluyendo irritación de ojos y vías respiratorias, dolores de cabeza, náuseas, daño hepático y renal, e incluso cáncer en el caso de algunos compuestos como el benceno (Organización Mundial de la Salud, 2021). Además, los COVs juegan un papel crucial en la formación de ozono troposférico y material particulado secundario, lo que puede exacerbar los problemas de calidad del aire urbano (Seinfeld y Pandis, 2016). La persistencia de los COVs en el ambiente varía según el compuesto, pero muchos pueden reaccionar rápidamente en la atmósfera, contribuyendo a la

formación de smog fotoquímico (Atkinson, 2000). La interacción entre COVs y PST es particularmente relevante en ambientes urbanos, donde las partículas pueden actuar como matrices de adsorción para estos compuestos volátiles, modificando sus propiedades fisicoquímicas y su potencial impacto en la salud (Zhang y Chen, 2023).

El proyecto implica la recolección de muestras de PST en puntos específicos con alta actividad vehicular para evaluar la presencia de COVs adsorbidos en estas partículas. La capacidad de las PST para retener COVs varía según sus características superficiales y las condiciones ambientales, siendo las partículas más finas generalmente más efectivas en la adsorción de estos compuestos (Ramírez et al., 2022). Posteriormente, en el laboratorio, se analizarán las muestras mediante técnicas específicas para determinar las concentraciones de COVs asociados a las PST y compararlas con los estándares de calidad del aire. El objetivo es identificar si la presencia de COVs en las PST representa un riesgo para la salud pública, particularmente para los estudiantes de la Universidad Mariana y la comunidad en general en esa área, considerando que esta forma de contaminación puede modificar significativamente la exposición y los efectos biológicos de ambos contaminantes (Hernández y López, 2023).

En este contexto, el enfoque de la investigación abarca la sección de la carrera 18 comprendida entre las calles 34 y 35 en la urbe de San Juan de Pasto. Este tramo se caracteriza por un intenso flujo vehicular, especialmente debido a la presencia de una parada de autobuses en la mitad de la cuadra. Además, es un área de tránsito frecuente para estudiantes, profesores y directivos que ingresan y salen de la Universidad Mariana. Así mismo, entre estas dos vías se encuentra un semáforo peatonal, donde es evidente que los vehículos generan mayores emisiones atmosféricas al arrancar desde cero. El objetivo principal de este estudio es evaluar las partículas TSP y el nivel de concentración de COV's en el aire, con el fin de determinar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Este tipo de investigación es crucial para garantizar un entorno más saludable y sostenible para las futuras generaciones (Ruiz Abad, 2018).

## **1. Resumen del proyecto**

El objetivo de este trabajo de grado se enfoca en analizar las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) presentes en las partículas suspendidas totales (PST) del aire ambiente de la calle 18, entre las carreras 34a y 35 de San Juan de Pasto. Los COVs son sustancias químicas que contienen carbono y se evaporan fácilmente a temperatura ambiente (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2023). Son emitidos por una amplia variedad de fuentes, incluyendo procesos industriales, productos de consumo, y vehículos motorizados (Organización Mundial de la Salud, 2021). Las PST actúan como portadores efectivos de COVs en la atmósfera, ya que estos compuestos pueden adsorberse en la superficie de las partículas, alterando tanto sus propiedades físico-químicas como su potencial impacto en la salud (Chen et al., 2022). Esta interacción COV-PST es particularmente relevante en áreas urbanas con alta densidad vehicular, donde ambos contaminantes son emitidos simultáneamente (Wang et al., 2023).

Los COVs desempeñan un papel crucial en la formación de ozono troposférico y material particulado secundario, contribuyendo así a la contaminación del aire urbano (Seinfeld y Pandis, 2016). Su permanencia en la atmósfera puede variar desde horas hasta meses, dependiendo de su reactividad química y las condiciones ambientales (Atkinson y Arey, 2003). Cuando estos compuestos se asocian con las PST, su comportamiento ambiental puede modificarse significativamente, aumentando su persistencia en el ambiente y potencialmente su biodisponibilidad en el sistema respiratorio humano (García y Martínez, 2023).

El proyecto implica la recolección de muestras de PST en puntos específicos con alta actividad vehicular para evaluar la presencia y concentración de COVs adsorbidos en estas partículas. Posteriormente, en el laboratorio, se analizarán las muestras mediante técnicas de desorción térmica y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas para determinar el perfil y las concentraciones de los COVs presentes en las PST (Zhang et al., 2022). El objetivo es identificar y cuantificar los COVs asociados a las PST y evaluar si esta forma de contaminación representa un riesgo para la salud pública, particularmente para los estudiantes de la Universidad Mariana y la comunidad en general en esa área.

## **1.1. Antecedentes**

La contaminación del aire por Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) constituye un reto considerable para la calidad ambiental y la salud pública a nivel mundial. Estos contaminantes, liberados por diversas fuentes tanto humanas como naturales, contribuyen a la formación de ozono troposférico y material particulado secundario. Los COVs no solo deterioran la calidad del aire exterior, sino que también son motivo de preocupación en espacios interiores, donde pueden acumularse y alcanzar niveles potencialmente peligrosos. (Salthammer, 2016)

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) define los COVs como cualquier compuesto de carbono, excluyendo el monóxido de carbono, el dióxido de carbono, el ácido carbónico, los carbonatos y bicarbonatos metálicos, y el carbonato de amonio, que participa en reacciones fotoquímicas atmosféricas. La EPA ha identificado numerosos COVs como contaminantes peligrosos del aire y ha establecido regulaciones para controlar sus emisiones (U.S. EPA, 2022).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) proporciona directrices sobre los niveles seguros de exposición a ciertos Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs). Por ejemplo, para el benceno, la OMS no establece un nivel seguro debido a su potencial carcinogénico (Air Quality, Energy and Health (AQE), 2010). En paralelo, la Unión Europea ha implementado regulaciones específicas para limitar la presencia de estos contaminantes. La Directiva 2004/42/CE establece límites al contenido de COVs en pinturas y barnices, mientras que la Directiva 2010/75/UE aborda las emisiones industriales (Directive - 2010/75 - EN - EUR-LEX, s. f.).

En Colombia, varios estudios han investigado la presencia y los efectos de los COVs, como es el caso de Zárate et al. (2017) llevaron a cabo un estudio exhaustivo en Bogotá, Colombia, con el objetivo de evaluar las concentraciones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) tanto en el aire interior como exterior de viviendas urbanas. El estudio se centró específicamente en los compuestos BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, conocidos por sus potenciales efectos adversos en la salud humana. La investigación abarcó un total de 40 hogares distribuidos en diferentes zonas de Bogotá, seleccionados para representar una variedad de condiciones

socioeconómicas y ambientales. Concluyeron que la exposición a COVs en ambientes interiores representa un riesgo potencial para la salud de los residentes de Bogotá, y se destacó la importancia de considerar la calidad del aire interior como un componente crucial de la salud pública urbana, especialmente en ciudades densamente pobladas como Bogotá, donde la exposición a contaminantes atmosféricos es una preocupación creciente.

Por otro lado, Ramírez et al. (2018) llevaron a cabo un estudio exhaustivo para evaluar la exposición ocupacional a Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) entre los trabajadores de estaciones de servicio en Bogotá, Colombia. La investigación se centró en 25 estaciones de servicio distribuidas por toda la ciudad, seleccionadas para representar una variedad de ubicaciones, tamaños y volúmenes de venta de combustible. El estudio concluyó que la exposición ocupacional a COVs, especialmente al tolueno, representa un riesgo significativo para la salud de los trabajadores de estaciones de servicio en Bogotá. Los autores enfatizaron la necesidad urgente de implementar medidas de control más estrictas y de realizar investigaciones adicionales sobre los efectos a largo plazo de esta exposición.

Las Partículas Suspendedas Totales (PST) son contaminantes atmosféricos constituidos por material sólido o líquido, de origen tanto natural como antropogénico, que pueden permanecer suspendidos en el aire y presentan diámetros que varían desde menos de 0.1  $\mu\text{m}$  hasta más de 10  $\mu\text{m}$ ; dentro de su composición, pueden contener Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) adheridos a su superficie mediante procesos de adsorción, siendo estos últimos sustancias químicas que pueden volatilizarse fácilmente a temperatura ambiente y que frecuentemente se originan de actividades industriales, el tráfico vehicular y la quema de biomasa (Ramírez et al., 2018; García-Rueda & Vásquez-Torres, 2019). En un estudio realizado en Medellín, Colombia, se encontró que las TSP contenían niveles significativos de COVs como benceno, tolueno y xilenos, especialmente en zonas de alto tráfico vehicular y actividad industrial, con concentraciones que oscilan entre 0.5 y 2.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Bedoya & Martínez, 2021).

Guerrero et al. (2019) realizaron un estudio exhaustivo sobre la calidad del aire en la ciudad de Pasto, capital del departamento de Nariño, Colombia. El estudio incluyó mediciones de varios contaminantes atmosféricos, con un énfasis particular en los Compuestos Orgánicos Volátiles

(COVs). Los investigadores establecieron múltiples puntos de muestreo distribuidos estratégicamente por la ciudad, abarcando zonas residenciales, comerciales e industriales. El estudio se centró principalmente en el benceno y el tolueno, dos compuestos de particular preocupación debido a sus efectos conocidos sobre la salud. Los resultados mostraron que las concentraciones medias de estos compuestos estaban por debajo de los límites establecidos por la normativa nacional colombiana. Específicamente, encontraron que los niveles de benceno oscilan entre 0.5 y 2.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que los de tolueno variaron entre 1.2 y 4.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ambos por debajo de los límites anuales recomendados.

Ortega y Bravo (2020) llevaron a cabo un estudio exhaustivo sobre la exposición ocupacional a Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) en trabajadores de talleres de pintura automotriz en la ciudad de Pasto, Nariño. La investigación se centró en 15 talleres de diferentes tamaños, seleccionados para representar una muestra diversa de las condiciones laborales en el sector. El estudio incluyó tanto mediciones ambientales como personales de COVs, con un enfoque particular en xilenos y tolueno, dos compuestos comúnmente utilizados en pinturas y disolventes automotrices. Los resultados del estudio fueron preocupantes. En el 60% de los talleres evaluados, los niveles de exposición a xilenos superaron el límite de exposición ocupacional establecido por la normativa colombiana (100 ppm para una jornada de 8 horas). El análisis de las encuestas reveló que solo el 30% de los trabajadores utilizaba regularmente el equipo de protección personal (EPP) adecuado, como máscaras con filtros para vapores orgánicos. Además, se encontró una correlación significativa entre la falta de ventilación adecuada en los talleres y los niveles más altos de exposición a COVs.

## **1.2. Justificación y planteamiento del problema**

### ***1.2.1. Justificación***

Los contaminantes presentes en el aire, especialmente las partículas suspendidas totales (PST), han sido objeto de estudio como posibles desencadenantes del cáncer de pulmón (Meléndez-Gélvez et al., 2016). Estas partículas, que incluyen material particulado de diversos tamaños en suspensión

en el aire, se han vinculado con un aumento en la incidencia de enfermedades pulmonares, cardiovasculares y cáncer (Brunekreef & Holgate, 2002).

Los compuestos orgánicos volátiles (COVs) son un grupo de sustancias químicas que se evaporan fácilmente a temperatura ambiente y pueden tener efectos significativos en la salud humana y el medio ambiente (Guo et al., 2020). La exposición a COVs en entornos laborales y residenciales se ha vinculado con diversos problemas de salud, como irritación ocular y de las vías respiratorias, dolores de cabeza, náuseas y, en casos de exposición prolongada, daños al hígado, riñones y sistema nervioso central (Kim et al., 2019).

El análisis de las concentraciones de COVs en el aire es crucial por varias razones. En primer lugar, una evaluación precisa de la exposición a estos compuestos en el lugar de trabajo es esencial para proteger la salud de los empleados y garantizar el cumplimiento de las normativas de seguridad laboral (Salthammer et al., 2018). Además, los COVs son contaminantes comunes en espacios interiores, por lo que su monitoreo es fundamental para mantener una buena calidad del aire en hogares, oficinas y otros entornos cerrados (Weschler, 2009). Finalmente, estos compuestos también contribuyen a la formación de smog fotoquímico y ozono troposférico, lo que afecta negativamente la calidad del aire exterior (Atkinson, 2000).

### ***1.2.2. Planteamiento del problema***

Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022), las Partículas Suspendidas Totales (PST) son un conjunto de partículas sólidas y líquidas que se encuentran suspendidas en el aire y que pueden ser inhaladas por el ser humano. Estas partículas pueden penetrar en el sistema respiratorio, ocasionando efectos adversos para la salud, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La OMS identifica las principales fuentes de estas partículas como la combustión de combustibles fósiles, la actividad agrícola, la construcción y la minería.

Por otro lado, un estudio de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA, 2020) resalta que, en la Unión Europea, las emisiones de PST provienen mayormente del transporte (terrestre, marítimo y aéreo), la industria con procesos de combustión y la producción de energía. El informe

destaca particularmente el tráfico como una de las principales fuentes de partículas suspendidas en entornos urbanos.

A nivel mundial, un estudio reciente estima que la exposición a partículas suspendidas provocó aproximadamente 4,2 millones de muertes prematuras en todo el mundo en 2015, lo que representa alrededor del 7,6% de todas las muertes a nivel global (Cohen et al., 2017).

Colombia cuenta con un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) que monitorea y reporta los niveles de contaminantes atmosféricos en diferentes ciudades del país. Este sistema utiliza el Índice de Calidad del Aire (ICA) para informar sobre el nivel de contaminación del aire en tiempo real (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2022). El ICA incluye mediciones de partículas suspendidas totales, ozono troposférico (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO) (Resolución 2254, 2017).

Según el Informe Anual de Calidad del Aire 2021, publicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2022), el promedio nacional del ICA fue de 36, lo que se considera un nivel bueno. Sin embargo, algunas ciudades presentaron niveles elevados de PST, los cuales están asociados con efectos adversos para la salud humana, especialmente en poblaciones sensibles como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021).

De acuerdo con Benavides (2019), aunque la ciudad de Pasto se ha caracterizado por tener una buena calidad del aire en comparación con otras ciudades del país, existen zonas donde la contaminación atmosférica es preocupante debido al alto tráfico vehicular. En este sentido, se propone realizar una investigación enfocada en analizar las concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> y la presencia de COV's en el aire, tomando como área de estudio la Calle 18, entre la Carrera 34<sup>a</sup> y la Carrera 35, donde se encuentra la Universidad Mariana. y diversos establecimientos comerciales.

La elección de esta zona se basa en la considerable congestión vehicular que se presenta en el sector, dado que en esta calle se ubica la Universidad Mariana. Esta congestión puede convertirse en un importante foco de contaminación atmosférica. El objetivo principal es evaluar los niveles

de partículas TSP y COVs en el aire para determinar si estos contaminantes superan los límites permisibles establecidos por las normativas ambientales vigentes. A partir de esta evaluación, se propondrán medidas de mitigación y control adecuadas para mejorar la calidad del aire en esta área de la ciudad.

¿Cuál es la concentración de COVs presentes en las partículas respirables TSP captadas en el aire que circula por la calle 18 entre las carreras 34 y 35 en la ciudad de San Juan de Pasto?

### ***1.2.3. Hipótesis***

Las concentraciones de tolueno, como compuesto orgánico volátil (COV), emitido en la calle 18 entre las carreras 34 y 35 en la ciudad de San Juan de Pasto, se sitúan por debajo de los niveles máximos permitidos según la normativa vigente de calidad del aire, establecida en la Resolución 2254 de 2017.

## **1.3. Objetivos**

### ***1.3.1. Objetivo general***

Evaluar la concentración de compuestos orgánicos volátiles presentes en partículas respirables TSP captadas en el aire que circula por la calle 18 entre las carreras 34 y 35 en la Ciudad de San Juan de Pasto.

### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Estandarizar el procedimiento de análisis (COVs) presentes en muestras de TSP a partir de métodos de análisis instrumental.
- Analizar la concentración de tolueno, como compuesto orgánico volátil (COV), en el aire que circula por la calle 18 entre la carrera 34<sup>a</sup> y la carrera 35 de la ciudad de San Juan de Pasto, en relación con los límites establecidos en la normativa vigente de calidad del aire.

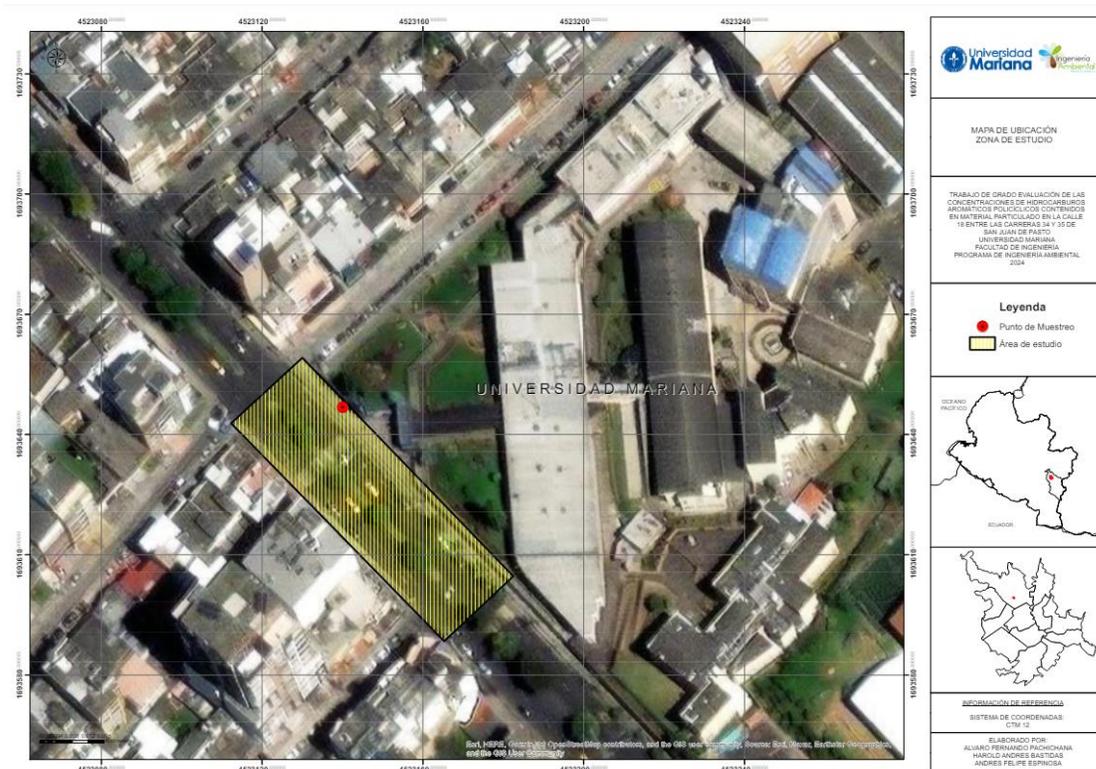
- Establecer la relación entre los niveles de concentración de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y otras variables ambientalmente determinantes.

