Aplicabilidad de parámetros técnicos de macro y micro localización en estaciones de monitoreo tipo tráfico para fuentes lineales en las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos de Bogotá D.C

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Acreditación Institucional de Alta Calidad

Autor
Maria Paula Medina León
Nicolle Dayana Amortegui Galvis

Director
José Alejandro Murad Pedraza

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
Julio de 2025

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN **3**
2. OBJETIVOS **5**
2.1 GENERAL **5**
2.2 ESPECÍFICOS **5**
3. METODOLOGÍA **6**
3.1. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES **6**
4. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS **8**
4.1 DEFINICIÓN DEL SITIO DE TRABAJO **8**
4.1.1 Características de las vías 12
4.1.2 Aforo vehicular 13
4.2 UBICACIÓN DE ESTACIONES **15**
4.2.1 Criterios de Macrolocalización 15
4.2.2 Criterios de Microlocalización 18
4.2.3 Número de estaciones por tipología 20
4.2.4 Plano de ubicación 21
4.2.5 Información general estaciones de monitoreo 23
4.2.6 Triangulaciones **30**
4.3 ESTUDIO TÉCNICO SVCA - TRÁFICO **32**
4.3.1 Tipologías de Estaciones 32
4.3.2 Parámetros a medir 36
4.3.3 Tipo de tecnología 37
4.3.4 Costos de inversión e implementación 46
5. CONCLUSIONES **49**
6. RECOMENDACIONES **51**
7. ANEXOS **53**
8. REFERENCIAS **54**
9. BIBLIOGRAFÍA **56**

1. INTRODUCCIÓN

En Bogotá, la calidad del aire representa un desafío creciente que incide directamente en la salud pública, el bienestar ciudadano y la sostenibilidad ambiental. De acuerdo con datos del Ministerio de Salud y Protección Social, más de 15.000 muertes prematuras al año en Colombia están asociadas a enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otros efectos adversos derivados de la exposición prolongada a contaminantes atmosféricos. Esta cifra pone de manifiesto la urgencia de fortalecer los sistemas de monitoreo ambiental, especialmente en zonas urbanas densamente transitadas.

Actualmente, la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) cuenta con 19 estaciones distribuidas en puntos estratégicos de la ciudad. Sin embargo, únicamente cuatro de estas estaciones son de tipo tráfico, las cuales resultan fundamentales para capturar datos representativos de la contaminación en corredores viales de alta intensidad vehicular. Esta limitación deja sin cobertura adecuada a varias zonas críticas, entre ellas las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos, atravesadas por importantes vías arteriales como la Avenida NQS, la Calle 63 y la Carrera 24.

Estas localidades presentan condiciones que agravan la problemática ambiental: alta densidad vehicular, tránsito pesado, proximidad a zonas industriales y condiciones meteorológicas que favorecen la acumulación de contaminantes. La ausencia de estaciones tipo tráfico en estas áreas restringe la capacidad de caracterizar adecuadamente las concentraciones reales de contaminantes generados por fuentes móviles, dificultando el diseño de políticas efectivas de mitigación.

El presente proyecto tiene como objetivo central proponer la ubicación óptima para la instalación de nuevas estaciones de monitoreo tipo tráfico en Teusaquillo y Barrios Unidos, mediante un análisis integral de criterios de macro y micro localización. Esta evaluación considerará aspectos técnicos como la clasificación funcional de las vías, los patrones de movilidad, las condiciones topográficas y meteorológicas, así como la cercanía a fuentes emisoras relevantes. Se utilizarán como referencia los lineamientos técnicos establecidos por la EPA, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en la guía CFR 40

parte 58, los cuales definen los parámetros mínimos para el diseño y operación de sistemas de monitoreo de calidad del aire.

Además, se priorizará la medición de contaminantes claves como material particulado fino (PM2.5), material particulado respirable (PM10), ozono troposférico (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2), debido a su alto impacto en la salud humana y su prevalencia en áreas de alto tráfico.

La implementación estratégica de estas estaciones fortalecerá la infraestructura de monitoreo ambiental de Bogotá, mejorará la precisión y representatividad de los datos recolectados y permitirá generar alertas tempranas y diagnósticos más certeros. Esta información robusta será clave para la formulación de políticas públicas basadas en evidencia, el diseño de estrategias de gestión ambiental urbana y la implementación de medidas de control orientadas a reducir la exposición de la población a contaminantes nocivos. En consecuencia, este proyecto no solo aportará al cumplimiento de los estándares de calidad del aire, sino que también promoverá el bienestar y la salud de los habitantes de la capital.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Realizar el estudio técnico de macro y micro localización para la ubicación de estaciones de monitoreo tipo tráfico en fuentes lineales Arterias y Principales en la localidad de Teusaquillo y Barrios Unidos de Bogotá D.C.

2.2 ESPECÍFICOS

Definir el tipo de vías arterias y principales dentro de las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos, para su caracterización y alcance para la instalación del sistema de vigilancia de calidad del aire tipo tráfico.

Establecer las ubicaciones de las estaciones del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos aplicando los criterios de macro y micro localización definidos en la normativa vigente.

Desarrollar el estudio técnico para el diseño de las estaciones tipo tráfico a instalar dentro del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire a implementar en la localidad de Teusaquillo y Barrios Unidos.