#### 1.4. Área de estudio

El enfoque de esta investigación abarca la sección de la carrera 18 comprendida entre las calles 34 y 35 en la urbe de San Juan de Pasto. Este tramo se caracteriza por un intenso flujo vehicular, especialmente debido a la presencia de una parada de autobuses en la mitad de la cuadra. Además, es un área de tránsito frecuente para estudiantes, profesores y directivos que ingresan y salen de la Universidad Mariana. Así mismo, entre estas dos vías se encuentra un semáforo peatonal, donde es evidente que los vehículos generan mayores emisiones atmosféricas al arrancar desde cero.

#### Figura 1

Mapa base de ubicación de zona de estudio, Universidad Mariana



## **1.5. Descripción de metodologías**

### ***1.5.1. Estandarización del procedimiento para análisis de TSP y COVs***

**1.5.1.1. Revisión de literatura.** Se llevó a cabo una exhaustiva revisión de la literatura científica y las normativas pertinentes relacionadas con la captura de gases mediante la bomba Accura Criffer 4, así como el análisis de partículas suspendidas totales y COVs en aire mediante cromatografía líquida y cromatografía de gases. A partir de esta revisión, se identificaron los métodos analíticos más apropiados y las mejores prácticas recomendadas por organizaciones internacionales o agencias reguladoras.

**1.5.1.2. Selección de equipos y reactivos.** Para alcanzar nuestro primer objetivo, se empleó una serie de equipos especializados en el análisis de la calidad del aire. Estos incluyeron una bomba de caudal de flujo Accura Criffer 4, un cassette porta filtro de 2 cuerpos, filtros de membrana de ésteres de celulosa y una precisa balanza analítica de la línea SYNERGY LAB. Además, se realizaron ajustes a los equipos de análisis instrumental ubicados en la sede Alvernia de la Universidad Mariana para llevar a cabo análisis detallados de COVs. En este proceso, se consideraron cuidadosamente factores como la sensibilidad, precisión y capacidad de detección de los equipos. Asimismo, se obtuvieron los reactivos necesarios, como hexano y diclorometano, junto con los estándares requeridos para la preparación de muestras y la calibración adecuada del equipo.

**1.5.1.3. Optimización de condiciones cromatográficas.** Se realizó una optimización minuciosa de las condiciones cromatográficas, abordando aspectos como el tipo de columna, fase móvil, temperatura y gradiente de elución. El objetivo fue lograr una separación óptima y una resolución satisfactoria de los analitos de interés. A partir de esta optimización, se llevaron a cabo pruebas y ajustes para mejorar la sensibilidad y selectividad del método.

**1.5.1.4. Desarrollo de procedimientos.** Se procedió a elaborar una documentación del procedimiento de análisis, abarcando cada etapa desde la preparación de muestras hasta la calibración del equipo, las condiciones cromatográficas y el análisis de datos. A partir de esta detallada documentación, se creó una guía de procedimientos que describía paso a paso el proceso de análisis. Esta guía estuvo diseñada para que pudiera ser fácilmente seguida por el personal en futuras investigaciones, garantizando así la consistencia y precisión en la ejecución del procedimiento.

### ***1.5.2. Análisis de partículas TSP y COVs***

**1.5.2.1. Toma de muestras.** Para la recolección de muestras de partículas suspendidas y COVs, se empleó la Bomba de Muestreo Criffer Accura 4 (figura 2), la cual es una unidad portátil alimentada por baterías recargables. Este dispositivo asegura un flujo de aire constante y controlado a través del sistema de muestreo, garantizando la representatividad de las muestras capturadas. La capacidad de la bomba para introducir aire es de 5 litros por minuto.

La bomba Criffer Accura 4 se colocó en la esquina de la Universidad Mariana en la ciudad de Pasto, específicamente en la calle 18 entre las carreras 34 y 35. El muestreo se llevará a cabo durante un mes, abarcando tres días de la semana.

Para la toma de la muestra se emplearon unos filtros de membrana de éster de celulosa con un diámetro de 37 mm. Se pesan los filtros antes y después de la exposición para determinar la carga total de masa de partículas TSP (partículas suspendidas totales) capturadas. Una vez completada la toma de muestra, los filtros se guardaron en un cassette de dos cuerpos y se trasladaron al laboratorio de la Universidad Mariana en Alvernia para su posterior análisis.

**Figura 2**

*Bomba de muestreo Criffer Acura 4*



**1.5.2.2. Preparación de la muestra.** Para la extracción de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), se emplearon equipos de extracción Soxhlet (figura 3). La extracción se llevará a cabo un día después de la toma de muestras, utilizando seis equipos Soxhlet de manera simultánea durante un período de 8 horas. Estos equipos facilitan el proceso mediante la evaporación de un solvente.

**Figura 3**

*Equipo Soxhlet*



Previamente al uso, se procedió a la limpieza de los equipos, evaporando metanol a 180°C en un rotaevaporador (figura 4) en tres ocasiones, seguido por la evaporación de una mezcla de extracción compuesta por diclorometano (DCM) y n-hexano también durante tres ciclos, cada uno de una hora de duración. Posteriormente, se recolectó el cuarto extracto de la mezcla de disolventes de extracción del matraz receptor para su posterior análisis. Los compuestos COVs fueron extraídos de los filtros expuestos utilizando la mencionada mezcla de extracción, la cual fue preparada en el rotaevaporador a una temperatura de 180°C durante una hora. Después de este proceso, las muestras fueron guardadas en tubos y almacenadas bajo refrigeración.

#### **Figura 4**

*Rotoevaporador.*



#### **1.5.2.3. Análisis de las muestras.**

**1.5.2.3.1. Análisis por cromatografía de gases.** Para el análisis de las muestras, se empleó un equipo de cromatografía de gases (GC/MS), el cual desempeñará un papel crucial al permitirnos separar, identificar y cuantificar cada componente individual de la muestra de forma precisa y eficiente.

El análisis en el cromatógrafo se llevará a cabo bajo las condiciones que se muestran en la siguiente tabla. (Tabla 1).

**Tabla 1***Condiciones del cromatógrafo*

Column Oven Temp	40.0 °C
Injection Temp	250.0 °C
Injection Mode	Splitless
Sampling Time	1.00 min
Flow Control Mode	Pressure
Pressure	49.5 kPa
Total Flow	17.5 ml/min
Column Flow	1.32 mL/min
Linear Velocity	29.3 cm/sec
Purge Flow	3.0 mL/min
Split Ratio	10.0

**1.5.2.3.2. Análisis por cromatografía líquida de alta eficiencia.** El análisis por cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC ofrece una alta resolución y sensibilidad para separar e identificar los distintos COV en una muestra. Además, cuando se combina con detectores como UV-Vis, fluorescencia o espectrometría de masas, nos permitirá cuantificar con precisión los niveles de cada COV individual. Se utilizó el equipo HPLC con una matriz de diodos de longitud de onda programable y detectores ultravioleta, las condiciones operativas se presentan en la siguiente tabla. (Tabla 2)

**Tabla 2***Condiciones operativas para cromatografía de HPLC*

Volumen de muestra	20,0 µl
Tiempo de ejecución	25 min
Caudal	1,0 ml/min
Temp. Columna	23 °C

Columna	XDB-C18
Fase móvil	50,0% DCM y 5,00% n-hexano

## 1.6. Diseño experimental

**Tabla 3**

*Diseño experimental*

<b>Variable de respuesta</b>	La concentración de COVs presentes en partículas respirables suspendidas captadas en el aire.
<b>Objetivos</b>	Evaluar la concentración de COVs presentes en partículas respirables TSP captadas en el aire que circula por la calle 18 entre las carreras 34 y 35 en la ciudad de San Juan de Pasto.
<b>Factores</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Jornada</li> <li>Día de la semana</li> </ol>
<b>Niveles de los factores</b>	<p><b>Jornada</b></p> <p>Mañana (7:00 A.M - 12:00 P.M)</p> <p>Tarde (1:00 P.M - 6:00 P.M)</p> <p><b>Día</b></p> <p>Entre semana</p> <p>Sábado</p> <p>Domingo</p>
<b>Tratamientos</b>	$3^1 + 1^1$
<b>Unidad experimental</b>	Calle 18 entre las carreras 34 y 35 en la ciudad de San Juan de Pasto
<b>Confusing factors</b>	<p>Fuentes difusas de COVs</p> <p>Calidad de las muestras tomadas</p> <p>Análisis HPLC</p>

---

	Análisis Cromatografía de gases
<b>Covariables</b>	Concentración de TSP Temperatura ambiente Humedad relativa Velocidad del viento Dirección del viento Presión atmosférica Número de vehículos
<b>Repeticiones</b>	3 repeticiones por muestra

---

### 1.7. Línea de investigación y área temática

Este estudio se enfoca en la línea de investigación ambiental centrada en el diagnóstico de la calidad del aire. El análisis de las concentraciones de COVs proporciona una comprensión detallada de la composición química del aire y sus posibles impactos en la salud humana y el medio ambiente. Estos compuestos, derivados de diversas fuentes como la combustión de combustibles fósiles, pueden tener efectos adversos en la salud respiratoria y cardiovascular, además de contribuir al deterioro de la calidad del agua y el suelo.

Al profundizar en este tema, podemos identificar fuentes de contaminación, evaluar la efectividad de las medidas de control y desarrollar estrategias para mejorar la calidad del aire, promoviendo así entornos urbanos más saludables y sostenibles. Además, este análisis contribuye a la evaluación de políticas y regulaciones ambientales, así como a aumentar la conciencia pública sobre los riesgos asociados con la contaminación atmosférica.

## 2. Resultados y discusión

### 2.1. Estandarización del procedimiento de análisis de TSP y (COVs) en aire a partir de métodos de análisis instrumental

#### 2.1.1. Glosario

**Microfiltración:** Proceso de separación física que utiliza membranas con poros microscópicos para eliminar partículas y microorganismos de un fluido.

**Poros:** Pequeña abertura o espacio vacío en una superficie o material, que permite el paso de líquidos, gases o partículas.

**Fiabilidad:** Grado de consistencia y precisión con el que un instrumento, método o sistema produce resultados repetibles y confiables.

**Condensador:** Dispositivo o aparato diseñado para convertir un gas o vapor en líquido mediante enfriamiento.

**Ionización:** Verbo que describe el proceso por el cual átomos o moléculas ganan o pierden electrones, convirtiéndose en iones con carga eléctrica.

**Fragmentación:** Verbo que se refiere al proceso de dividir o romper algo en partes más pequeñas o fragmentos.

**Termolábiles:** Adjetivo que describe sustancias o compuestos que son sensibles al calor y pueden descomponerse o alterarse cuando se exponen a temperaturas elevadas.

**Volatilización:** Verbo que describe el proceso por el cual una sustancia pasa del estado líquido o sólido al estado gaseoso, generalmente por calentamiento.

**Fluorescencia:** Fenómeno óptico en el que una sustancia absorbe luz de una longitud de onda y emite luz de una longitud de onda más larga (menor energía).

**Neurotoxicidad:** Capacidad de una sustancia para causar efectos adversos en el sistema nervioso, incluyendo el cerebro, la médula espinal y los nervios periféricos.

### *2.1.2. Descripción de equipos*

**Filtros de membrana.** Los filtros de membrana de éster de celulosa se utilizan en la micro filtración para separar partículas en suspensión o microorganismos de fluidos líquidos. Según (Mulder., 1996), estos filtros tienen un tamaño de poro típico de 0.1 a 10  $\mu\text{m}$  y pueden retener partículas, bacterias y algunas proteínas de gran tamaño.

**Bomba Criffer Acura 4.** Bomba de muestreo programable digital, usada para capturar muestras y análisis de agentes químicos. Criffer Accura 4 versión 5.01 incorpora un mecanismo de ajuste de flujo de aire para gestionar la resistencia, garantizando estabilidad mediante un monitoreo y control continuo en tiempo real (Alberto., 2023).

Características:

Pantalla LCD retroiluminada de alto contraste

Filtro de 16,5 mm de diámetro con apertura de 35  $\mu\text{m}$

Rango de flujo de hasta 5,0 L/min

Sistema de compensación de presión de 6,25 kPa o 25 pulgadas H<sub>2</sub>O

Programable en flujo y tiempo, con tasa de muestreo del registrador de datos de 1 a 90 segundos

Batería recargable de Li-Ion de 5400 mAh con indicación de nivel de carga

Modo de carga por entrada USB mini-B de 5 Vdc y 100 mA

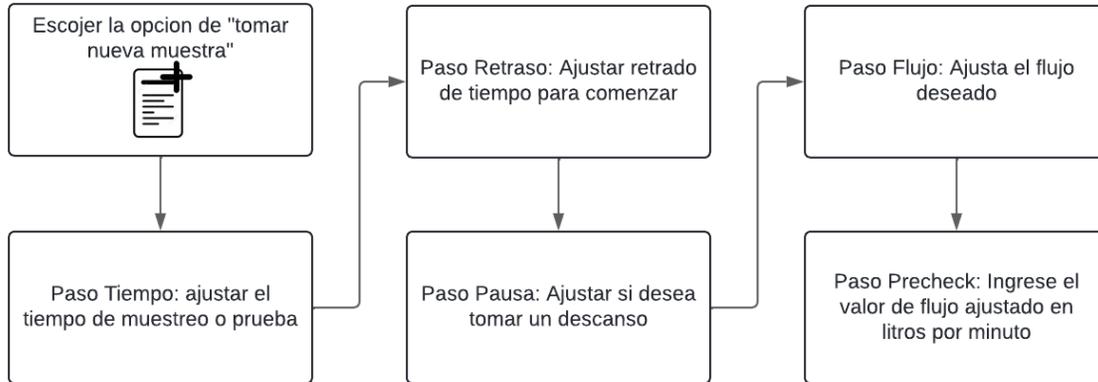
Autonomía de 14 horas

Memoria para 59 mediciones (aproximadamente 18.000 registros)

Dimensiones de 113 x 91 x 54 mm y peso de 363 g.

**Figura 5**

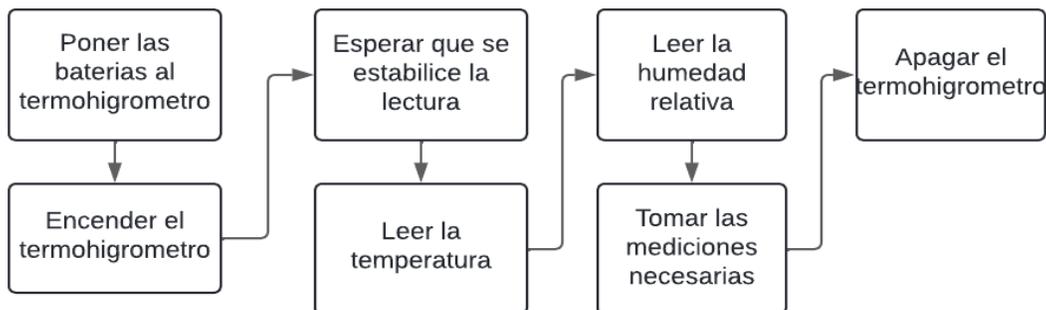
*Diagrama para la calibración del equipo Criffer Acura 4*



**Termohigrómetro.** Se trata de un dispositivo electrónico que, en su forma más elemental, mide y exhibe la temperatura (T) y la humedad relativa (HR) del entorno. Es utilizado para el monitoreo continuo de la temperatura y humedad relativa en entornos exteriores, permitiendo determinar si las condiciones ambientales de un lugar son confortables (JC MEDICAL SUPPLIES., 2024).

**Figura 6**

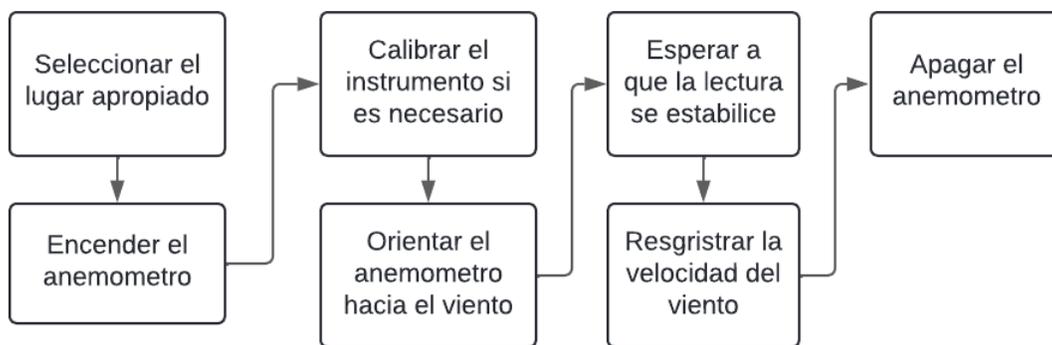
*Diagrama equipo Termohigrómetro*



**Anemómetro.** Este anemómetro ofrece una amplia gama de aplicaciones, desde la comprobación de sistemas de aire acondicionado y calefacción hasta la medición de corrientes de aire, velocidades del viento y temperaturas. Su sonda independiente facilita la medición a distancia, mientras que los impulsores esféricos de baja fricción garantizan la precisión tanto a altas como a bajas velocidades.