3. METODOLOGÍA

3.1. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

La metodología que se utilizará para la elaboración del proyecto de pasantía contará con 3 fases denominadas diagnóstico, desarrolló y diseño y consistirán en:

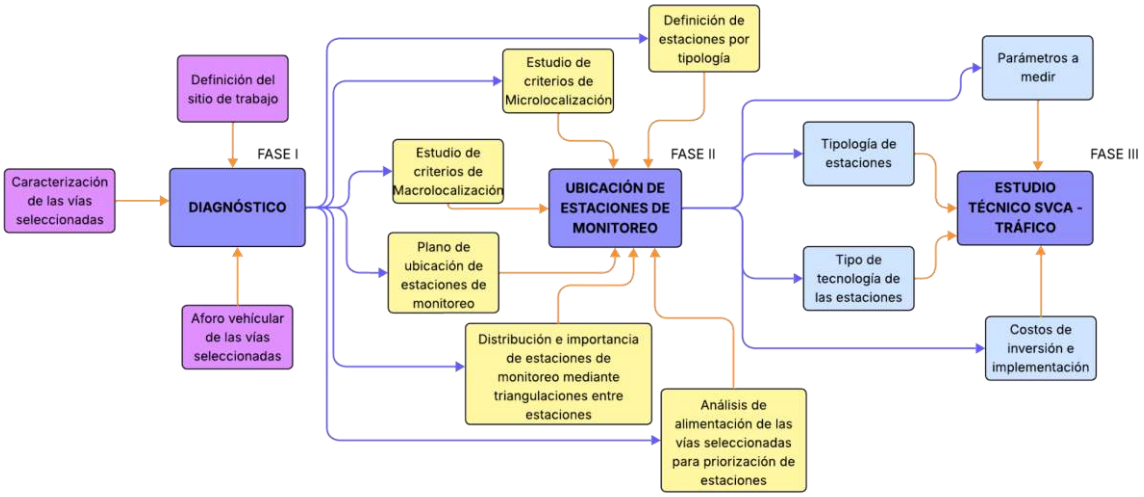
Diagnóstico: En la primera fase se realizará la identificación y clasificación de las vías principales de las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos, teniendo en cuenta el tipo de vías, ya sean arterias o principales de acuerdo a sus características, posteriormente, se llevará a cabo un estudio de aforo con el fin de evaluar el volumen de tráfico en dichas vías, finalmente en esta fase, se llevará a cabo el análisis de uso del suelo identificando dicho uso en las vías seleccionadas para determinar las zonas en las cuales se pueden ubicar las estaciones de monitoreo de calidad del aire tipo tráfico.

Desarrollo: Para esta etapa se identificarán las condiciones meteorológicas del área de estudio mediante la recolección de datos estadísticos y cartográficos confiables para determinar la macro localización de las estaciones de monitoreo, posterior a ello, se desarrollará una matriz donde se definirán los criterios de micro localización (distancias y alturas) en cada sitio definido para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire tipo tráfico, teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de las mismas, todo ello con el fin de identificar las áreas óptimas para la ubicación de las estaciones.

Diseño: En la última fase de la pasantía, considerando el objetivo de las estaciones tipo tráfico en el monitoreo de la calidad del aire en las vías principales y arterias de las dos localidades a trabajar, así como la matriz de microlocalización y los aspectos considerados para la macro localización, se definirán las especificaciones técnicas de los equipos necesarios para la medición de contaminantes atmosféricos, en dónde se incluirán los presupuestos y recursos que se deben invertir, teniendo en cuenta los diferentes tipos de estaciones: convencionales o de bajo costo. Esto incluirá la elección de equipos adecuados para medir los contaminantes específicos en los puntos identificados en las vías y las características técnicas que deben cumplir para garantizar mediciones precisas y confiables.

En el diagrama 1 se evidencia de manera resumida el esquema de las 3 fases de la metodología con las actividades a ejecutar.

Diagrama 1. Esquema de metodología fases y actividades a ejecutar



Fuente. Autoras 2025.

4. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

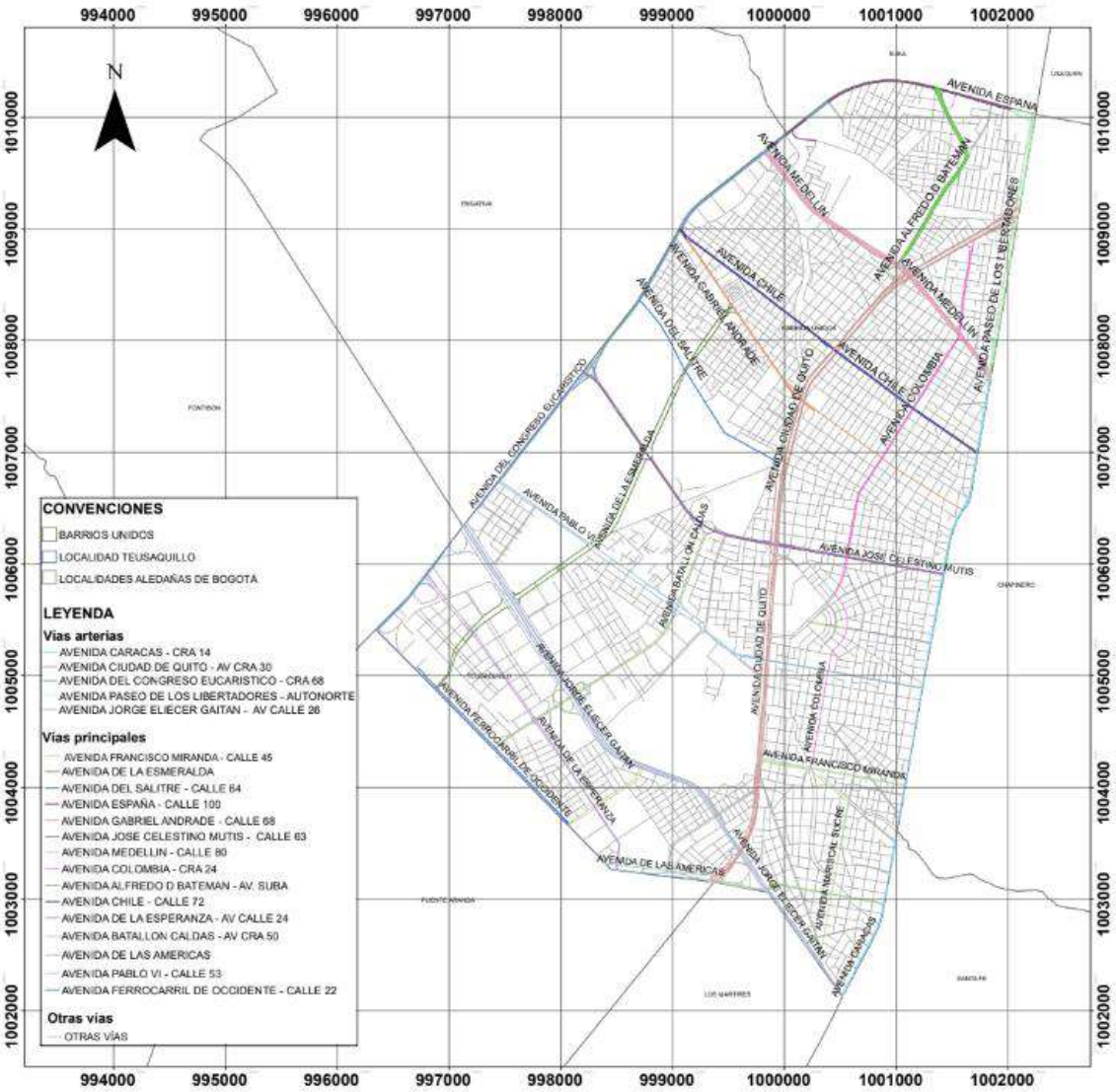
4.1 DEFINICIÓN DEL SITIO DE TRABAJO

En la etapa inicial del desarrollo de la investigación, se llevó a cabo la caracterización fundamental de las vías presentes en las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos. En el anexo 2. "*Mapa 1. Representatividad de las localidades de trabajo*" se evidencia la zona de estudio y la representatividad de las dos localidades en la ciudad de Bogotá. Como primer paso, se realizó una definición detallada de los distintos tipos de vías que conforman la malla vial de estas zonas, con énfasis en la identificación de vías arterias y vías principales que, por su ubicación estratégica y alto flujo vehicular, se consideran como potenciales y más aptas candidatas para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire. Para este propósito, se analizaron detalladamente los mapas oficiales de la malla vial de Bogotá, adaptándolos a una escala que permita observar con claridad y precisión la estructura vial de ambas localidades. Este análisis incluyó la descripción puntual de cada una de las vías relevantes, clasificándolas según su jerarquía (arterias y principales), y considerando factores como su conectividad, extensión y relevancia dentro del contexto urbano y de movilidad. Teniendo en cuenta, además, los contaminantes más relevantes encontrados en las vías de un alto aforo vehícular; material particulado PM10 y PM2.5, Óxidos de Nitrógeno NOx, Monóxido y Dióxido de Carbono CO y CO2, Compuestos Orgánicos Volátiles COV y Dióxido de Azufre SO2.

Como resultado de este proceso, se elaboró una matriz comparativa, en la que se registraron las vías existentes en cada localidad, destacando así, su interconexión y el papel que desempeñan dentro de los diferentes sectores de las localidades. Por ende, esta matriz permitió visualizar de manera sistemática la red vial prioritaria para el estudio, facilitando así la toma de decisiones respecto a la ubicación más adecuada para las estaciones de monitoreo.

La distinción realizada entre vías arterias y principales de las dos localidades se evidencia en la figura 1 y se encuentra claramente detallada en el Anexo 3. Mapa 2 *"Mapa vías arterias y principales localidades Teusaquillo y Barrios Unidos"* del presente documento.

Figura 1. Mapa vías arterias y principales localidades Teusaquillo y Barrios Unidos



Fuente. Datos abiertos Secretaría Distrital de Ambiente (2021), Infraestructura de datos espaciales de Bogotá (2024), Secretaría Distrital de Planeación (2024). Modificado por autoras 2025

Así, para la localidad de Barrios Unidos las vías identificadas que son aplicables al proyecto debidamente clasificadas se visualizan en la tabla 1.