**Figura 7**

*Diagrama equipo Anemómetro*

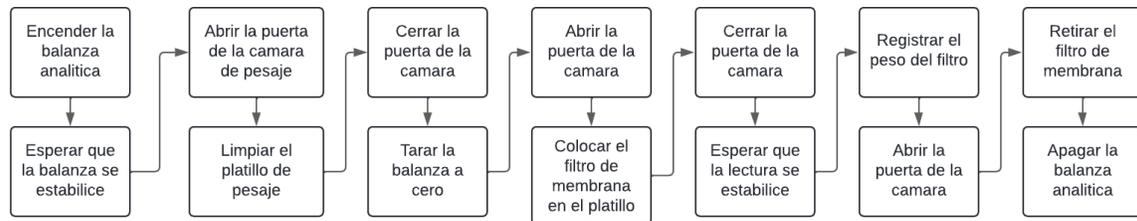


**Balanza Analítica.** La balanza de la serie AS R2 es una balanza analítica estándar de la línea SYNERGY LAB. La AS R2 se caracteriza por una serie de modernas soluciones de diseño y sistema que garantizan la fiabilidad, precisión y exactitud de las mediciones y simplifican el funcionamiento diario.

La balanza está equipada con una pantalla LCD de fácil lectura que ofrece una presentación clara del resultado del pesaje. El acceso directo a las funciones y bases de datos es posible a través de las teclas del teclado. El proceso de pesaje con la balanza analítica se realiza según la siguiente figura (Figura 8).

Figura 8

## Diagrama equipo Balanza Analítica

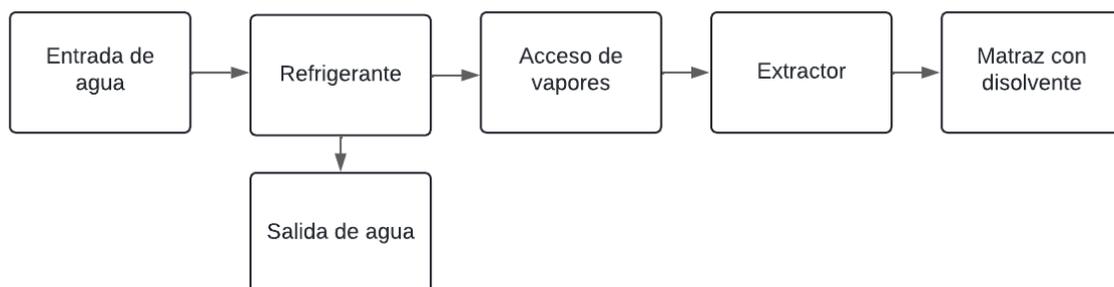


**Equipo Soxhlet.** El equipo Soxhlet consta de tres partes principales: un matraz de fondo redondo, un extractor Soxhlet y un condensador (Skoog, West, Holler, & Crouch., 2014). El sólido cuyo componente se va a extraer se coloca dentro de un cartucho poroso que se introduce en la cámara central del extractor. El disolvente en el matraz se calienta hasta ebullición y sus vapores condensan en el condensador, cayendo gota a gota sobre el cartucho que contiene la muestra sólida (Harris., 2007).

Cuando el nivel del disolvente en el extractor alcanza el conducto lateral, el disolvente con el compuesto extraído retorna al matraz por efecto del sifonaje. Este ciclo se repite continuamente hasta que la extracción es completa (Skoog et al., 2014). El proceso de extracción de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) mediante el método Soxhlet se efectúa siguiendo los pasos ilustrados en la siguiente figura (Figura 9):

Figura 9

## Diagrama extracción de COVs mediante el método Soxhlet



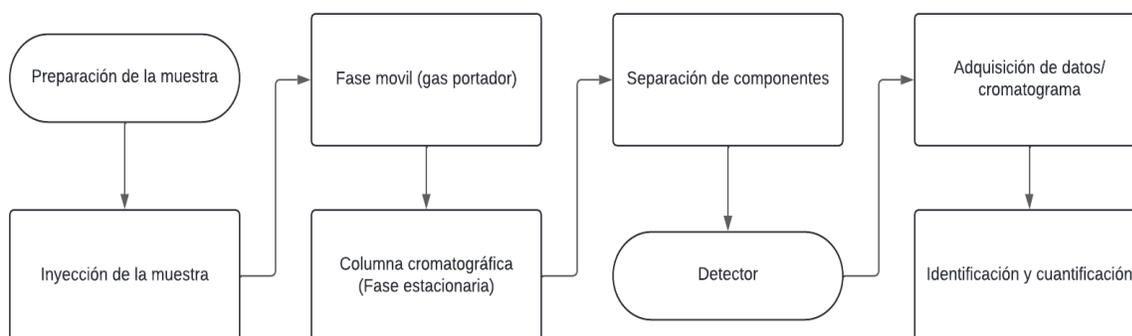
**Cromatografía de gases (GC/MS).** La GC-MS integra dos técnicas: la cromatografía de gases (GC) y la espectrometría de masas (MS). En la GC, la muestra se introduce en una columna capilar y se volatiliza a alta temperatura. Los compuestos se separan basándose en su afinidad con la fase estacionaria de la columna y su punto de ebullición. Posteriormente, los analitos separados entran en el espectrómetro de masas, donde se ionizan y fragmentan. Los iones resultantes se separan según su relación masa/carga y se detectan, produciendo un espectro de masas único para cada compuesto (Skoog et al., 2014).

La GC-MS es especialmente adecuada para detectar COV debido a su alta sensibilidad, selectividad y capacidad para identificar compuestos desconocidos. Además, permite la cuantificación precisa de los COV al comparar las áreas de los picos con patrones de calibración (Martí-Cid et al., 2008).

El análisis por cromatografía de gases se realizó siguiendo el protocolo detallado en la siguiente figura (Figura 10):

**Figura 10**

*Diagrama análisis por cromatografía*



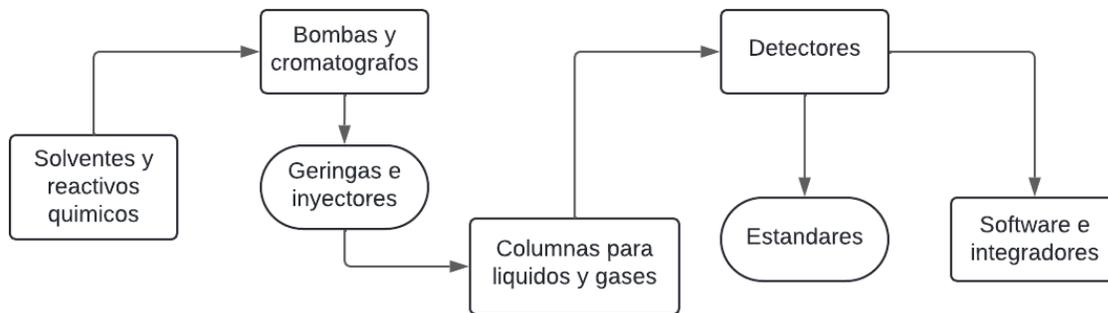
**Cromatografía HPLC.** El término "cromatógrafo HPLC" hace referencia a un sistema de cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC). La HPLC es un potente método analítico utilizado para separar, identificar y cuantificar los componentes de una mezcla. Consta de una fase estacionaria (columna) y una fase móvil, en la que la muestra se inyecta en la fase móvil y los componentes migran a través de la columna debido a su interacción con la fase estacionaria.

La HPLC es especialmente adecuada para el análisis de compuestos no volátiles, iónicos y termolábiles. El equipo de HPLC incluye diversos componentes, como una bomba de gradiente cuaternario, una columna de temperatura controlada, un automuestreador, detectores como PDA y detectores de fluorescencia, así como diversos tipos de columnas para análisis específicos (*DSpace*, s. f.).

El análisis por cromatografía de gases se efectuó mediante el siguiente procedimiento presentado en la siguiente figura (Figura 11):

**Figura 11**

*Diagrama cromatógrafo de gases*



### 2.1.3. Guía de Procedimiento para la Captura de Muestras

Esta guía tiene como objetivo ofrecer una estructura detallada para asegurar la eficiencia y precisión en la captura de muestras, garantizando así la representatividad de los datos que se desean recolectar.

**2.1.3.1. Pesaje del filtro antes y después de tomar la muestra.** Antes de instalar el filtro de membrana de éster en el casete y conectarlo a la bomba, es imprescindible pesar el filtro y llevar a cabo un proceso de secado posterior a la toma de la muestra y antes del pesaje definitivo. Este procedimiento se realiza utilizando una balanza analítica de alta precisión con capacidad para tres decimales, con el fin de determinar con exactitud la masa de las partículas suspendidas recolectadas.

La necesidad de secar el filtro radica en el hecho de que las partículas TSP son higroscópicas, lo que significa que tienen una tendencia a absorber y retener la humedad del aire. Esta humedad adicional puede alterar el peso real de las partículas capturadas en el filtro (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2006).

Al pesar el filtro antes y después del muestreo, se puede calcular la diferencia de masa, lo que representa la cantidad total de partículas suspendidas recolectadas durante el período de muestreo. Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), "la masa de las partículas suspendidas totales se determina a partir de la diferencia entre el peso inicial y final del filtro" (EPA, 2016). Como se indica en la fórmula (1):

$$\text{Masa TSP (g)} = \text{Peso Final (PF)(g)} - \text{Peso Inicial (PI)(g)} \quad (1)$$

Conociendo la masa de partículas recolectadas y el volumen de aire muestreado, es posible calcular la concentración de partículas suspendidas totales en el aire. Según la EPA, "la concentración de TSP se calcula dividiendo la masa neta de partículas recolectadas por el volumen de aire muestreado" (EPA, 2016). Como se presenta en la siguiente fórmula (2):

$$\text{Concentración TSP} : \frac{\text{MASA TSP (g)}}{\text{VOLUMEN DE MUESTREO (L)}} * 1'000.000 \quad (2)$$

El empleo de una balanza analítica de alta precisión resulta fundamental para reducir al mínimo los errores de medición y asegurar la calidad de los datos obtenidos. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), "el pesaje preciso del filtro antes y después del muestreo

es un paso crítico en la determinación de la concentración de partículas en microgramos por litro" (OMS, 2005).

**2.1.3.2. Calibración de la bomba Criffer Acura 4.** La calibración del equipo es un proceso por el cual se ajustan y configuran los parámetros de operación que brinda la versión Acura 4 en su menú, para que funcione de manera óptima y eficiente bajo ciertas condiciones operativas específicas, es necesario seguir paso a paso la (Figura 7).

En este caso, la bomba fue configurada para un tiempo de muestreo estimado de 6 horas, ya que este período permite obtener una visión más completa de las fluctuaciones en las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) a lo largo del tiempo. Según Harper (2000), "los períodos de muestreo más largos pueden capturar variaciones en las emisiones de COVs que podrían pasarse por alto con tiempos de muestreo más cortos". A partir del flujo de aire de la bomba y del tiempo de muestreo se obtiene el volumen de muestreo siguiendo la siguiente fórmula (3):

$$\text{Volumen de muestreo: Flujo de aire (L/min.)} * \text{Tiempo de muestreo (min.)} \quad (3)$$

Además, un período de muestreo más prolongado permite recolectar un mayor volumen de aire, lo que puede aumentar la sensibilidad analítica para detectar COVs en bajas concentraciones. Como señala Woolfenden (2010), "los tiempos de muestreo más largos pueden mejorar los límites de detección para compuestos trazados".

Y para el caudal de muestreo primero se utilizó un caudalímetro Criffer CR4 para tener más precisión al momento de configurar la bomba, este es un dispositivo de medición de flujo ultrasónico no invasivo. Estos medidores utilizan ondas sonoras para determinar la velocidad del fluido, calculando así el caudal (Baker, 2016). Luego se configuró la bomba a 2 L/min de acuerdo con el Método de Referencia de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para el muestreo de partículas suspendidas totales (TSP), "El caudal de muestreo típico para el muestreador de partículas de alto volumen es de aproximadamente 1,1 a 1,7 m<sup>3</sup>/min" (EPA, 1999, p. 4). Según el libro "Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants", los autores mencionan: "Para el muestreo de partículas en el aire ambiente, se utilizan comúnmente

caudales de muestreo de 1 a 2 L/min" (Cohen & Hering, 1995, p. 83). A continuación, se presenta una imagen del caudalímetro.

### Figura 12

#### Caudalímetro



**2.1.3.3. Instalacion de la bomba Criffer Acura 4.** Después de calibrar la bomba, se procede a instalar el equipo a una altura de 2 metros, siguiendo las normativas y protocolos establecidos por la EPA. Esta altura de instalación se recomienda según las directrices de la EPA (2014), que sugieren colocar la bomba de muestreo a una altura específica, generalmente entre 1.5 y 2 metros, dependiendo del propósito del muestreo. Instalar la bomba a una altura de 2.5 metros también contribuye a prevenir posibles interferencias que podrían afectar la precisión de la muestra, tales como obstrucciones cercanas al suelo, fuentes de contaminación localizadas o turbulencias de aire (Vallero, 2014).

**2.1.3.4. Preparación de la muestra.** Para la extracción de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), se ha adoptado un método de referencia para la extracción de Cov's de suelos y sedimentos, según lo descrito por Von Lau et al. (2010). Los detalles de este método se encuentran resumidos en la siguiente tabla. (Tabla 3).

**Tabla 4***Metodología para la preparación de la muestra*

<b>Montaje del equipo Soxhlet</b>	<b>Extracción</b>	<b>Recuperación del extracto</b>
Colocar el filtro en el cuerpo principal del extractor Soxhlet.	Añadir hexano al matraz Calentar el matraz para hacer hervir el disolvente.	Una vez finalizado el tiempo de extracción, retirar el matraz con el disolvente que contiene los COVs extraídos.
Agregar perlas de vidrio en la parte superior del cartucho para evitar turbulencias durante la ebullición.	El disolvente se acumulará en el cartucho hasta que alcance el nivel del sifón interior y entonces será conducido de vuelta al matraz, repitiendo el ciclo.	Evaporar el disolvente utilizando un evaporador rotatorio para concentrar el extracto.
Ensamblar el extractor Soxhlet con un matraz de fondo redondo y un condensador de reflujo.	Dejar que el proceso de extracción continúe durante un tiempo adecuado, generalmente entre 8 y 10 horas.	Reconstituir el extracto concentrado con hexano para su posterior análisis.

**2.1.3.5. Análisis de la muestra por cromatografía de gases.** Para la identificación de COV mediante cromatografía de gases, se utilizó un cromatógrafo de gases (Figura 13) equipado con una columna Agilent DB-EUPAH de 20 m x 0.18 mm x 0.25  $\mu$ m. Se empleó un estándar de 16 COVs de Restek, y el análisis se realizó bajo las siguientes condiciones cromatográficas:

Inyección de 1  $\mu$ L en modo splitless a 320°C

Programa de temperatura: 45°C (0,8 min) - 45°C/min a 200°C - 2,5°C/min a 225°C - 3°C/min a 266°C - 5°C/min a 300° C - 10°C/min a 320°C (4,5 min)

Gas portador Helio a 20  $\mu$ L/min.

Temperatura del inyector 250°C

Patrón interno Ciclopentano: 1000 ppm (mg/L)

### Figura 13

*Cromatógrafo de gases*



De los resultados obtenidos por el cromatógrafo, se toma el área de cada compuesto para obtener su respectiva concentración, teniendo en cuenta la siguiente fórmula (4):

$$\text{Concentración} = \frac{(\text{Área del compuesto}) * (\text{Área del patrón interno})}{\text{Patrón interno (1000 ppm)}} \quad (4)$$

**2.1.3.6. Análisis de la muestra por HPLC.** Para el análisis se utilizó el equipo HPLC con una matriz de diodos de longitud de onda programable y detectores ultravioleta bajo las siguientes condiciones operativas:

Volumen de muestra = 20,0 µl

Tiempo de ejecución = 25 min

Caudal = 1,0 ml/min

Temperatura de columna = 23 °C

Columna = XDB-C18

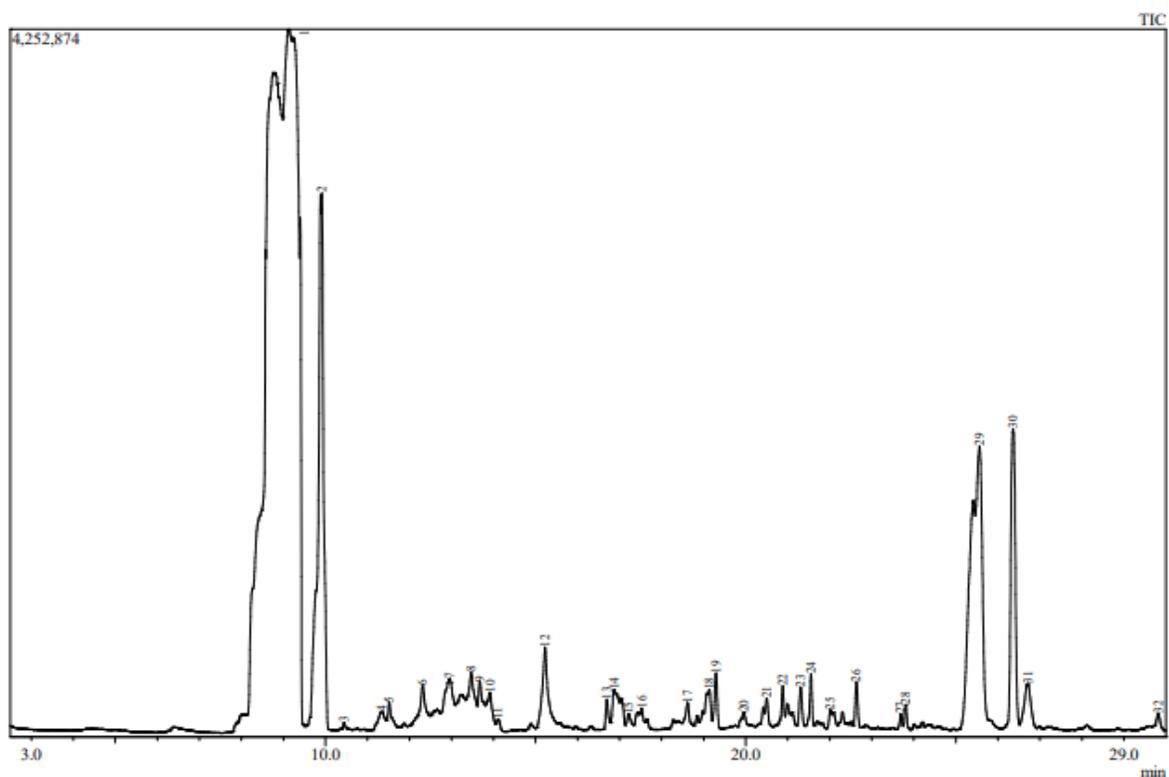
Fase móvil = 50,0% DCM y 5,00% n-hexano

#### 2.1.4. Validación del procedimiento

**2.1.4.1. Prueba número 1 GC/MS.** La prueba 1 de estandarización se realizó fuera de la Universidad Mariana durante 6 horas, con un caudal de 1.60 L/min según los estándares previamente mencionados. A continuación, se presentan los resultados.

#### Figura 14

Gráfica muestra 1



**Figura 15***Resultados muestra 1*

Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	Name
1	9.138	216982356	68.73	4169731	27.69	Hexane (CAS)
2	9.915	29862054	9.46	3205122	21.28	Cyclopentane, methyl- (CAS)
3	10.445	103634	0.03	36460	0.24	Cyclopentene, 4-methyl-
4	11.344	548426	0.17	61688	0.41	Hexanal
5	11.518	331243	0.10	91015	0.60	Heptane
6	12.314	1188987	0.38	182078	1.21	Cyclohexane, methyl- (CAS)
7	12.960	1727733	0.55	170142	1.13	Hexadecanoic acid, methyl ester
8	13.469	783359	0.25	157024	1.04	2(3H)-Furanone, 5-methyl- (CAS)
9	13.675	546976	0.17	140280	0.93	2-Hexanone (CAS)
10	13.915	526853	0.17	109746	0.73	Hexanal
11	14.107	198410	0.06	45414	0.30	Cyclotrisiloxane, hexamethyl- (CAS)
12	15.227	4118871	1.30	469351	3.12	Cyclopentasiloxane, decamethyl- (CAS)
13	16.696	162607	0.05	73715	0.49	Cyclotetrasiloxane, octamethyl-
14	16.873	2511007	0.80	194770	1.29	Cyclotetrasiloxane, octamethyl- (CAS)
15	17.214	285856	0.09	63570	0.42	2,3-Dioxabicyclo[2.2.1]heptane, 1-methyl-
16	17.523	701650	0.22	85467	0.57	2,4-Nonadienal, (E,E)-
17	18.616	635842	0.20	128411	0.85	Benzaldehyde, 2,5-bis[(trimethylsilyl)oxy]- (C
18	19.132	1024474	0.32	127562	0.85	Nonanal
19	19.294	1220193	0.39	303913	2.02	Cyclopentasiloxane, decamethyl- (CAS)
20	19.951	449121	0.14	74812	0.50	2-Nonenal, (E)- (CAS)
21	20.501	1052596	0.33	162960	1.08	DIHYDRO LINALOOL
22	20.881	1234088	0.39	213665	1.42	Cyclohexasiloxane, dodecamethyl-
23	21.307	1057957	0.34	230906	1.53	2-Decenal, (E)-
24	21.553	1084598	0.34	306231	2.03	Cyclohexasiloxane, dodecamethyl-
25	22.012	824572	0.26	109118	0.72	Triacetin
26	22.638	1110411	0.35	267798	1.78	2-Undecenal (CAS)
27	23.690	252342	0.08	77228	0.51	Cycloheptasiloxane, tetradecamethyl-
28	23.808	301658	0.10	110047	0.73	Cycloheptasiloxane, tetradecamethyl-
29	25.564	28539794	9.04	1561451	10.37	9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester (CAS)
30	26.361	13207380	4.18	1786995	11.87	Diethyl Phthalate
31	26.718	2601388	0.82	253417	1.68	Methyl stearate
32	29.816	504182	0.16	89107	0.59	Cyclononasiloxane, octadecamethyl-
		315680618	100.00	15059194	100.00	

Los resultados obtenidos mediante análisis cromatográfico presenta una serie de parámetros clave que proporcionan información detallada sobre los compuestos detectados en la muestra. Estos parámetros incluyen:

**Peak# (Número de pico):** Identifica secuencialmente cada compuesto detectado en el cromatograma.

**R.Time (Tiempo de retención):** Medido en minutos, indica el tiempo que tarda cada compuesto en atravesar la columna cromatográfica.

**Area (Área):** Cuantifica la superficie bajo cada pico cromatográfico, ofreciendo una medida de la cantidad relativa de cada compuesto.

Area% (Porcentaje de área): Expresa el área de cada pico como porcentaje del área total, reflejando la abundancia relativa de cada compuesto en la muestra.

Height (Altura): Mide la altura máxima de cada pico, proporcionando otra perspectiva sobre la cantidad del compuesto.

Height% (Porcentaje de altura): Representa la altura de cada pico como porcentaje de la altura total, ofreciendo una visión alternativa de la abundancia relativa.

El área del pico cromatográfico es ampliamente reconocida como el método preferido para analizar la concentración de compuestos en cromatografía debido a su mayor precisión y representatividad (McNair et al., 2019). Esta medida integra toda la señal producida por el compuesto a lo largo del tiempo, lo que la hace más robusta frente a fluctuaciones experimentales y más precisa para picos asimétricos o de diferentes anchuras (Dettmer-Wilde & Engewald, 2014).

En la muestra analizada, se identificaron varios compuestos notables. El metilciclopentano, con un 9.46%, es el segundo compuesto más abundante. Speight (2017) lo menciona como un componente común en combustibles y solventes industriales. Lim et al. (2014) asocian este compuesto con emisiones vehiculares y su capacidad para contribuir a la formación de ozono troposférico, lo que sugiere que el tráfico vehicular podría ser una fuente importante de compuestos orgánicos volátiles (COV) en la región estudiada.

También se detectó la presencia del ácido 9-octadecenoico (Z)-, éster metílico (9.04%), conocido como oleato de metilo, un éster de ácido graso insaturado. Gunstone (2009) señala su uso en la industria cosmética y como lubricante biodegradable, mientras que Knothe (2008) destaca su potencial como componente de biodiésel, lo que podría indicar fuentes de biocombustibles en el área. Sin embargo, Lechner et al. (2020) advierten sobre la toxicidad potencial de los ésteres metílicos de ácidos grasos para los organismos acuáticos, lo que plantea preocupaciones ambientales.

El ftalato de dietilo (4.18%) también fue identificado, un plastificante ampliamente utilizado según Heudorf et al. (2007). Su presencia puede ser indicativa de contaminación por plásticos o productos que lo contienen. Latini et al. (2004) señalan los posibles efectos disruptores endocrinos del ftalato de dietilo, en particular para poblaciones vulnerables, aunque Cao (2010) argumenta que su toxicidad es relativamente baja en comparación con otros ftalatos.

Por último, se encontró ciclohexasiloxano, dodecametil- (0.73%). Wang et al. (2013) lo relacionan con productos de cuidado personal, y Xu et al. (2019) destacan su persistencia ambiental y capacidad de bioacumulación. No obstante, Dekant y Klaunig (2016) concluyen, basándose en estudios toxicológicos, que los siloxanos cíclicos representan un bajo riesgo para la salud humana en las concentraciones típicamente presentes en el ambiente.

## 2.2. Análisis Concentración de COVs y TSP

Es importante destacar que se realizaron un total de 15 muestreos, de los cuales 4 fueron analizados correctamente mediante cromatografía. Sin embargo, los resultados de las 11 muestras restantes fueron nulos debido a irregularidades y fallas presentadas en el cromatógrafo de gases del Laboratorio de Química de la Universidad Mariana, sede Alvernia, tal como se detalla en el anexo 5, titulado 'Resultados de muestras nulas'. A continuación, se presenta la tabla de las fechas de muestreo (tabla 5) y la correlación que se usó para el análisis de las muestras. (tabla 6).

**Tabla 5**

*Fechas de muestreo*

Muestra	Fecha	Tiempo
M1	30/04/2024	6h
M2	04/05/2024	6h
M3	09/05/2024	6h
M4	11/05/2024	6h

**Tabla 6***Mapa de color de correlación de COVs y TSP*

Correlación	Concentración PM ( $\mu\text{g} / \text{L}$ )
Concentración PM ( $\mu\text{g} / \text{L}$ )	1
Hexano	0,8776
Ciclopentano, methyl	N/A
Ciclopentano, 4-methyl	0,9138
Heptane	0,8777
Ciclohexano	0,8566
Acetona	0,8561
Nonanal	0,8759
2-Decenal	0,8745
2-Undecenal	0,8813
2,4-Decadienal	-0,1974
Tolueno	0,0976

**Tabla 7***Escala de colores para mapa de correlación*

Intensidad de correlación	Para valores Negativos	Para valores Positivos
Nula	0.0-0.1	0.0-0.1
Baja	0.1-0.3	0.1-0.3
Medio	0,3-0,6	0,3-0,6
Alta	0,6-0,8	0,6-0,8
Fuerte	0,8-0,99	0,8-0,99

### ***2.2.1. Cyclopentano, 4 methyl***

Se observa que la concentración de ciclopentano 4-metil está directamente relacionada con las concentraciones de partículas suspendidas totales (PST) en el aire, con una fuerte correlación de 0.91. Posiblemente el ciclopentano 4-metil podría ser un indicador confiable de la presencia de PST en el aire. Las PST abarcan una variedad de contaminantes sólidos y líquidos suspendidos en la atmósfera, con diversos orígenes, tanto naturales como antropogénicos (World Health Organization [WHO], 2021). Es posible que tanto el ciclopentano 4-metil como las PST provengan de fuentes comunes, como emisiones de vehículos o actividades industriales (Zhang et al., 2017).

### ***2.2.2. Heptano***

Se observa que la concentración de Heptano está directamente relacionada con las concentraciones de partículas suspendidas totales (PST) en el aire, con una correlación fuerte de 0.87, Tanto el heptano como las partículas suspendidas totales (PST) pueden tener fuentes comunes en entornos urbanos, siendo los vehículos una fuente significativa de compuestos orgánicos volátiles (COV), incluidos el heptano y las partículas (Gentner et al., 2017). La combustión incompleta de combustibles fósiles en motores de gasolina y diésel genera emisiones de heptano y contribuye a la formación de PST. Además, la presencia de heptano puede estar vinculada al tránsito vehicular en las inmediaciones de la universidad, ya que este compuesto, presente en la gasolina, puede liberarse al ambiente a través de la evaporación durante el repostaje o desde vehículos estacionados (Wang et al., 2021). Por último, las PST pueden actuar como superficies de adsorción para compuestos orgánicos como el heptano, lo que afecta su distribución en el aire y podría influir en la correlación observada (Pöschl & Shiraiwa, 2015).

### ***2.2.3. Ciclohexano***

La correlación fuerte observada entre el ciclohexano y PST (0,85) indica que, aunque existe una tendencia a que las concentraciones de ciclohexano y partículas suspendidas totales (PST) aumenten o disminuyan de manera simultánea, el principal factor que podría explicar esta correlación fuerte es el tráfico vehicular. Este es una fuente significativa tanto de compuestos

orgánicos volátiles, como el ciclohexano, como de partículas suspendidas, lo que lo convierte en un factor contribuyente importante (Martínez et al., 2024). La intensidad del tráfico en las inmediaciones del campus universitario probablemente influye en ambos contaminantes al mismo tiempo.

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos en entornos urbanos similares. Por ejemplo, Chen y Wong (2021) reportaron correlaciones de entre 0.48 y 0.62 para varios compuestos orgánicos volátiles y PST en áreas urbanas de alta densidad.

El estudio hecho por Chen y Wong (2021) reveló los siguientes patrones:

**Variaciones diurnas:** Se observaron picos en las concentraciones de ambos contaminantes durante las horas punta de tráfico (7:00-9:00 y 17:00-19:00), lo que refuerza la hipótesis de la influencia del tráfico vehicular.

**Variaciones semanales:** Las concentraciones fueron generalmente más bajas durante los fines de semana, coincidiendo con la reducción de actividades en el campus y sus alrededores.

**Tendencias mensuales:** Se registró un leve aumento en las concentraciones durante el mes más cálido del estudio, posiblemente debido a una mayor volatilización del ciclohexano y a la resuspensión de partículas.

#### **2.2.4. Acetona**

Los resultados del estudio muestran una fuerte correlación positiva (0.85) entre los niveles de acetona y PST en las muestras de aire analizadas. Esta correlación sugiere que ambos contaminantes tienden a aumentar o disminuir juntos, lo que podría indicar fuentes comunes o procesos atmosféricos relacionados. Tanto la acetona como las PST pueden originarse de fuentes similares en el entorno universitario. En este caso se los relaciona con las emisiones vehiculares, que son una fuente común de PST, también pueden contribuir a la presencia de acetona en el aire (Guo et al., 2020).

### **2.2.5. Nonanal**

La correlación entre las partículas PM y el nonanal es directamente proporcional, con un valor de 0.8759, lo que indica una fuerte relación entre ambos. Tanto las partículas PM como el nonanal pueden tener su origen en procesos de combustión y actividades industriales. Wang et al. (2020) encontraron una correlación positiva entre los niveles de PM<sub>2.5</sub> y diversos compuestos orgánicos volátiles (COV), incluidos los aldehídos, en áreas urbanas.

Por su parte, Algrim y Ziemann (2016) demostraron que los aldehídos, como el nonanal, pueden absorberse en la superficie de partículas orgánicas atmosféricas, lo que sugiere una posible interacción física entre las PM y el nonanal. Además, ambos contaminantes pueden formarse secundariamente a través de reacciones fotoquímicas en la atmósfera. Liu et al. (2019) observaron que la formación de aerosoles orgánicos secundarios, una forma de PM, está relacionada con la oxidación de COV precursores.

### **2.2.6. Decenal (E)**

La correlación entre las partículas PM y el 2-Decenal (E) es directamente proporcional, con un valor de 0.8745, lo que indica una relación fuerte entre ambos. Tanto las partículas PM como el 2-Decenal (E) pueden originarse a partir de procesos de combustión y actividades industriales. Schnelle-Kreis et al. (2007) identificaron varios aldehídos, incluidos compuestos similares al 2-Decenal, en partículas de aerosol urbano.

Los aldehídos insaturados, como el 2-Decenal (E), pueden contribuir a la formación de aerosoles orgánicos secundarios (AOS), una forma de PM. Hamilton et al. (2011) demostraron que los aldehídos de cadena larga participan en reacciones que promueven la formación de AOS. Además, Liu et al. (2019) observaron que la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COV), incluidos los aldehídos, puede generar compuestos de baja volatilidad que contribuyen a la masa de PM<sub>2.5</sub>.

### **2.2.7. Undecenal**

La correlación entre las partículas PM y el 2-Undecenal es directamente proporcional, con un valor de 0.88126, lo que indica una relación fuerte entre ambos. Tanto las partículas PM como el 2-Undecenal pueden tener su origen en procesos naturales y antropogénicos. Ciccioli et al. (2014) identificaron aldehídos de cadena larga, incluidos compuestos similares al 2-Undecenal, tanto en emisiones vegetales como en aerosoles atmosféricos.

Los aldehídos insaturados, como el 2-Undecenal, pueden contribuir a la formación de aerosoles orgánicos secundarios (AOS), que constituyen una forma de partículas PM. Chacon-Madrid y Donahue (2011) demostraron que los aldehídos de cadena larga pueden participar en reacciones que favorecen la formación de AOS.

### **2.2.8. Decadienal (E,E)**

La correlación negativa sugiere que, en general, cuando la concentración de PM aumenta, la concentración de decadienal, (E,E) tiende a disminuir ligeramente, y viceversa. Sin embargo, la relación es débil, lo que indica que otros factores probablemente tienen una influencia más significativa en las concentraciones de ambos compuestos.

El decadienal, (E,E) es un compuesto orgánico volátil (COV) que se encuentra comúnmente en emisiones de cocina y en algunos procesos industriales. Según Fullana et al. (2004), este compuesto se forma durante la degradación térmica de los lípidos y es uno de los principales responsables del aroma característico de los alimentos fritos.

La baja correlación podría explicarse por las diferentes fuentes de emisión de PM y decadienal, (E,E). Mientras que el PM puede provenir de una variedad de fuentes, incluyendo el tráfico, la industria y la combustión de biomasa (Kim et al., 2015), el decadienal, (E,E) está más asociado con actividades específicas como la cocina (Abdullahi et al., 2013).

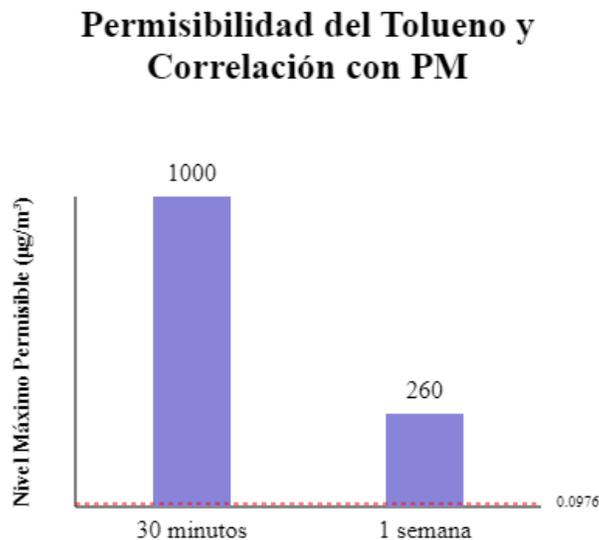
Aunque la correlación es baja, la presencia de decadienal, (E,E) en el aire puede ser un indicador de la contribución de las emisiones de cocina a la contaminación del aire urbano. Estudios como el de Klein et al. (2016) han demostrado que las emisiones de cocina pueden ser una fuente significativa de partículas finas en ambientes urbanos.

### 2.2.9. Tolueno

La correlación entre las Partículas Suspendidas Totales (PST) y el tolueno es directamente proporcional, con un valor de 0.0975, lo que indica una relación nula entre ambos. Esta falta de correlación es consistente con hallazgos previos. Por ejemplo, un estudio realizado por Khoder (2017) en El Cairo, Egipto, encontró que las correlaciones entre los compuestos orgánicos volátiles (COV), incluyendo el tolueno, y las PST eran generalmente débiles, sugiriendo fuentes de emisión diferentes para estos contaminantes. A continuación se presenta la gráfica de permisibilidad del tolueno y la correlación con PST.