Tabla 1. Matriz resultado de la selección de vías aplicables al proyecto. Localidad Barrios Unidos

VÍA	CLASIFICACIÓN								APLICA	
	Troncal	Autopista	Arterias	Principales	Secundarias	Colectivas	Ordinarias	Locales	SI	NO
AV LA ESMERALDA				X					X	
JOSÉ CELESTINO MUTIS - CALLE 63				X					X	
AV CARACAS			X						X	
AV PASEO DE LOS LIBERTADORES - AUTOPISTA NORTE			X						X	
AV CUIDAD DE QUITO - AV CRA 30			X						X	
AV DEL CONGRESO EUCARISTICO - CRA 68			X						X	
AV ESPAÑA - CALLE 100				X					X	
AV CHILE - CALLE 72				X					X	
AV MEDELLIN - CALLE 80				X					X	
AV GABRIEL ANDRADE - CALLE 68				X					X	
AV DEL SALITRE - CALLE 64				X					X	
AV ALFREDO BATEMAN - AV SUBA				X					X	
AV COLOMBIA - CRA 24				X					X	
CALLE 71					X					X
CALLE 63A					X					X
CALLE 90					X					X
CRA 58					X					X
CALLE 74					X					X
CALLE 67					X					X

Fuente. Autoras. 2025

Por lo que finalmente fueron identificadas 13 vías aptas para el estudio, 4 vías arterias y 9 vías principales para la localidad de Barrios Unidos.

De la misma forma, para la localidad de Teusaquillo las vías identificadas que son aplicables al proyecto debidamente clasificadas se visualizan en la tabla 2.

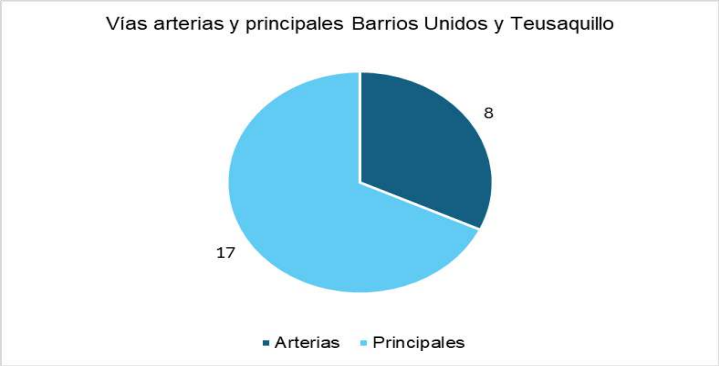
Tabla 2. Matriz resultado de la selección de vías aplicables al proyecto. Localidad Teusaquillo

VÍA	CLASIFICACIÓN								APLICA	
	Troncal	Autopista	Arterias	Principales	Secundarias	Colectivas	Ordinarias	Locales	SI	NO
AV LA ESMERALDA				X					X	
JOSÉ CELESTINO MUTIS - CALLE 63				X					X	
AV CARACAS			X						X	
AV CUIDAD DE QUITO - AV CRA 30			X						X	
AV DEL CONGRESO EUCARISTICO - CRA 68			X						X	
AV COLOMBIA - CRA 24				X					X	
AV BATALLÓN CALDAS - AV CRA 50				X					X	
AVENIDA JORGE ELIECER GAITÁN - AV CALLE 26			X						X	
AV LA ESPERANZA - AV CALLE 24				X					X	
AVENIDA FERROCARRIL DE OCCIDENTE - CALLE 22				X					X	
AV LAS AMÉRICAS				X					X	
AVENIDA PABLO VI - CALLE 53				X					X	
CARRERA 18					X					X
CALLE 61A								X		X
CALLE 50					X					X
DIAGONAL 45D					X					X
TRANSVERSAL 21								X		X
CARRERA 33					X					X
CARRERA 37					X					X
CALLE 24B								X		X
CARRERA 54					X					X
CARRERA 56								X		X

Fuente. Autoras. 2025

Así, finalmente fueron identificadas 12 vías, 4 vías arterias y 8 vías principales para la localidad de Teusaquillo. En total, para las dos localidades se identificaron 8 vías arterias y 17 vías principales como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Gráfico torta vías arterias y principales Barrios Unidos y Teusaquillo



Fuente. Autoras. 2025

4.1.1 Características de las vías

Con el propósito de caracterizar de manera técnica y estructurada las vías presentes en el área de estudio, se diseñó y consolidó una matriz de información vial, de las localidades de Barrios Unidos y Teusaquillo. Esta herramienta permitió identificar y clasificar detalladamente las principales vías arteriales y principales de ambas localidades, con base en variables como el número de carriles por sentido de circulación (sur-norte, norte-sur, oriente-occidente y occidente-oriente, según aplicara), la jerarquía vial asignada en los instrumentos de planificación territorial y la presencia de carriles exclusivos del sistema de transporte masivo TransMilenio.

Esta caracterización vial sirvió como base para identificar los tramos con mayor relevancia en términos de conectividad, accesibilidad y concentración de fuentes móviles, lo que resultó fundamental para la priorización de las estaciones de monitoreo tipo tráfico proyectadas en este estudio. En conjunto, la matriz técnica proporcionó un insumo clave para comprender la dinámica vial del área de influencia, fortaleciendo así el análisis espacial y ambiental desarrollado. La matriz correspondiente se encuentra en el Anexo 9 del presente documento.

Adicionalmente, se incluyó un análisis más detallado de los tipos de vehículos que transitan por estas vías, tomando en cuenta las categorías y subcategorías vehiculares que operan en la ciudad. Este enfoque permitió un mejor entendimiento del flujo vehicular, contribuyendo de manera más precisa a la caracterización del tráfico en las localidades estudiadas.

Tabla 3. División por categorías y subcategorías de vehículos que transitan por Bogotá.