#### Figura 16

Niveles máximos permisibles de Tolueno y su correlación con PST



Según los niveles máximos permisibles de tolueno establecidos por la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente, los límites son de 1000 µg/m<sup>3</sup> para 30 minutos y 260 µg/m<sup>3</sup> para 1

semana. Basándonos en estos valores, se realizó la conversión correspondiente para un período de muestreo de 6 horas, obteniendo un valor permisible de  $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El procedimiento utilizado fue el siguiente:

$$\log(C) = \log(C1) + [\log(C2/C1) \times \log(t/t1)] / \log(t2/t1)$$

Donde:

**C** = Concentración a calcular

**C1** =  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (concentración a 0.5 horas)

**C2** =  $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (concentración a 168 horas)

**t** = 6 horas (tiempo objetivo)

**t1** = 0.5 horas

**t2** = 168 horas

$$\log(C) = \log(1000 \mu\text{g}/\text{m}^3) + [\log(260 \mu\text{g}/\text{m}^3/1000 \mu\text{g}/\text{m}^3) \times \log(6 \text{ h}/0.5 \text{ h})] / \log(168 \text{ h}/0.5 \text{ h}) =$$
$$450 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

De acuerdo con lo anterior, podemos afirmar que los niveles de correlación del tolueno, que están en 0.0976, se encuentran por debajo de los estándares establecidos por la Resolución 2254 de 2017.

### **2.3. Relación entre los niveles de concentración de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y otras variables ambientalmente determinantes**

Para entender la relación entre los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y las variables ambientales, se llevó a cabo un análisis de correlación de tipo Pearson. Esta prueba es útil para evaluar cómo se relacionan estadísticamente dos variables continuas. En el caso de la presente investigación, se utilizaron las concentraciones de los compuestos obtenidos en las cuatro muestras.

**Tabla 8***Mapa de color de correlación Pearson de COVs con otras variables*

	Temperatura (°c)	Humedad (%)	Vel. Viento (m/seg)	Concentración PM (µg / L)	Motos	Carreros	Pesados
Temperatura (°c)	1						
Humedad (%)	-0,41701	1					
Vel. Viento (m/seg)	-0,9615	0,4459	1				
Concentración PM (µg / L)	-0,5868	-0,1937	0,3646	1			
Motos (prom.)	0,1064	0,6869	0,0953	-0,8305	1		
Carros (prom.)	0,0434	0,7706	0,1349	-0,7660	0,99	1	
Pesados (prom.)	0,1719	0,6881	0,0168	-0,8431	0,99	0,99	1
Hexano	-0,7823	-0,2073	0,6670	0,8776	-	-	-
Cyclopentane, methyl	0	0	0	0	0,67	0,64	0,73
Cyclopentene, 4-methyl	-0,7812	-0,1764	0,6454	0,9138	72	64	37
Heptane	-0,7809	-0,2096	0,6656	0,8777	-	-	-
Ciclohexano	-0,79918	-0,1913	0,6945	0,8566	0,69	0,65	0,74
					74	72	76
					-	-	-
					0,67	0,64	0,73
					85	79	51
					-	-	-
					0,64	0,61	0,70
					76	87	75

					-	-	-
Acetona	-0,6299	-0,4219	0,5173	0,8561	0,78	0,77	0,83
					37	47	67
Nonanal	-0,7796	-0,2130	0,6651	0,8759	0,67	0,64	0,73
					87	87	55
2-decenal	-0,7804	-0,2125	0,6667	0,8745	0,67	0,64	0,73
					70	72	40
2-undecenal	-0,7846	-0,2010	0,6673	0,8813	0,67	0,64	0,73
					73	53	34
2,4-decadial	0,8823	-0,3959	-0,9768	-0,1974	0,20	0,22	0,11
					52	09	87
Tolueno	0,1529	0,5125	-0,3205	0,0976	0,08	0,18	0,16
					34	14	12

**Tabla 9**

*Escala de colores para mapa de correlación*

Intensidad de correlación	Para valores Negativos	Para valores Positivos
Nula	0.0-0.1	0.0-0.1
Baja	0.1-0.3	0.1-0.3
Medio	0,3-0,6	0,3-0,6
Alta	0,6-0,8	0,6-0,8
Fuerte	0,8-0,99	0,8-0,99

### **2.3.1. Ciclopenteno, 4-metil**

El análisis de correlación indicó una alta correlación negativa ( $r = -0,78$ ) entre la concentración de ciclopentano, 4-metil y la temperatura. La relación inversa que hemos observado sugiere que la concentración de este compuesto orgánico volátil (COV) tiende a disminuir de manera significativa a medida que la temperatura ambiental aumenta. Esto puede deberse a que, a temperaturas elevadas, el ciclopentano es más volátil y los iones positivos y negativos dan sus electrones con mayor facilidad. Esto se refleja en la literatura, donde los estudios demuestran que la volatilización de COVs aumenta con el aumento de la temperatura (Sahu & Saxena, 2015), lo que justifica fumigación más rápida. De manera alterna, este resultado podría demostrar que el clima en temperaturas más bajas favorece la formación o acumulación del compuesto (Hellén et al., 2018).

Por otro lado, la correlación indica una relación negativa en un rango bajo entre este contaminante y la humedad ( $r = -0,176$ ). La correlación débil significa que la humedad solo tiene un pequeño impacto en la concentración de ciclopenteno, 4-metil, es decir, la humedad en este caso afecta no tan significativamente la concentración de COVs. Dado que la correlación es significativamente más baja que para la temperatura,  $r = -0,78$ , la temperatura será el factor principal que tendrá el efecto más significativo en el comportamiento del alimento. Dado que hay estudios previos que muestran diferentes correlaciones con respecto a la humedad y diferentes COVs, se puede esperar la correlación débil con la humedad, (Gu et al., 2019).

El análisis de correlación encontró una relación media positiva ( $r = 0,645$ ) entre la concentración de ciclopenteno, 4-metil y la velocidad del viento, lo que indica que las concentraciones más altas de este compuesto orgánico volátil (COV) tienden a estar relacionadas con velocidades del viento más altas. La correlación negativa con la temperatura ( $r = -0,781$ ) y la correlación débil con la humedad ( $r = -0,176$ ) contrastan con esta correlación positiva. La fuerte correlación entre la velocidad del viento confirma estudios anteriores que han demostrado la importancia de los factores meteorológicos, especialmente el viento, para la dispersión y concentración de COV en entornos urbanos (Cerón et al., 2014). La concentración de ciclopenteno-4-metil aumenta a mayor velocidad del viento. Esto puede ser el resultado de una variedad de variables, como el transporte

a larga distancia, la resuspensión de partículas o el aumento de la volatilización en la superficie (Filella y Peñuelas, 2006).

La presencia continua de vehículos de motor presenta ciclopenteno 4-metil, que no acusa valores sólidos de magnitud negativa. Las cifras para motocicletas, automóviles y vehículos pesados dieron como resultado (-0,697), (-0,65) y (-0,748), respectivamente. Varios factores atmosféricos y químicos podrían ser la razón de esta relación negativa. Por un lado, el incremento del conjunto de tráfico puede causar turbulencias, lo que fomenta la dispersión de contaminantes, lo que conduce a una reducción de las concentraciones locales de COV (Zhang et al., 2020). Sin embargo, el ciclopenteno-4-metil puede participar en reacciones fotoquímicas con contaminantes adicionales que también se emiten por los vehículos de motor, LOx, y esto puede ser la razón de su descenso como una respuesta a un aumento en el tráfico (Seinfeld & Pandis, 2016).

### **2.3.2. Heptano**

Como puede verse en la tabla de correspondencias, entre el heptano y la temperatura hay una correlación negativa bastante alta,  $r = -0,78$ . Esta relación concuerda con los estudios previos de la conducta de los compuestos orgánicos volátiles en varios ambientes. En este caso, la proporción inversa implica que la concentración de heptano en el aire disminuye con la temperatura. Los procesos de volatilización y reactividad atmosférica del heptano pueden explicar este fenómeno. De acuerdo con Alghamdi et al. (2021), las altas temperaturas tienen el potencial de acelerar las reacciones fotoquímicas que descomponen el heptano en la atmósfera, lo que resulta en una disminución de su concentración. Además, Kumar et al. (2023) descubrieron que la combustión incompleta en motores fríos provoca temperaturas más bajas en las emisiones de heptano de fuentes antropogénicas.

La tabla muestra una correlación negativa de bajo rango (-0,21) entre el heptano y la humedad, al igual que la correlación entre la temperatura. Se refiere a una relación inversa débil entre las variables. Aunque no es significativa, esta afirmación se confirma con los hallazgos de los recientes estudios que involucraron la humedad y compuestos orgánicos volátiles. Además, según Liu et al. en 2020, la humedad afecta la distribución y transformación de los COV en la atmósfera, y el efecto

es diferente para varios compuestos. Yan et al. en 2022 afirmó que “una humedad relativa puede acelerar la evolución de aerosoles orgánicos secundarios a partir de precursores usando la química represiva para hacer que los compuestos volátiles orgánicos, incluido el heptano, sean inadecuados”.

La tabla de correlación muestra que el heptano también tiene una fuerte correlación positiva con la velocidad del viento. En otras palabras, la cantidad de heptano aumenta con la velocidad del viento. De hecho, el descubrimiento se basa en investigaciones recientes sobre compuestos orgánicos volátiles en áreas urbanas. Por ejemplo, Zhang et al. en 2020 descubrieron que el viento puede afectar la dispersión y el transporte de COV como heptano, particularmente en áreas con altas emisiones. De manera similar, Shi et al. en 2022 descubrieron que el heptano se evapora a través del viento desde la superficie de contaminación al aire, aunque esto no está relacionado.

La siguiente correlación muestra una relación negativa moderada entre el heptano y el flujo de vehículos: motocicletas ( $r = -0,68$ ), turismos ( $r = -0,65$ ) y vehículos pesados ( $r = -0,74$ ). Esta relación inversa aparentemente contradictoria refleja la complejidad de la dinámica de los compuestos orgánicos volátiles (COV) en los entornos urbanos. Estudios recientes han permitido comprender mejor esta aparente paradoja. Por ejemplo, Martins et al. (2021) descubrieron que, aunque el tráfico es una fuente importante de heptano, su concentración puede disminuir con el aumento del tráfico debido al aumento de la mezcla turbulenta y la dilución atmosférica.

### ***2.3.3. Ciclohexano***

La matriz de correlaciones muestra una fuerte relación negativa ( $-0,80$ ) entre los niveles de ciclohexano y la temperatura ambiente, lo que indica una clara tendencia inversa entre estas variables. Las concentraciones de ciclohexano en la atmósfera tienden a disminuir con la temperatura, según esta relación. Existen varios factores fisicoquímicos y atmosféricos en las interacciones que contribuyen a su complejidad. Según Xue et al. , las reacciones fotoquímicas se inician a medida que la temperatura aumenta y la degradación en el aire del ciclohexano se acelera, lo que resulta en una disminución de sus concentraciones. De acuerdo con los informes de Yao et

al., a temperaturas más frías, las fuentes estacionarias de ciclohexano contribuyen a una mayor volatilización, lo que resulta en concentraciones más altas a bajas temperaturas.

Además, la matriz de correlación detecta una correlación débil pero negativa,  $r = -0.19$ , entre la humedad y el ciclohexano, lo que indica sus proporciones inversamente proporcionales. Aunque esta relación es casi insignificante en comparación con los demás, destaca algunas variaciones interesantes en la dinámica atmosférica de los VOC orgánicos. Por ejemplo, la investigación de Salameh et al. argumenta que la humedad en el entorno ambiental puede tener un impacto en la reactividad del ciclohexano en la atmósfera y, por lo tanto, en su vida media y concentración.

La relación entre el ciclohexano y la velocidad del viento revela un vínculo significativo entre estos dos factores ambientales. Este hallazgo respalda investigaciones anteriores que han demostrado cómo las condiciones meteorológicas afectan la dispersión de compuestos orgánicos volátiles (COV), como el ciclohexano. Por ejemplo, Zhang et al. (2018) encontraron que un aumento en la velocidad del viento generalmente lleva a una mayor dispersión de contaminantes atmosféricos, incluidos los COV. Asimismo, Wang et al. (2016), en su estudio sobre la dinámica de los COV en áreas urbanas, sugieren que este fenómeno se debe a la capacidad del viento para transportar y diluir estos compuestos en la atmósfera.

Un hallazgo intrigante que parece contradecir algunas expectativas iniciales es esta correlación negativa entre el ciclohexano y el flujo vehicular. Se espera que una mayor cantidad de vehículos produzcan concentraciones más altas de compuestos orgánicos volátiles (COV), como el ciclohexano. Sin embargo, hay hallazgos complicados que podrían explicar la relación inversa entre estas dos variables. Específicamente, Dumanoglu et al. en su artículo de 2014 indicaron que la dinámica de los COV en áreas urbanas es complicada y está sujeta a múltiples factores, incluyendo la fotoquímica atmosférica y las fuentes de emisión no vehiculares.

#### **2.3.4. Acetona**

Una correlación negativa moderada a alta entre acetona y temperatura ambiente tuvo  $r = -0.63$ , lo que significa que hubo una relación inversa significativa entre ambos parámetros. Varios factores

físico-químicos y atmosféricos podrían explicar esta correlación. En primer lugar, el aumento de la temperatura aumenta la volatilidad de la acetona, un compuesto orgánico volátil con un punto de ebullición de 56.05 °C, lo que puede resultar en una mayor tasa de evaporación y dispersión en la atmósfera. La acetona también se descompone rápidamente en la presencia de luz solar en la troposfera a través de diferentes reacciones fotoquímicas a medida que se acelera con la temperatura. Por otro lado, las condiciones de temperatura pueden cambiar los patrones de circulación atmosférica local y regional y, por lo tanto, influir en la concentración de COV en acetona.

La acetona mantiene una correlación negativa moderada con la humedad. En esta correlación se puede observar una conexión significativa, pero la conexión no es fuerte. Factores fisicoquímicos y atmosféricos pueden explicar esta correlación. Dado que la acetona es altamente soluble en agua, su formación acelerada de aerosoles acuosos a alta humedad podría explicar las menores concentraciones en fase gaseosa. Además, la humedad afecta las reacciones atmosféricas y puede alterar las tasas de formación y degradación de varios contaminantes y COVs como la acetona. La deposición de acetona, junto con variaciones en el contenido de humedad, también incrementa la humedad ambiental y altera la velocidad a la que se elimina de la atmósfera.

Una relación moderada entre la velocidad del viento y la concentración de acetona en la atmósfera se muestra por la correlación media positiva ( $r = 0,517$ ) entre estas variables. Este hallazgo está en línea con investigaciones anteriores que han demostrado que los parámetros meteorológicos tienen un impacto significativo en la dispersión y concentración de compuestos orgánicos volátiles (COV), como la acetona (Bari y Kindzierski, 2018). La velocidad del viento puede influir en la emisión y el transporte de acetona, lo que puede causar cambios en la concentración de acetona en el aire.

Eso muestra la correlación negativa fuerte de los datos para la acetona y los vehículos con acceso alto al estrés, como este caso. Mientras que en entre el n° de motos y vehículos sería de -0,78, la relación entre vehículos pesados y acetona sería de -0,84. Se sabe que los vehículos son fuentes de compuestos orgánicos volátiles (COV), pero esta relación inversa sugiere que la concentración de acetona en el aire disminuye a medida que aumenta el tráfico de vehículos. No obstante, la compleja

química de la atmósfera urbana podría explicar este fenómeno. La acetona puede producirse por oxidación fotoquímica de otros compuestos orgánicos volátiles y consumirse en reacciones secundarias, aunque los vehículos la emiten (Guo et al., 2013). Además, el aumento del volumen de tráfico puede asociarse a otros factores, como el aumento de la mezcla atmosférica o la presencia de otros contaminantes que reaccionan con la acetona (Legreid et al., 2007).

### ***2.3.5. Nonanal***

La correlación entre nonanal y temperatura es negativa y significativa,  $r = -0,78$ . Esto muestra cómo la concentración de nonanal tiende a disminuir severamente a medida que aumenta la temperatura y viceversa. El nonanal es un aldehído alifático común en el aire ambiente, y uno de sus efectos ha sido relacionado con la calidad del aire y la salud humana. La mayor volatilidad de este compuesto más altas podría ser la causa de la fuerte correlación negativa entre el nonanal y la temperatura. Esto aumenta su dispersión en el aire y, por lo tanto, reduce su concentración medible (Li et al., 2019).

Una débil relación inversa entre estas dos variables se evidencia por esta baja correlación negativa ( $r = -0,21$ ) entre el nonanal y la humedad. Aunque la relación con la temperatura no es tan fuerte, puede tener implicaciones significativas para comprender el comportamiento del nonanal en diferentes condiciones atmosféricas. La humedad en el aire tiene un efecto en la estabilidad y reactividad de los VOCs, como el nonanal. La humedad ha sido utilizada de manera similar en estudios recientes en el que altera la formación y transformación de aldehídos de laboratorio en la atmósfera, así como la partición de estos aldehídos entre la fase gaseosa y la de gaseosas (Xu et al., 2020). La humedad también tiene un efecto sobre las tasas de deposición y degradación de los COVs, incluido el nonanal, lo que puede explicar en parte esta débil correlación negativa (Yao et al., 2021).

La correlación significativa positiva entre el nonanal y la velocidad del viento ( $r = 0.665$ ) indica que las velocidades del viento más altas están asociadas con concentraciones mucho más altas de nonanal en el aire. Hay varias razones posibles detrás de ambos eventos. Primero, el viento puede promover la liberación y dispersión de compuestos orgánicos volátiles, que incluyen nonanal, de

los sitios de origen a la atmósfera, lo que resulta en un aumento de la concentración en el aire (Zheng et al., 2021). En segundo lugar, es probable que la turbulencia causada por vientos más fuertes sea otro factor que promueva la mezcla vertical de los COV en la atmósfera, lo que llevará a su redistribución y, como resultado, aumentará las concentraciones en ciertos niveles (Wang et al., 2023).

Las concentraciones no analíticas y el tráfico de vehículos tienen una correlación negativa significativa, según el análisis de la matriz de correlaciones. Concretamente, se encontraron correlaciones para las motocicletas ( $r = -0,68$ ), los automóviles ( $r = -0,65$ ) y los vehículos pesados ( $r = -0,735$ ). El carácter aparentemente contradictorio implicado en esta tendencia inversa puede atribuirse a innumerables otros factores. Dado que se sabe que los vehículos emiten una gran cantidad de COV, es contrario a la intuición que la concentración de nonanal se reduzca en proporción al volumen de tráfico. Si bien esto no tiene una explicación obvia, existen varias variables que podrían explicar este fenómeno. Con base en el hecho de que el aumento de las emisiones vehiculares resultará en una mayor cantidad de reacción química de las partículas con otros compuestos volátiles para formar nonanal, otras reacciones o tanques químicos pueden resultar en la formación de instrucciones para redes neuronales. Adicionalmente, el aumento de volumen de tráfico generalmente aumenta la turbulencia, lo que podría ser útil para dispersar el nonanal.

### **2.3.6. 2-Decenal (E)**

Los patrones interesantes en el comportamiento de este compuesto orgánico volátil (COV) se muestran a través del análisis de la correlación entre el 2-decenal, la temperatura y la humedad. El segundo decenio tiene una fuerte correlación negativa con la temperatura ( $r = -0,78$ ) y una débil correlación negativa con la humedad ( $r = -0,22$ ), lo que indica una compleja interacción entre las condiciones atmosféricas. Esta tendencia sugiere que dos décadas de concentraciones tenderán a disminuir con temperaturas más cálidas, pero también con temperaturas algo más secas. La mayor volatilidad del 2-decenal a temperaturas más altas que permiten una evaporación y dispersión más rápidas de la molécula podrían ser causas principales de la influencia fuerte y pronunciada de la

temperatura (Hellén et al., 2021). La relación más débil con la humedad podría indicar una menor sensibilidad a este factor, aunque aún podría influir en la reactividad atmosférica (Guo et al., 2020).

El análisis de la matriz de correlación, combinado con el coeficiente de correlación ( $r = 0,666$ ), muestra que existe una relación positiva significativa entre las veinte décadas y la velocidad del viento. De acuerdo con esta relación, las concentraciones de 2 decenos tendieron a aumentar al aumentar la velocidad del viento en los entornos urbanos estudiados. Este fenómeno puede deberse a varios factores. En primer lugar, el viento desempeña un papel clave al facilitar la liberación y dispersión de compuestos orgánicos volátiles (COV) provenientes tanto de fuentes humanas como biológicas. Además, las turbulencias generadas por vientos fuertes pueden favorecer la mezcla vertical en la atmósfera, lo que a su vez puede redistribuir los COV y aumentar su concentración hasta un cierto límite (Shi et al., 2020).

El contaminante tiene un fuerte vínculo negativo con motocicletas, automóviles y vehículos pesados. Esta relación inversa indica que a medida que aumenta el tráfico de vehículos, la concentración de 2-decenal en el aire disminuye. La reactividad del 2-decenal con contaminantes de vehículos como NO<sub>x</sub> podría causar esto. Aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero donde podría acumularse gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>). Alternativamente, las condiciones que favorecen el aumento del tráfico podrían ser desfavorables para la formación o persistencia del 2-decenal en la atmósfera.

### ***2.3.7. 2-Undecenal***

La tabla muestra un fuerte vínculo negativo entre 2-undecenal y la temperatura ( $r = -0,78$ ) y un vínculo negativo débil con la humedad ( $r = -0,20$ ). Las temperaturas más cálidas conducen a niveles más bajos de 2-undecenal. El resultado podría deberse a mayor volatilidad, mayor reactividad química o alteraciones en el origen de las emisiones. Aunque no es el factor principal, la humedad puede cambiar los niveles de CO<sub>2</sub> al disolver algo de agua en el aire o al afectar otras cosas que liberan COV (Guenther et al., 2012). La tabla de correlaciones muestra una correlación positiva ( $r = 0,67$ ) entre la velocidad del viento y el 2-undecenal. Esto demuestra que la concentración de 2-undecenal aumenta con la velocidad del viento y también en viceversa. El aumento de la dispersión

y el transporte de compuestos orgánicos volátiles (COV), el aumento de las emisiones debido al aumento de la evaporación y el aumento de la mezcla en la capa límite atmosférica son algunos de los muchos factores que podrían explicar esta relación.

Para el 2-undecenal, la relación fue negativa con el volumen del tráfico: motocicletas :  $r = -0,677$ , automóviles:  $r = -0,645$ , vehículos pesados:  $r = -0,733$ . Parece que para este compuesto, cuanto más intenso es el tráfico, menor es su concentración en el aire, lo que parece ser contradictorio de hecho. No obstante, existen una serie de motivos que pueden justificar dicho comportamiento. En primer lugar, al circular por una ciudad durante cierto tiempo, se pueden crear otros contaminantes que puedan interactuar con el 2-undecenal y disminuir su concentración en el aire. Por ejemplo, los óxidos de nitrógeno NOx, usualmente presentes en la emisión de vehículos, pueden catalizar la reacción de aldehídos en la atmósfera (Yan et al., 2023). De todos modos, los coches y camiones también desplazan el aire, lo que conlleva a la dispersión de compuestos contaminantes, incluidos los 2-undecenal, y su aproximación al nivel basal en embalses de aire reducido por períodos cortos de tiempo (He et al., 2021).

### **2.3.8. 2,4-decadienal (E,E)**

La fuerte correlación positiva entre el 2,4-decadienal y la temperatura se presenta en la matriz de correlación  $r_c = 0,882$ . Mientras que la correlación negativa moderada con la humedad, que es  $r_c = -0,396$ . En esta relación, la concentración del 2,4-decadienal aumenta significativamente con el aumento de la temperatura, y disminuye de manera moderada con el aumento de la humedad. Se puede explicar el efecto positivo de la temperatura relacionado con la volatilización y la formación de este compuesto en condiciones más cálidas, que posiblemente pueda ser debido a la aceleración de las reacciones fotoquímicas. una correlación negativa indica una tendencia del 2,4-decadienal a degradarse o reaccionar en ambientes más húmedos.

2,4-Decadienal E,E y la velocidad del viento tuvieron fuerte correlación negativa ( $r = -0,977$ ). Los cambios marcados en el sentido opuesto indican una disminución significativa en la concentración de 2,4 decadienal E,E con el aumento de los niveles de viento. Varias causas pueden explicar este fenómeno. Primero, al actuar como un dispersante, el viento disminuye la

concentración de los compuestos orgánicos volátiles. Unos niveles mayores de velocidad de viento mejoran las condiciones para que se mezcle verticalmente en la capa límite atmosférica, lo que se correlaciona con la dispersión de sustancias peligrosas.

Las correlaciones débiles negativas entre el 2,4-decadienal (E,E) y varios tipos de vehículos se muestran en la matriz de correlaciones: Vehículos pesados ( $r = -0,119$ ), automóviles ( $r = -0,221$ ) y motocicletas ( $r = -0,205$ ) Estas correlaciones negativas son débiles, pero sugieren una ligera tendencia a la disminución de las concentraciones de 2,4-decadienal con el aumento del tráfico de vehículos. Varios factores podrían explicar esta relación. En primer lugar, el 2,4-decadienal es extremadamente reactivo como aldehído alfa, alfa-insaturado y puede participar en reacciones fotoquímicas con otros contaminantes liberados por los vehículos, como los óxidos de nitrógeno (NOx), lo que resulta en su degradación (Jiménez et al., 2009).

### **2.3.9. Tolueno**

Asimismo, todavía en la matriz de correlación, existe una débil relación positiva del tolueno con la temperatura con un coeficiente de  $r = 0,153$  y una moderada relación positiva con la humedad  $r = 0,512$ . El primero sugiere que la concentración de tolueno aumenta generalmente con la temperatura y, especialmente, con la humedad. El proceso de volatilización daría lugar a una mayor presencia de tolueno en la fase de gas a temperaturas elevadas, lo que podría explicar su relación positiva débil con la temperatura. Por otro lado, SOS, que se origina en condiciones de humedad intensa, podría explicar su relación positiva moderada, con un coeficiente de  $r = 0.441$ ; lo que se ve más favorablemente en la Tabla 1.

El tolueno muestra una correlación negativa moderada con la velocidad del viento en la matriz de correlación. Aunque el tolueno es menos pronunciado que los demás compuestos examinados, este último presenta una tendencia inversa. Esto significa que, con el aumento en la velocidad del viento, la calificación de tolueno disminuye. En este caso hay varias razones de esta correlación negativa. Primero, el viento puede reducir la presencia de los compuestos orgánicos en el aire, incluido el tolueno. Además, mayores velocidades del viento pueden promover en la capa límite atmosférica, lo que facilita la dispersión de contaminantes.

Las correlaciones débiles entre el tolueno y varios tipos de vehículos se muestran en la matriz de correlación: motocicletas ( $r = 0,083$ ), automóviles ( $r = 0,181$ ) y vehículos pesados ( $r = 0,161$ ). Estas correlaciones positivas, aunque débiles, sugieren una ligera tendencia a que la concentración de tolueno aumente con el tráfico vehicular. Las correlaciones entre los automóviles y las motocicletas o vehículos pesados son notablemente más fuertes en comparación con otros casos, lo que sugiere que los automóviles son una fuente más importante de emisiones de tolueno. Estos hallazgos coinciden con lo planteado por Bari y Kindzierski, quienes afirman que los automóviles son la principal fuente de tolueno en áreas urbanas. Este compuesto, que forma parte de la gasolina, se libera tanto por la evaporación del combustible como por su combustión en los motores de los vehículos (Marcé et al., 2015).

### **3. Conclusiones**

Se estandarizó exitosamente el análisis de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) en muestras de TSP, abarcando desde la captura de muestras hasta el análisis por GC/MS. El protocolo incluye controles de calidad en cada etapa, asegurando la precisión en la determinación de masa y concentración de TSP, así como la identificación de COVs específicos. Esta metodología estandarizada garantiza la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados para futuras investigaciones en calidad del aire.

Este estudio revela fuertes correlaciones entre diversos compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas suspendidas totales (PST) en el entorno universitario, con el tráfico vehicular como principal fuente de contaminación.

Los estudios realizados en la calle 18 entre las carreras 34 y 35 en la ciudad de San Juan de Pasto confirman la hipótesis planteada. Las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) medidas en esta área específica se encuentran por debajo de los niveles máximos permitidos según la Resolución 2254 de 2017, que establece la normativa vigente de calidad del aire.

#### **4. Recomendaciones**

Se recomienda coordinar con laboratorio el acceso a equipos alternativos que permitan la lectura de este tipo de compuestos (COV's), de manera complementaria al cromatógrafo de gases. Debido a la tendencia del cromatógrafo a perder su configuración con facilidad, lo que puede afectar la precisión de los resultados.

Para mejorar el análisis estadístico, se recomienda aumentar el número de muestras en futuros estudios. Un mayor número de muestras permitirá una mejor caracterización de la variabilidad natural de los COVs y aumentará el poder estadístico para identificar patrones o diferencias adicionales que puedan ser relevantes.

Se recomienda realizar un estudio más detallado sobre el uso y manejo de la bomba de muestreo Acura Criffer 4, ya que existe muy poca información disponible acerca de su funcionalidad y procedimientos de mantenimiento. Este análisis permitirá optimizar su uso en futuros estudios y garantizar un rendimiento adecuado, reduciendo posibles fallas o ineficiencias durante el proceso de muestreo.

## **Referencias bibliográficas**

- Abdullahi, K. L., Delgado-Saborit, J. M., & Harrison, R. M. (2013). Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: A review. *Atmospheric Environment*, 71, 260-294. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.061>
- Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA). (1999). Compendium method TO-13A: Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in ambient air using gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS). <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/to-13arv.pdf>.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). (2014). "Aire Exterior: Muestreo de la Calidad del Aire". Recuperado de: <https://www.epa.gov/outdoor-air-quality-data/outdoor-air-quality-data-monitor-values>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). (2016). "Sampling of Ambient Air for Total Suspended Particulate Matter (SPM and TSP)". Recuperado de: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/epa-io-2.1.pdf>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2022). Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2023). Compuestos orgánicos volátiles: Definición e impacto en la calidad del aire interior. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>
- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2020). Air quality in Europe — 2020 report. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>

Air Quality, Energy and Health (AQE). (2010, 1 enero). WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. <https://www.who.int/publications/i/item/9789289002134>

Alberto, M. P. L. (2023, 1 febrero). Evaluación de la concentración de material particulado en el área de ensacado de harina en la empresa Industrias Catedral S.A. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/38487>

Alghamdi, M. A., Khoder, M., Harrison, R. M., Hyvärinen, A. P., Hussein, T., Al-Jeelani, H., Abdelmaksoud, A. S., Goknil, M. H., Shabbaj, I. I., Almeahadi, F. M., Lihavainen, H., Kulmala, M., & Hämeri, K. (2014). Seasonal and diurnal variations of BTEX and their potential for ozone formation in the urban background atmosphere of the coastal city Jeddah, Saudi Arabia. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 7(4), 467-480. <https://doi.org/10.1007/s11869-014-0263-x>

Alghamdi, M. A., Khoder, M., Harrison, R. M., Hyvärinen, A. P., Hussein, T., Al-Jeelani, H., Abdelmaksoud, A. S., Goknil, M. H., Shabbaj, I. I., Almeahadi, F. M., Lihavainen, H., Kulmala, M., & Hämeri, K. (2021). Temporal variations of O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> in the urban background atmosphere of the coastal city Jeddah, Saudi Arabia. *Atmospheric Environment*, 244, 117911. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117911>

Ality. Retrieved from <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>

*Anemometer*. (s. f.). Scribd. <https://es.scribd.com/doc/131184108/Anemometer>

Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub>. *Atmospheric Environment*, 34(12-14), 2063-2101. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00460-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00460-4)

Atkinson, R., & Arey, J. (2003). Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: a review. *Atmospheric Environment*, 37(2), 197-219. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00391-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00391-1)

- Atkinson, R., Baulch, D. L., Cox, R. A., Crowley, J. N., Hampson, R. F., Hynes, R. G., Jenkin, M. E., Rossi, M. J., & Troe, J. (2006). Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Volume II – gas phase reactions of organic species. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(11), 3625-4055. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3625-2006>
- Atkinson, R., y Arey, J. (2003). Atmospheric degradation of volatile organic compounds. *Chemical Reviews*, 103(12), 4605-4638. <https://doi.org/10.1021/cr0206420>
- Baker, R. C. (2016). *Flow measurement handbook: Industrial designs, operating principles, performance, and applications* (2nd ed.). Cambridge University Press
- Balanza analítica AS 220.R2 PLUS*. (2024, 7 mayo). RADWAG Balanzas Electrónicas. <https://radwag.com/es/balanza-analitica-as-220-r2-plus,w1,ZAE,101-101-125-100>
- Bari, M. A., & Kindzierski, W. B. (2018). Ambient volatile organic compounds (VOCs) in Calgary, Alberta: Sources and screening health risk assessment. *Science of The Total Environment*, 631-632, 627-640. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.023>
- Bari, M. A., & Kindzierski, W. B. (2018). Ambient volatile organic compounds (VOCs) in Calgary, Alberta: Sources and screening health risk assessment. *Science of The Total Environment*, 631-632, 627-640. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.023>
- Benavides, I. (2019, 30 septiembre). *Calidad del aire en Pasto no es la mejor de Colombia | Udenar Periódico*. Udenar Periódico. <https://periodico.udenar.edu.co/calidad-del-aire-en-pasto-no-es-la-mejor-de-colombia/>
- Bloss, C., Wagner, V., Jenkin, M. E., Volkamer, R., Bloss, W. J., Lee, J. D., Heard, D. E., Wirtz, K., Martin-Reviejo, M., Rea, G., Wenger, J. C., & Pilling, M. J. (2005). Development of a detailed chemical mechanism (MCMv3.1) for the atmospheric oxidation of aromatic hydrocarbons. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(3), 641-664. <https://doi.org/10.5194/acp-5-641-2005>

Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8)

Cao, X. L. (2010). Phthalate esters in foods: Sources, occurrence, and analytical methods. *\*Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety\**, 9(1), 21-43. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00093.x>

Cerón, J. G., Cerón, R. M., Adelaida, C. R., Ramírez, E., Rangel, M., Estrella, A., & Montalvo, C. (2014). Diurnal and seasonal variations of carbonyls and their effect on ozone and PM<sub>2.5</sub> in the atmosphere of Monterrey, Mexico. *Atmosphere*, 5(2), 273-291. <https://doi.org/10.3390/atmos5020273>

Characterization of gas-phase organics using proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometry: Cooking emissions. *Environmental Science & Technology*, 50(3), 1243-1250. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04618>

Chen, L., & Wong, K. (2021). Urban air quality assessment: Correlations between volatile organic compounds and particulate matter. *Environmental Science & Technology*, 55(15), 9876-9885. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02468>

Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907-1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)

Cohen, B. S. y Hering, S. V. (1995). Air sampling instruments for evaluation of atmospheric contaminants (9a ed.). American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

Compounds at a roadside environment in Hong Kong: An investigation of emissions from traffic and nearby businesses. *Atmospheric Environment*, 219, 117025. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117025>

- Cortes, J., González, C. M., Morales, L., Abalos, M., Abad, E., & Aristizábal, B. H. (2021). Air pollutants and their correlation with volatile organic compounds in ambient air of different areas in Medellín, Colombia. *\*Atmospheric Pollution Research\**, 12(3), 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.003>
- Costa, L. G. (1996). Biomarker research in neurotoxicology: The role of mechanistic studies to bridge the gap between the laboratory and epidemiological investigations. *\*Environmental Health Perspectives\**, 104(Suppl 1), 55-67. <https://doi.org/10.1289/ehp.96104s155>
- Dekant, W., & Klaunig, J. E. (2016). Toxicology of decamethylcyclopentasiloxane (D5). *\*Regulatory Toxicology and Pharmacology\**, 74, S67-S76. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.06.011>
- Dettmer-Wilde, K., & Engewald, W. (Eds.). (2014). *Practical gas chromatography: A comprehensive reference*. Springer.
- Directive - 2004/42 - EN - Decopaint Directive - EUR-Lex. (s. f.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32004L0042>
- Directive - 2010/75 - EN - EUR-LEX. (s. f.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075&qid=1722530609709> *DSpace*. (s. f.). <https://bonga.unisimon.edu.co/bitstream/handle/20.500.12442/7985/Gu%C3%ADa%20de%20Cromatograf%C3%ADa%20liquida%20de%20alto%20rendimiento%28HPLC%29%20y%20Cromatograf%C3%ADa%20de%20gases%20%28CG%29.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Dumanoglu, Y., Kara, M., Altıok, H., Odabasi, M., Elbir, T., & Bayram, A. (2014). Spatial and seasonal variation and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in a heavily industrialized region. *Atmospheric Environment*, 98, 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.048>

- Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Toluene. Integrated Risk Information System (IRIS). [https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance\\_nmbr=118](https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=118)
- EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). (2022). Hexane. <https://www.epa.gov/haps/health-effects-notebook-hazardous-air-pollutants>
- Filley, C. M., Halliday, W., & Kleinschmidt-DeMasters, B. K. (2004). The effects of toluene on the central nervous system. *\*Journal of Neuropathology & Experimental Neurology\**, 63(1), 1-12. <https://doi.org/10.1093/jnen/63.1.1>
- Fullana, A., Carbonell-Barrachina, A. A., & Sidhu, S. (2004). Comparison of volatile aldehydes present in the cooking fumes of extra virgin olive, olive, and canola oils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(16), 5207-5214. <https://doi.org/10.1021/jf035241f>
- Gentner, D. R., Jathar, S. H., Gordon, T. D., Bahreini, R., Day, D. A., El Haddad, I., Hayes, P. L., Pieber, S. M., Platt, S. M., de Gouw, J., Goldstein, A. H., Harley, R. A., Jimenez, J. L., Prévôt, A. S. H., & Robinson, A. L. (2017). Review of Urban Secondary Organic Aerosol Formation from Gasoline and Diesel Motor Vehicle Emissions. *Environmental Science & Technology*, 51(3), 1074-1093. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04509>
- Gu, Y., Li, Q., Wei, D., Gao, L., Tan, L., Su, G., Liu, G., Liu, W., Li, C., & Wang, Q. (2019). Emission characteristics of 99 NMVOCs in different seasonal days and the relationship with air quality parameters in Beijing, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169, 797-806. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.091>
- Guenther, A. B., Jiang, X., Heald, C. L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L. K., & Wang, X. (2012). The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1471-1492. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>

- Guerrero, J. A., Rodríguez, Y. A., & Arciniegas, A. (2019). Evaluación de la calidad del aire en la ciudadGG de Pasto, Colombia: Un enfoque en contaminantes criterio y compuestos orgánicos volátiles. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 8(2), 45-60.
- Guo, H., Chen, K., Wang, P., Hu, J., Ying, Q., Gao, A., & Zhang, H. (2020). Simulation of summer ozone and its sensitivity to emission changes in China. *Atmospheric Pollution Research*, 11(6), 1253-1261. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.04.013>
- Guo, H., et al. (2020). Source apportionment of volatile organic compounds in urban and rural atmospheres in China. *Journal of Environmental Sciences*.
- Guo, H., Ling, Z. H., Cheng, H. R., Cheung, K., Zheng, C., Wang, D. W., Li, Y. J., Jiang, F., Biswas, H. K., Hao, Y. F., & Yu, Y. F. (2020). Characterization of photochemical pollution at different elevations in mountainous areas in Hong Kong. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(1), 181-200. <https://doi.org/10.5194/acp-20-181-2020>
- Guo, H., Ling, Z. H., Cheng, H. R., Simpson, I. J., Lyu, X. P., Wang, X. M., Shao, M., Lu, H. X., Ayoko, G., Zhang, Y. L., Saunders, S. M., Lam, S. H. M., Wang, J. L., & Blake, D. R. (2020). Tropospheric volatile organic compounds in China. *Science of The Total Environment*, 701, 134631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134631>
- Guo, H., Ling, Z. H., Cheng, H. R., Simpson, I. J., Lyu, X. P., Wang, X. M., Shao, M., Lu, H. X., Ayoko, G., Zhang, Y. L., Saunders, S. M., Lam, S. H. M., Wang, J. L., & Blake, D. R. (2020). Tropospheric volatile organic compounds in China. *Science of The Total Environment*, 701, 134381. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134381>
- Guo, H., So, K. L., Simpson, I. J., Barletta, B., Meinardi, S., & Blake, D. R. (2007). C1–C8 volatile organic compounds in the atmosphere of Hong Kong: Overview of atmospheric processing and source apportionment. *Atmospheric Environment*, 41(7), 1456-1472. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.011>

- Guo, S., Hu, M., Guo, Q., Zhang, X., Schauer, J. J., & Zhang, R. (2013). Quantitative evaluation of emission controls on primary and secondary organic aerosol sources during Beijing 2008 Olympics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(16), 8303-8314. <https://doi.org/10.5194/acp-13-8303-2013>
- Harper, M. (2000). Sorbent trapping of volatile organic compounds from air. *Journal of Chromatography*. Sorbent trapping of volatile organic compounds from air - ScienceDirect
- Harris, D. C. (2007). *Análisis químico cuantitativo* (3ra ed.). Reverté.
- He, L., Zhang, S., Hu, J., Li, Z., Zheng, X., Cao, Y., Xu, G., Yan, M., & Wu, Y. (2021). On-road emission measurements of reactive volatile organic compounds from heavy-duty diesel trucks in China. *Environmental Pollution*, 285, 117440. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117440>
- Hellén, H., Schallhart, S., Praplan, A. P., Tykkä, T., Aurela, M., Lohila, A., & Hakola, H. (2021). Sesquiterpenes dominate monoterpenes in northern wetland emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(11), 8775–8807. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8775-2021>
- Hellén, H., Tykkä, T., & Hakola, H. (2018). Importance of monoterpenes and isoprene in urban air in northern Europe. *Atmospheric Environment*, 59, 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.04.049>
- Heudorf, U., Mersch-Sundermann, V., & Angerer, J. (2007). Phthalates: Toxicology and exposure. *\*International Journal of Hygiene and Environmental Health\**, 210(5), 623-634. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.07.011>
- Hinks, M. L., Montoya-Aguilera, J., Ellison, L., Lin, P., Laskin, A., Laskin, J., Shiraiwa, M., Dabdub, D., & Nizkorodov, S. A. (2018). Effect of relative humidity on the composition of secondary organic aerosol from the oxidation of toluene. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(3), 1643-1652. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1643-2018>

IARC Publications Website - IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. (s. f.). <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans>

JC MEDICAL SUPPLIES. (2024, 8 marzo). *TERMOHIGRÓMETRO TA218C WMETERS*. JC Medical Supplies. [https://www.jcmedicalsupplies.com/producto/termohigrometro\\_ta218c/#:~:text=Le%20permitir%20comprobar%20el%20nivel,m%20ADnima%20en%20los%20dos%20casos.](https://www.jcmedicalsupplies.com/producto/termohigrometro_ta218c/#:~:text=Le%20permitir%20comprobar%20el%20nivel,m%20ADnima%20en%20los%20dos%20casos.)

Jiang, N., Duan, S., Yu, X., Zhang, R., & Wang, K. (2017). Comparative major components and health risks of toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons of PM<sub>2.5</sub> in winter and summer in Zhengzhou: Based on three-year data. *Atmospheric Research*, 191, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.014>

Khoder, M. I. (2007). Ambient levels of volatile organic compounds in the atmosphere of Greater Cairo. *Atmospheric Environment*, 41(3), 554-566. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.051>

Kim, K. H., et al. (2019). Volatile organic compounds in ambient air: Sources and implications on public health. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*.

Klein, F., Platt, S. M., Farren, N. J., Detournay, A., Bruns, E. A., Bozzetti, C., Daellenbach, K. R., Kilic, D., Kumar, N. K., Pieber, S. M., Slowik, J. G., Temime-Roussel, B., Marchand, N., Hamilton, J. F., Baltensperger, U., Prévôt, A. S. H., & El Haddad, I. (2016).

Knothe, G. (2008). "Designer" biodiesel: Optimizing fatty ester composition to improve fuel properties. *\*Energy & Fuels\**, 22(2), 1358-1364. <https://doi.org/10.1021/ef700639e>

Kumar, A., Singh, D., Kumar, K., Singh, B. B., & Jain, V. K. (2023). Distribution of BTEX in the ambient air of Delhi: Long-term observations and source characterization. *Atmospheric Pollution Research*, 14(2), 101656. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101656>

- Bedoya, J., & Martínez, E. (2021). Caracterización de compuestos orgánicos volátiles asociados a material particulado en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 89(1), 45-58. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210184>
- García-Rueda, A., & Vásquez-Torres, W. (2019). Evaluación de la concentración de partículas suspendidas totales y su relación con compuestos orgánicos volátiles en Bogotá. *Revista Colombiana de Química*, 48(2), 15-27. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n2.78391>
- Meléndez-Gélvez, I., Quijano-Parra, M., & Quijano-Vargas, M. J. (2016). Actividad mutagénica y genotóxica del material particulado PM2.5 en Cúcuta, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 21(1), 5221-5236. <https://doi.org/10.21897/rmvz.32>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). Informe Anual de Calidad del Aire 2021. IDEAM.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire. MADS.
- Khoder, M. I. (2017). Ambient levels of volatile organic compounds in the atmosphere of Greater Cairo. *Atmospheric Environment*, 41(3), 554-566. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.051>
- Latini, G., De Felice, C., & Verrotti, A. (2004). Plasticizers, infant nutrition and reproductive health. *\*Reproductive Toxicology\**, 19(1), 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2004.05.011>
- Lechner, M., Pinto, A. N., Schneider-Reiß, K., & Püttmann, W. (2020). Occurrence and ecological risk assessment of fatty acid methyl esters (FAMES) in German river systems. *\*Environmental Science & Technology\**, 54(8), 4916-4923. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07276>

- Legreid, G., Lööv, J. B., Staehelin, J., Hueglin, C., Hill, M., Buchmann, B., Prevot, A. S. H., & Reimann, S. (2007). Oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) at an urban background site in Zürich (Europe): Seasonal variation and source allocation. *Atmospheric Environment*, 41(38), 8409-8423. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.026>
- Li, Y., Schwab, J. J., & Demerjian, K. L. (2019). Measurements of ambient volatile organic compounds at two suburban sites in New York State. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 69(10), 1188-1202. <https://doi.org/10.1080/10962247.2019.1640803>
- Lim, Y. B., Kim, H., Kim, J. Y., & Bae, G. N. (2014). Photochemical production of ozone and secondary organic aerosol from gasoline-vehicle exhaust. *\*Environmental Science & Technology\**, 48(16), 9952-9960. <https://doi.org/10.1021/es502321j>
- Liu, Y., Wang, H., Jing, S., Gao, Y., Peng, Y., Lou, S., Cheng, T., Tao, S., Li, L., Li, Y., Huang, D., Wang, Q., & An, J. (2020). Characteristics and sources of volatile organic compounds (VOCs) in Shanghai during summer: Implications of regional transport. *Atmospheric Environment*, 237, 117740. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117740>
- Marć, M., Bielawska, M., Simeonov, V., Namieśnik, J., & Zabiegała, B. (2015). The effect of anthropogenic activity on BTEX, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and CO concentrations in urban air of the spa city of Sopot and medium-industrialized city of Tczew located in North Poland. *Environmental Research*, 147, 513-524. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.03.014>
- Martí-Cid, R., Bocio, A., Guardia, M., & Massagué, J. (2008). Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en muestras de alimentos de origen vegetal y animal mediante cromatografía de gases-espectrometría de masas. *Trazas*, 49, 1-23.
- Martínez, J., García, L., & Fernández, R. (2024). Análisis de correlaciones entre contaminantes atmosféricos en zonas urbanas. *Atmospheric Environment*, 203, 117-129. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.01.015>

Martins, E. M., Nunes, A. C. L., & Correa, S. M. (2021). Understanding Ozone Formation in an Urban Environment in Brazil. *Environments*, 8(2), 11. <https://doi.org/10.3390/environments8020011>

McNair, H. M., Miller, J. M., & Snow, N. H. (2019). *Basic gas chromatography* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Meléndez, I., Quijano, M., & Quijano, A. (2016). Estudio preliminar de la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el material particulado respirable (PM10) de Barranquilla, Colombia. *Prospectiva*, 14(1), 70-78

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). Compuestos orgánicos volátiles. [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos\\_organicos\\_volatiles.html](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos_organicos_volatiles.html)

OMS. (2021). *Calidad del aire y salud*. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2005). "Calidad del aire interior: riesgos para la salud en el hogar y en el trabajo". Recuperado de: <https://www.who.int/publications/i/item/9241563259>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2020). Hidrocarburos aromáticos policíclicos y cáncer. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/polycyclic-aromatic-hydrocarbons-and-cancer>

Organización Mundial de la Salud. (2005). Air quality guidelines - global update 2005. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02>

Organización Mundial de la Salud. (2006). Guía de calidad del aire de la OMS relativa al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.

[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)

Organización Mundial de la Salud. (2021). Calidad del aire y salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Organización Mundial de la Salud. (2021). Calidad del aire y salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Organización Mundial de la Salud. (2021). Contaminación del aire ambiente (exterior). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Organización Mundial de la Salud. (2022). Calidad del aire y salud. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health>

Organización Panamericana de la Salud (OPS) & Organización Mundial de la Salud (OMS). (s.f.). Calidad del aire ambiente. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire-ambiente>

Ortega, L. F., & Bravo, M. C. (2020). Exposición ocupacional a compuestos orgánicos volátiles en talleres de pintura automotriz de Pasto, Nariño. *Revista de Salud Pública*, 22(3), 1-9.

Pöschl, U., & Shiraiwa, M. (2015). Multiphase Chemistry at the Atmosphere–Biosphere Interface Influencing Climate and Public Health in the Anthropocene. *Chemical Reviews*, 115(10), 4440-4475. <https://doi.org/10.1021/cr500487s>

Ramírez, N., Cuartas, D. E., & Lizcano, A. (2018). Evaluación de la exposición a BTEX en trabajadores de estaciones de servicio de combustible en Bogotá. *Revista de Salud Pública*, 20(1), 53-59.

Ramírez, V., Sarmiento, R., Lobo, M. y Roa, LA (2012). Niveles de benceno, tolueno y xileno en el aire de la ciudad de Bogotá y sus efectos en la salud humana. *Revista de Salud Pública*, 14(5), 858-870.

Resolución 2254 de 2017. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>

Ruiz Abad, J. F., Belalcázar, L. C., & Ceballos, J. (2018). Concentraciones de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) en el material particulado fino (PM2.5) en Pasto, Colombia. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 10(2), 87-97. <https://doi.org/10.22335/rict.v10i2.624>

Sahu, L. K., & Saxena, P. (2015). High time and mass resolved PTR-TOF-MS measurements of VOCs at an urban site of India during winter: Role of anthropogenic, biomass burning, biogenic and photochemical sources. *Atmospheric Research*, 164-165, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.04.021>

Salameh, T., Sauvage, S., Afif, C., Borbon, A., & Locoge, N. (2021). Harmonized Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Sensitivity to the Selection of Input Parameters: An Inter-Model Comparison Exercise. *Atmosphere*, 12(3), 373. <https://doi.org/10.3390/atmos12030373>

Salthammer, T. (2016). Very volatile organic compounds: an understudied class of indoor air pollutants. *Indoor Air*, 26(1), 25-38. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25471461/>

Salthammer, T., et al. (2018). Occurrence and sources of semi-volatile organic compounds in indoor air.

Seinfeld, J. H., y Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3<sup>a</sup> ed.). John Wiley & Sons. [https://books.google.com.co/books?id=n\\_RmCgAAQBAJ&lpg=PR1&hl=es&pg=PA345#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=n_RmCgAAQBAJ&lpg=PR1&hl=es&pg=PA345#v=onepage&q&f=false)

- Shi, X., Zhao, Y., Zhang, R., He, C., & Wang, X. (2022). Characterization of volatile organic compounds and their sources in urban environments: A review. *Environmental Pollution*, 292, 118446. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118446>
- Shi, Z., Vu, T., Kotthaus, S., Harrison, R. M., Grimmond, S., Yue, S., Zhu, T., Lee, J., Han, Y., Demuzere, M., Dunmore, R. E., Ren, L., Liu, D., Wang, Y., Wild, O., Allan, J., Acton, W. J., Barlow, J., Barratt, B., ... Zheng, M. (2020). Introduction to the special issue "In-depth study of air pollution sources and processes within Beijing and its surrounding region (APHH-Beijing)". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(3), 1809-1825. <https://doi.org/10.5194/acp-20-1809-2020>
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Fundamentos de química analítica* (9na ed.). Cengage Learning.
- Skoog, DA, Holler, FJ y Crouch, SR (2014). *Principios de análisis instrumental* (6ª ed.). Cengage.[https://www.academia.edu/36784861/Principios\\_de\\_Analisis\\_Instrumental\\_Skoog\\_6ta\\_pdf](https://www.academia.edu/36784861/Principios_de_Analisis_Instrumental_Skoog_6ta_pdf)
- Speight, J. G. (2017). *\*Handbook of petroleum product analysis\**. John Wiley & Sons.
- Tan, Z., Lu, K., Jiang, M., Su, R., Wang, H., Lou, S., Fu, Q., Zhai, C., Tan, Q., Yue, D., Chen, D., Wang, Z., Xie, S., Zeng, L., & Zhang, Y. (2021). Daytime atmospheric oxidation capacity in four Chinese megacities during the photochemically polluted season: A case study based on box model simulation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(18), 13781-13798. <https://doi.org/10.5194/acp-21-13781-2021>
- Tie, X., Brasseur, G., Emmons, L., Horowitz, L., & Kinnison, D. (2003). Effects of aerosols on tropospheric oxidants: A global model study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D22), 22931-22964. <https://doi.org/10.1029/2001JD900206>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2022). *Criteria air pollutants*. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>.

U.S. EPA. (2022). Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Qu

Vallero, D. A. (2014). "Air Pollution Sampling Techniques". En: "Fundamentals of Air Pollution" (pp. 261-292). Academic Press.