CATEGORIA	SUBCATEGORÍA
Livianos	Automoviles
	Camperos y camionetas
	Taxis
SITP	Troncales (TM)
	Zonales
Camiones	
Buses especiales	
Motos	

Fuente. https://www.ambientebogota.gov.co/calidad-del-aire

El desarrollo de esta matriz permitió obtener un panorama detallado del flujo vehicular en las principales vías de las localidades de Barrios Unidos y Teusaquillo. De las 18 vías analizadas, se identificaron cinco que presentan un flujo vehicular extremadamente alto, lo que resulta particularmente preocupante en términos de contaminación del aire. Estas vías destacan por contar con entre tres y cinco carriles en cada sentido, lo cual facilita la circulación de una gran diversidad de vehículos. Entre ellos se incluyen autos livianos, buses del Sistema Integrado de Transporte Público de la ciudad (tanto zonales como troncales), camiones de carga, buses especiales y motocicletas. La concentración de tantos vehículos en estas vías específicas da como resultado una mayor afluencia vehicular, lo que, a su vez, contribuye a un incremento considerable en los niveles de emisiones contaminantes y, por ende, a la contaminación del aire. Dado el impacto que esta situación tiene en la calidad del aire, se vuelve imprescindible la implementación de estaciones de monitoreo de calidad del aire en puntos estratégicos, con el fin de evaluar y controlar los niveles de contaminación, y así poder tomar las medidas necesarias para mitigar los efectos negativos sobre la salud pública y el medio ambiente.

4.1.2 Aforo vehicular

Para el aforo vehicular de las principales vías y arterias de las dos localidades consideradas, se tomó como base la información proporcionada por el observatorio oficial de la Secretaría Distrital de Movilidad, especialmente en los Nodos de Contrato de Monitoreo que se encuentran dentro de la zona de estudio. Esta fuente es clave, ya que contiene datos actualizados y relevantes, lo que permitió obtener información precisa para llevar a cabo el análisis. Además, los datos fueron representados de forma clara y detallada en el Anexo 8. "*Mapa 7. Mapa de nodos de monitoreo aforo de volumen vehicular*", lo cual facilitó la visualización de la información necesaria para la investigación.

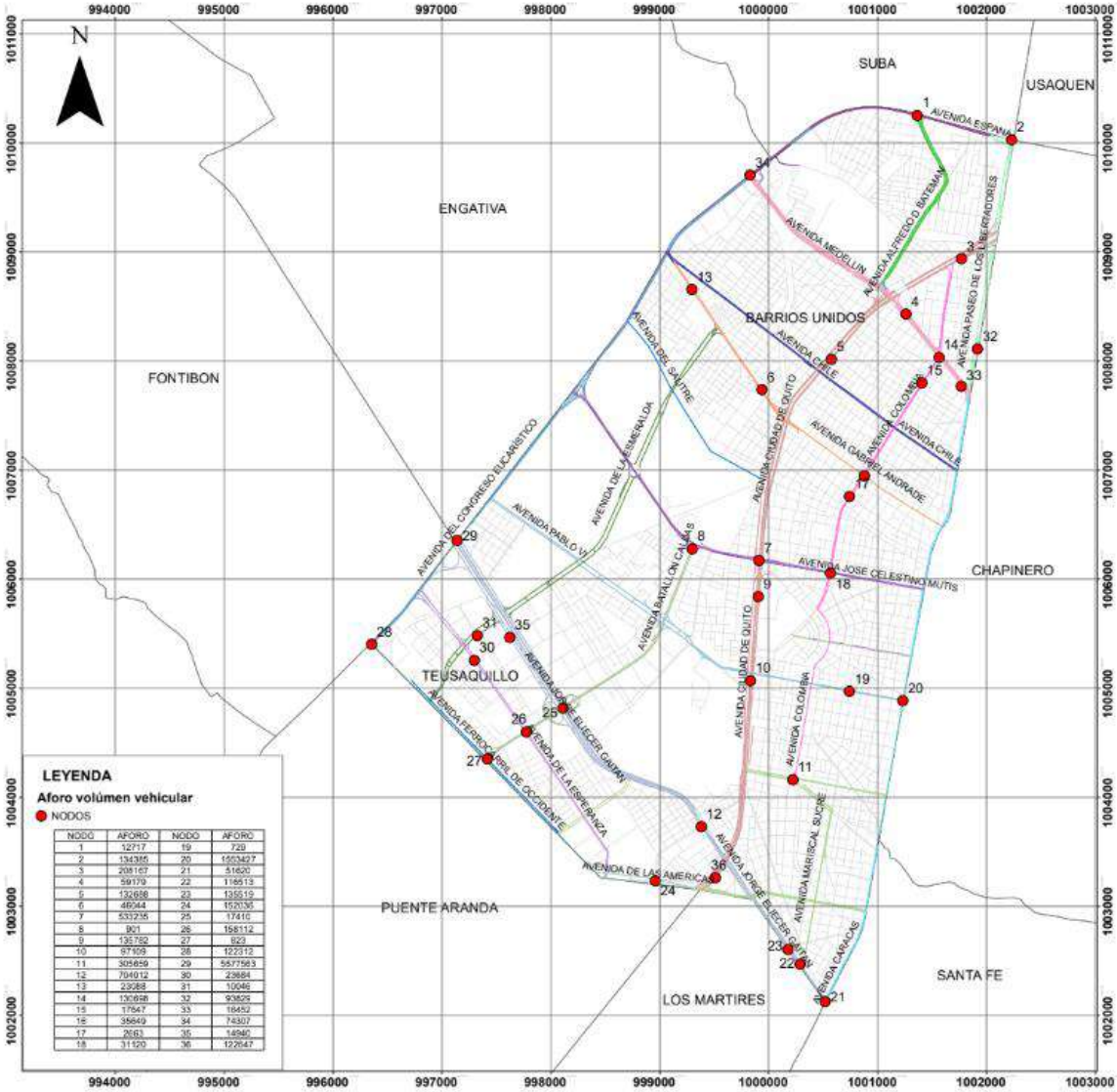
Si bien los datos analizados provienen de una fuente oficial y presentan un nivel aceptable de confiabilidad, es necesario señalar una limitante asociada a la heterogeneidad temporal de la información recopilada en los diferentes nodos de conteo vehicular. Se identificaron registros cuya última actualización data del año 2021, mientras que otros corresponden a mediciones más recientes del año 2025. Esta disparidad temporal introduce un margen de error significativo en los análisis comparativos y en la caracterización actual del comportamiento del tránsito.

La brecha entre periodos de actualización puede afectar la precisión de las proyecciones y estimaciones de emisiones atmosféricas, particularmente en un contexto urbano dinámico como el de Bogotá, donde las condiciones de movilidad y densidad vehicular pueden variar de forma sustancial en cortos periodos de tiempo.

Adicionalmente, existe una diferencia entre nodos en los estudios realizados en cada uno de ellos, ya que, algunos cuentan con 3 o más estudios de conteo (hasta 18), mientras que otros solo cuentan con uno lo que afecta en el total del volumen de vehículos mixtos aforados en los 36 nodos de Teusaquillo y Barrios Unidos consultados.

A pesar de ello, en los datos recolectados se evidencia que en el Nodo 29 del Mapa 7, ubicado en la Av Cra 68 con Av Calle 26 con un aforo de 5.577.563 vehículos y el Nodo 20 de la Av Cra 14 con Av Calle 53 un aforo de 1.553.427, se reflejan la mayor cantidad de volúmenes de vehículos en los 36 nodos encontrados en las dos localidades de estudio.

Figura 3. Ubicación Nodos de Contratos de Monitoreo de volumen vehicular en las localidades de Barrios Unidos y Teusaquillo.



Fuente. Datos abiertos Secretaría Distrital de Ambiente (2021), Infraestructura de datos espaciales de Bogotá (2024), Secretaría Distrital de Planeación (2024), Secretaría Distrital de Movilidad (2005). Modificado por autoras 2025

4.2 UBICACIÓN DE ESTACIONES

4.2.1 Criterios de Macrolocalización

El estudio de la macrolocalización de la zona de estudio juega un papel importante, ya que, con este es posible identificar las condiciones meteorológicas y geográficas del terreno a nivel general, con el fin de realizar una minuciosa selección de los puntos estratégicos en

donde es posible ubicar estaciones de monitoreo de calidad del aire tipo tráfico, sin distinción entre indicativas y convencionales.

En ese orden fue necesario evidenciar los tipos de uso de suelo que tiene la ciudad de Bogotá, más objetivamente en las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos, por lo que se llevó a cabo una investigación de macrolocalización enfocado en los usos del suelo aledaños a las vías arterias y principales previamente identificadas. El cual tuvo como propósito establecer la viabilidad de instalar estaciones de monitoreo de calidad del aire, considerando las características del entorno inmediato a dichas vías. Para ello, se delimitaron zonas de 10 metros a cada lado de las vías seleccionadas, con el objeto de examinar el tipo de uso del suelo predominante en estas zonas de influencia directa. Esta distancia se definió como una zona crítica de evaluación, ya que representa el entorno más próximo a las emisiones vehiculares y la posible instalación de equipos de medición ambiental de calidad del aire, además teniendo en cuenta la norma técnica de calidad del aire CFR 40 Parte 58.

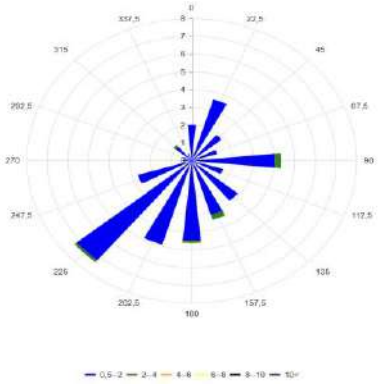
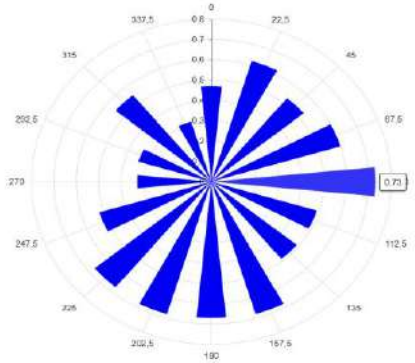
Los resultados del análisis evidenciaron que, tanto en la localidad de Barrios Unidos como en la de Teusaquillo, el uso del suelo correspondiente a las vías principales y arterias es predominantemente urbano. Esta categoría resulta favorable para el presente proyecto, ya que, el suelo urbano permite, en la mayoría de los casos, la implementación de infraestructura tecnológica para monitoreo ambiental sin mayores restricciones normativas, logrando así, evitar problemas en la compatibilidad de uso.

La información obtenida fue representada de manera gráfica mediante el software ArcGIS utilizado como herramienta para dar lugar a la construcción de mapas temáticos específicos para cada una de las localidades. En los cuales, se visualiza de manera clara la distribución del uso del suelo en relación con las vías en cuestión. Este mapa se encuentra titulado como *"Mapa 3. Usos del suelo en vías seleccionadas de las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos"*, y se pueden consultar en el anexo 4.