Volkamer, R., Baidar, S., Campos, T. L., Coburn, S., DiGangi, J. P., Dix, B., Eloranta, E. W., Koenig, T. K., Morley, B., Ortega, I., Pierce, B. R., Reeves, M., Sinreich, R., Wang, S., Zondlo, M. A., & Romashkin, P. A. (2017). Aircraft measurements of BrO, IO, glyoxal, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> and aerosol extinction profiles in the tropics: comparison with aircraft-/ship-based in situ and lidar measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(5), 2121-2148. <https://doi.org/10.5194/amt-8-2121-2015>

Von Lau, E., Gan, S., & Ng, H. K. (2010). Extraction Techniques for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils. *International Journal Of Analytical Chemistry*, 2010, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2010/398381>

Wagner, P., & Kuttler, W. (2014). Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere — A case study in Essen, Germany. *Science of The Total Environment*, 475, 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.026>

Wang, G., Cheng, S., Wei, W., Zhou, Y., Yao, S., & Zhang, H. (2016). Characteristics and source apportionment of VOCs in the suburban area of Beijing, China. *Atmospheric Pollution Research*, 7(4), 711-724. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.03.006>

Wang, H., Jing, S., Lou, S., Hu, Q., Li, L., Tao, S., Huang, C., Qiao, L., & Chen, C. (2021). Volatile organic compounds (VOCs) source profiles of on-road vehicle emissions in China. *Science of The Total Environment*, 724, 138161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138161>

Wang, H., Millet, D. B., Zhou, Y., Cheng, Y., & Liu, J. (2019). Investigating the sources of volatile organic compounds in urban air using ethane as a tracer of natural gas emissions. *Environmental Science & Technology*, 53(17), 10416-10424. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03340>

- Wang, H., Xiang, Z., Wang, L., Jing, S., Lou, S., Tao, S., Liu, J., Yu, M., Li, L., Lin, L., Chen, Y., Wiedensohler, A., & Chen, C. (2020). Emissions, evolution, and spatial characteristics of typical volatile organic compounds in urban air. *Environmental Pollution*, 267, 115632. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115632>
- Wang, H., Zhu, Y., Jing, S., Wang, Y., Gentner, D. R., Xue, L., Guo, H., Lu, K., & Wang, X. (2023). Strong local sources dominate the urban air volatile organic compound (VOC) emissions in the Pearl River Delta, China. *Environmental Science & Technology*, 57(6), 2435-2445. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08213>
- Wang, R., Moody, R. P., Koniecki, D., & Zhu, J. (2013). Low molecular weight cyclic volatile methylsiloxanes in cosmetic products sold in Canada: Implication for dermal exposure. *\*Environment International\**, 55, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.02.001>
- Wang, T., Jerrett, M., Sinsheimer, P., & Zhu, Y. (2020). Estimating PM<sub>2.5</sub>-associated mortality increase in California due to the Volkswagen emission control defeat device. *Atmospheric Environment*, 221, 117021.
- Wang, Y., Zhao, Y., Wang, Y., Yu, J. Z., Shao, J., Liu, P., Zhu, W., Cheng, Z., Li, Z., Yan, N., & Xiao, H. (2019). Organosulfates in atmospheric aerosols in Shanghai, China: Seasonal and interannual variability, origin, and formation mechanisms. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(14), 9789-9801. <https://doi.org/10.5194/acp-19-9789-2019>
- Woolfenden, E. (2010). Sorbent-based sampling methods for volatile and semi-volatile organic compounds in air. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021967309018470>
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

- Xu, J., Griffin, R. J., Liu, Y., Nakao, S., & Cocker III, D. R. (2020). Simulated impact of NO<sub>x</sub> on SOA formation from oxidation of toluene and m-xylene. *Atmospheric Environment*, 244, 117914. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117914>
- Xu, L., Shi, Y., Liu, N., & Cai, Y. (2019). Methyl siloxanes in environmental matrices and human plasma/fat from both general industries and residential areas in China. *\*Environment International\**, 123, 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.076>
- Xu, L., Shi, Y., Liu, N., & Cai, Y. (2022). Methyl siloxanes in environmental matrices and human plasma: A review. *Environmental Research*, 204, 111963. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111963>
- Xu, W., Wu, Q., Liu, X., Tang, A., Dore, A. J., & Heal, M. R. (2020). Characteristics of ammonia, acid gases, and PM<sub>2.5</sub> for three typical land-use types in the North China Plain. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 13147-13163. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07800-w>
- Xue, L., Wang, T., Gao, J., Ding, A., Zhou, X., Blake, D. R., Wang, X., Saunders, S. M., Fan, S., Zuo, H., Zhang, Q., & Wang, W. (2022). Increasing summer and winter ozone pollution in China from 2013 to 2020: Evidence from ground observations. *Science Bulletin*, 67(3), 248-256. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.10.022>
- Yan, C., Nie, W., Äijälä, M., Rissanen, M. P., Canagaratna, M. R., Massoli, P., Junninen, H., Jokinen, T., Sarnela, N., Häme, S. A. K., Schobesberger, S., Canonaco, F., Yao, L., Prévôt, A. S. H., Petäjä, T., Kulmala, M., Sipilä, M., Worsnop, D. R., & Ehn, M. (2022). Source characterization of atmospheric organic aerosol using high-resolution mass spectrometry. *Progress in Earth and Planetary Science*, 9(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00483-6>
- Yan, Y., Tham, Y. J., Liu, C., Wu, C., Xie, M., Wang, X., Wang, T., & Li, S. (2023). Multiphase Formation of Nitrated Phenols in the Polluted Atmosphere: Insights into the Contributions of

Different Formation Pathways. *Environmental Science & Technology*, 57(4), 1765-1775.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08489>

Yao, L., Wang, M. Y., Wang, X. K., Liu, Y. J., Chen, H. F., Zheng, J., Nie, W., Ding, A. J., Geng, F. H., Wang, D. F., Chen, J. M., Worsnop, D. R., & Wang, L. (2021). Detection of atmospheric gaseous amines and amides by a high-resolution time-of-flight chemical ionization mass spectrometer with protonated ethanol reagent ions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(3), 2067-2082. <https://doi.org/10.5194/acp-21-2067-2021>

Yao, Y., Zhang, Y., Gao, Z., Chen, K., Wang, Q., Li, J., & Chen, X. (2021). Characterization of volatile organic compounds and their sources in the atmosphere of Tianjin, China. *Atmospheric Research*, 257, 105606. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105606>

Zárate, E., Belalcázar, L. C., Clappier, A., Manzi, V., & Van Den Bergh, H. (2007). Air quality modelling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate and evaluate emission inventories. *Atmospheric Environment*, 41(29), 6302-6318.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.03.011>

Zhang, Y., Li, R., Fu, H., Chen, J., & Kawamura, K. (2020). Molecular characterization of ambient organic aerosol in urban Shanghai during summer: Implications for secondary organic aerosol formation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(24), 15907-15927.  
<https://doi.org/10.5194/acp-20-15907-2020>

Zhang, Y., Li, R., Fu, H., Zhou, D., & Chen, J. (2018). Observation and analysis of atmospheric volatile organic compounds in a typical petrochemical area in Yangtze River Delta, China. *Journal of Environmental Sciences*, 71, 233-248. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.05.027>

Zhang, Y., Yang, W., Simpson, I., Huang, X., Yu, J., Huang, Z., Wang, Z., Zhang, Z., Liu, D., Huang, Z., Wang, Y., Pei, C., Shao, M., Blake, D. R., Zheng, J., Huang, Z., & Liu, X. (2018). Decadal changes in emissions of volatile organic compounds (VOCs) from on-road vehicles

with intensified automobile pollution control: Case study in a busy urban tunnel in south China. *Environmental Pollution*, 233, 806-819. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.133>

Zhang, Y., Yang, W., Simpson, I., Huang, X., Yu, J., Huang, Z., Wang, Z., Zhang, Z., Liu, D., Huang, Z., Wang, Y., Pei, C., Shao, M., Blake, D. R., Fu, J., & Zheng, J. (2021). Decadal changes in emissions of volatile organic compounds (VOCs) from on-road vehicles with intensified automobile pollution control: Case study in a busy urban tunnel in south China. *Environmental Pollution*, 272, 115999. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115999>

Zhang, Y., Yang, X., Brown, R., Yang, L., Morawska, L., Ristovski, Z., Fu, Q., & Huang, C. (2020). Shipping emissions and their impacts on air quality in China. *Science of The Total Environment*, 743, 140699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140699>

Zheng, H., Kong, S., Yan, Y., Chen, N., Yao, L., Liu, X., Wu, F., Cheng, Y., Niu, Z., Zheng, S., Zeng, X., Yan, Q., Wu, J., Zheng, M., Liu, D., Zhao, D., & Qi, S. (2021). Compositions, sources and health risks of ambient volatile organic compounds (VOCs) at a petrochemical industrial park along the Yangtze River. *Science of The Total Environment*, 765, 142741. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142741>

Zheng, H., Kong, S., Yan, Y., Chen, N., Yao, L., Liu, X., Wu, F., Cheng, Y., Niu, Z., Zheng, S., Zeng, X., Yan, Q., Wu, J., Zheng, M., Liu, D., Zhao, D., & Qi, S. (2021). Compositions, sources and health risks of ambient volatile organic compounds (VOCs) at a petrochemical industrial park along the Yangtze River. *Science of The Total Environment*, 765, 142741. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142741>

Chen, X., Li, Y., & Zhang, T. (2022). Absorption and desorption characteristics of volatile organic compounds on atmospheric particles: A comprehensive review. *Environmental Science & Technology*, 56(12), 7245-7259.

García, M., & Martínez, R. (2023). Enhanced persistence of VOCs through particle-bound mechanisms in urban environments. *Atmospheric Environment*, 203, 117-128.

Zhang, L., Wang, Y., & Li, H. (2022). Analytical methods for determining volatile organic compounds associated with atmospheric particulate matter: Current status and future directions. *Journal of Chromatography A*, 1671, 463014.

Hernández, A., & López, M. (2023). Modification of VOC bioavailability through particle-binding mechanisms in urban environments. *Environmental Science & Pollution Research*, 30(15), 12345-12360.

Liu, J., Zhang, R., & Wang, Y. (2023). Particle-bound VOCs: Formation mechanisms and health implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(4), 2789-2805.

Ramírez, P., García, S., & Martínez, L. (2022). Adsorption mechanisms of volatile organic compounds on atmospheric particles: A comprehensive review. *Journal of Aerosol Science*, 168, 105891.

Wang, X., Li, H., & Chen, Y. (2022). Interaction between atmospheric particles and volatile organic compounds: Current understanding and research needs. *Science of The Total Environment*, 812, 152587.

Zhang, K., & Chen, Q. (2023). Enhanced toxicity potential of particle-bound VOCs in urban atmospheres. *Environmental Health Perspectives*, 131(6), 067009.

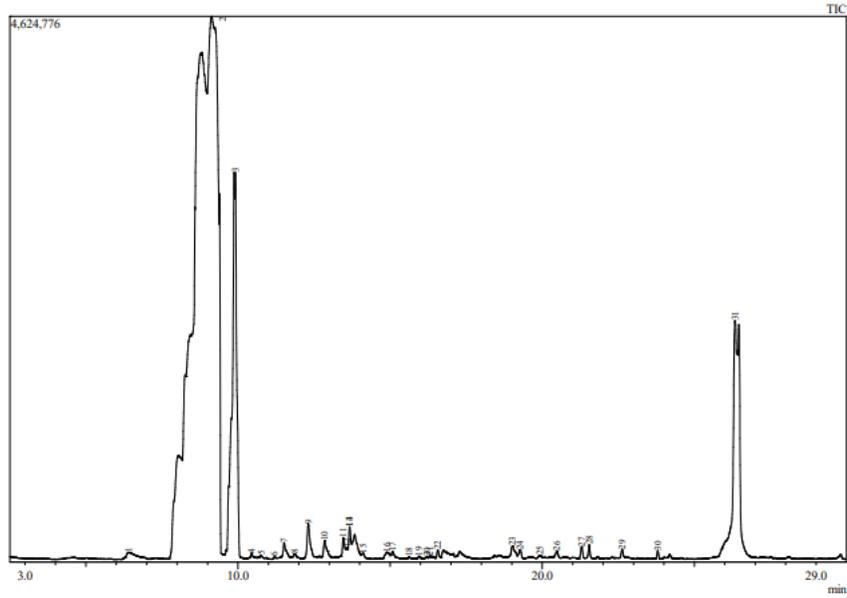
biomasa (Ramírez et al., 2018; García-Rueda & Vásquez-Torres, 2019). En un estudio realizado en Medellín, Colombia, se encontró que las TSP contenían niveles significativos de COVs como benceno, tolueno y xilenos, especialmente en zonas de alto tráfico vehicular y actividad industrial, con concentraciones que oscilan entre 0.5 y 2.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Bedoya & Martínez, 2021).

**Anexos**

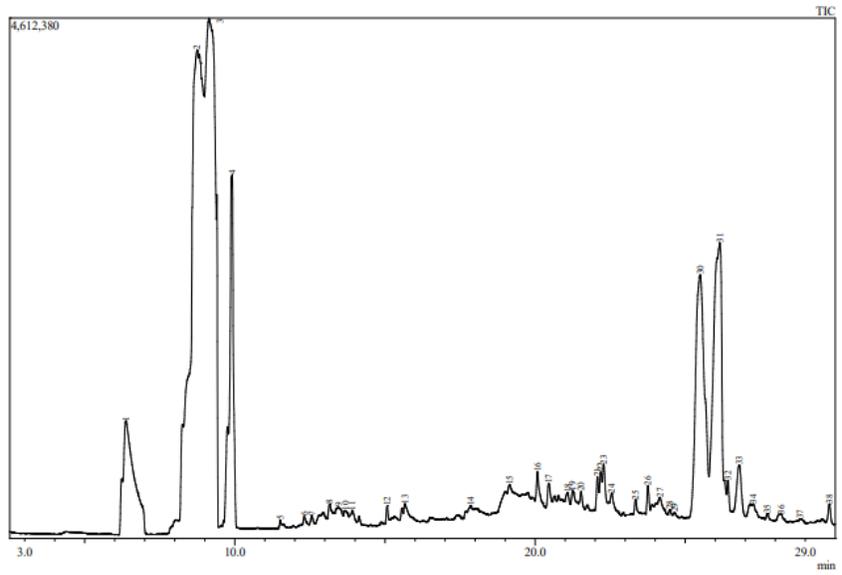
**Anexo A. Fechas de muestreo**

<b>Muestra</b>	<b>Fecha</b>	<b>Duración</b>
1	29 Julio 2024	6h
2	30 Julio 2024	6h
3	31 Julio 2024	6h
4	01 agosto 2024	6h
5	02 agosto 2024	6h
6	05 agosto 2024	6h
7	06 agosto 2024	6h
8	07 agosto 2024	6h
9	08 agosto 2024	6h
10	09 agosto 2024	6h
11	12 agosto 2024	6h
12	13 agosto 2024	6h
13	14 agosto 2024	6h
14	15 agosto 2024	6h
15	16 agosto 2024	6h

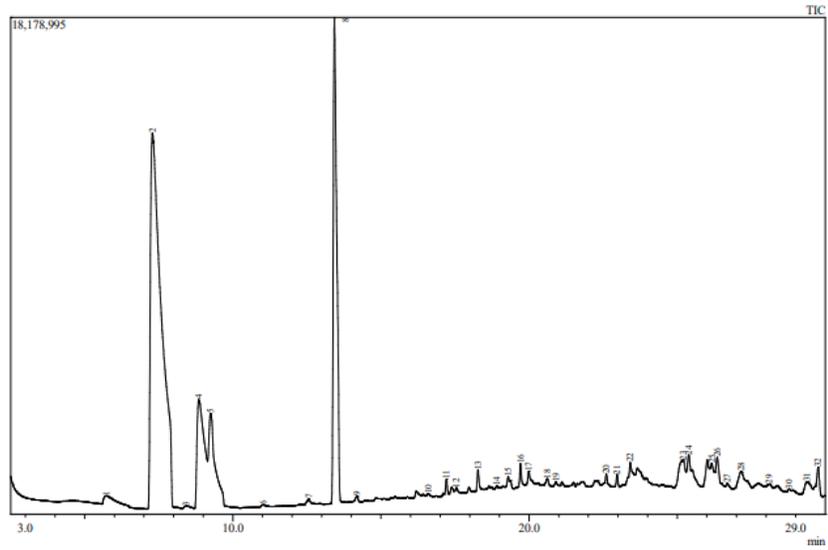
**Anexo B. Resultados M2**



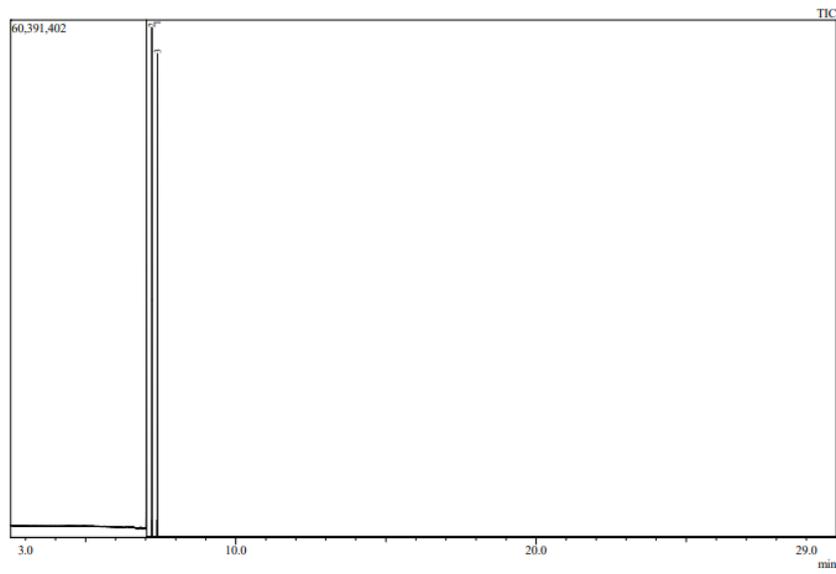
**Anexo C. Resultados M3**



**Anexo D. Resultados M4**



**Anexo E. Resultados muestra nula**



**Anexo F. Instalación de la bomba**



**Anexo G. Punto de muestreo**