Por otra parte, se llevó a cabo un análisis de los factores meteorológicos relevantes para el adecuado funcionamiento e instalación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire. Este estudio consideró especialmente la dirección y velocidad del viento, variables fundamentales para comprender la dispersión y concentración de los contaminantes

atmosféricos asociados a fuentes móviles, los cuales constituyen el foco principal de la presente pasantía.

Para ello, se elaboró una rosa de los vientos utilizando datos de la estación móvil ubicada en la carrera 7ma, perteneciente a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. El análisis se basó en información horaria de velocidad y dirección del viento, correspondiente al periodo comprendido entre el 1 de mayo y el 1 de junio de 2025. Se consideraron 16 sectores (cada 22,5°) para representar las direcciones posibles y es una rosa de tipo frecuencia, con el fin de identificar las direcciones predominantes del viento y su frecuencia de ocurrencia, información clave para orientar la ubicación estratégica de estaciones tipo tráfico. Como complemento al análisis, se elaboró también una rosa de los vientos de tipo promedio utilizando la misma información horaria de dirección y velocidad del viento registrada por la estación móvil ubicada en la carrera 7ma, perteneciente a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, durante el periodo del 1 de mayo al 1 de junio de 2025. En esta representación se consideraron igualmente 16 sectores de 22,5°, pero en lugar de mostrar la frecuencia de ocurrencia, se graficó la velocidad media del viento para cada dirección. Este tipo de rosa permite visualizar qué direcciones presentan vientos más intensos en promedio, lo que resulta relevante para evaluar la capacidad de transporte y dispersión de contaminantes en la zona de estudio. Las rosas de los vientos se observan en las Figuras 4 y 5.

Figura 4. Rosa de los vientos tipo frecuencia estación móvil 7ma	**Figura 5. Rosa de los vientos tipo promedio estación móvil 7ma**
	

Fuente. http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Report/PollutantRose

Las rosas de los vientos elaboradas con base en los datos horarios de la estación móvil de la carrera 7ma, correspondientes al periodo comprendido entre el 1 de mayo y el 1 de junio

de 2025, permiten caracterizar el comportamiento del viento en la zona de interés, aspecto fundamental para orientar la ubicación estratégica de estaciones de monitoreo de calidad del aire tipo tráfico.

La rosa de tipo frecuencia evidencia las direcciones predominantes del viento durante el periodo analizado, resaltando un mayor número de ocurrencias desde el este, seguido por componentes del sur y suroeste. Esta información permite identificar los sectores hacia los cuales se trasladan de manera más constante los contaminantes atmosféricos emitidos por las fuentes móviles, lo cual es clave para delimitar las zonas de mayor exposición potencial.

Por su parte, la rosa de vientos tipo promedio aporta información complementaria al representar la velocidad media asociada a cada dirección. En este caso, se observa que los vientos provenientes del este también presentan velocidades medias más elevadas en comparación con otras direcciones, lo que indica un mayor potencial de transporte horizontal de contaminantes. Esta característica es determinante al momento de definir la cobertura espacial del monitoreo, ya que permite priorizar ubicaciones donde la dinámica del viento favorece la dispersión de emisiones vehiculares y, por tanto, la captura representativa de datos.

El análisis conjunto de ambas representaciones respalda técnicamente la toma de decisiones orientadas a ubicar las estaciones tipo tráfico en sectores expuestos al arrastre de contaminantes por vientos frecuentes y con capacidad de desplazamiento, lo que contribuye a un diseño de red de monitoreo más efectivo y ajustado a las condiciones atmosféricas locales.

4.2.2 Criterios de Microlocalización

En la segunda etapa planteada dentro de la metodología del trabajo, se desarrollaron una serie de actividades orientadas a establecer con mayor precisión la macro y micro localización de posibles puntos para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire. Esta fase tuvo como objetivo principal definir ubicaciones específicas sobre las vías arterias y principales de las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos, siguiendo criterios técnicos y normativos reconocidos a nivel internacional. Para ello, se tomó como base la norma técnica de calidad del aire CFR 40 Parte 58 ubicado en el Código de Regulaciones

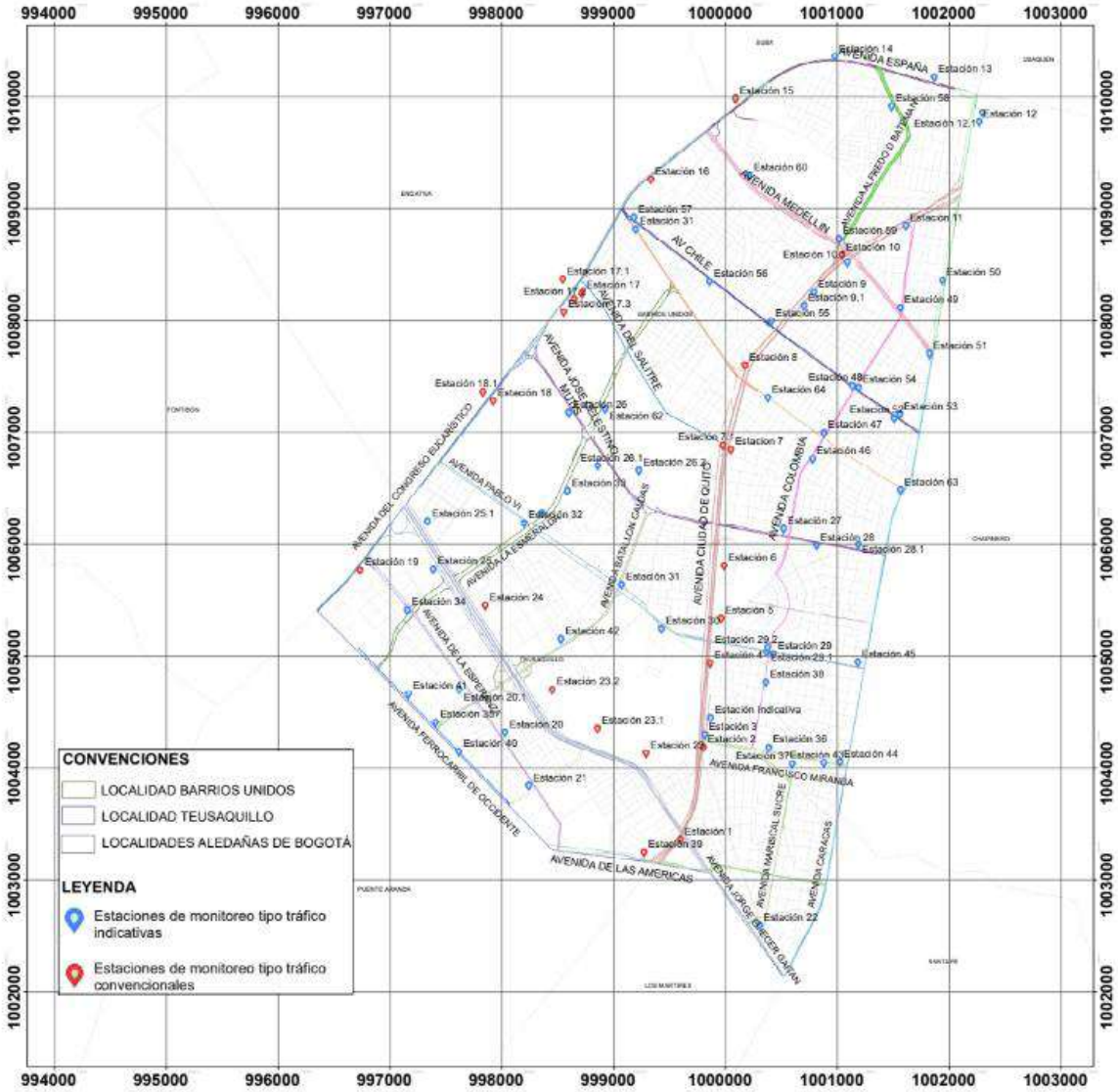
Federales de los Estados Unidos (EPA), que establece los lineamientos mínimos para la correcta ubicación de estaciones de muestreo. Entre los aspectos técnicos considerados se incluyen:

- **La proximidad a elementos naturales o artificiales que podrían interferir con la recolección de datos, como árboles, vegetación densa, edificaciones o estructuras elevadas.**
- **La distancia de ubicación respecto a la vía, recomendando un rango entre 2 y 10 metros desde el borde de la calzada.**
- **La altura adecuada de instalación, que debe encontrarse entre 2 y 15 metros sobre el nivel del suelo, dependiendo del tipo de estación.**
- **El tipo de estación requerida (indicativa o convencional), de acuerdo con el propósito de la medición.**

Y otros factores complementarios, tales como la seguridad del sitio, la accesibilidad para mantenimiento y las estructuras de soporte.

Con el fin de validar estos criterios en el contexto real de las localidades, se realizó un recorrido de campo por las vías seleccionadas, lo cual permitió observar las condiciones físicas y operativas de los lugares previamente identificados. De esta forma, durante estas visitas se tomaron registros fotográficos y notas de observación detalladas, permitiendo así alimentar una matriz técnica con información precisa de cada uno de los puntos propuestos. Adicionalmente, se realizó un análisis de cada uno de los puntos identificados mencionando su ubicación, especificaciones técnicas y detalle de su posible o no instalación. Como resultado de esta actividad, se identificaron un total de 82 posibles ubicaciones viables para la instalación de las estaciones de monitoreo tipo tráfico convencionales e indicativas, distribuidas estratégicamente sobre las arterias y vías principales previamente analizadas. Toda la información recopilada, incluyendo las evidencias visuales, los criterios técnicos aplicados, la evaluación de cada sitio y la matriz de localización puede consultarse en el anexo 10 de este documento, adicionalmente, el mapa de ubicación de los 64 puntos iniciales se evidencia en la figura 6 y se puede consultar a detalle en el anexo 5. "*Mapa 4. Posibles ubicaciones estaciones de monitoreo tipo tráfico convencionales e indicativas".*

Figura 6. Posibles ubicaciones estaciones de monitoreo tipo tráfico convencionales e indicativas



Fuente. Datos abiertos Secretaría Distrital de Ambiente (2021), Infraestructura de datos espaciales de Bogotá (2024), Secretaría Distrital de Planeación (2024). Modificado por autoras 2025.

4.2.3 Número de estaciones por tipología

Como resultado del análisis detallado de los 82 puntos inicialmente identificados durante el recorrido de campo, y tras aplicar los criterios técnicos establecidos, se seleccionaron un total de 54 ubicaciones definitivas para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire tipo tráfico. Esta selección se fundamentó en la evaluación de variables como el flujo vehicular estimado, las condiciones físicas del entorno, la disponibilidad de espacio, y la conformidad con los lineamientos establecidos en el CFR 40 Parte 58. De las 54

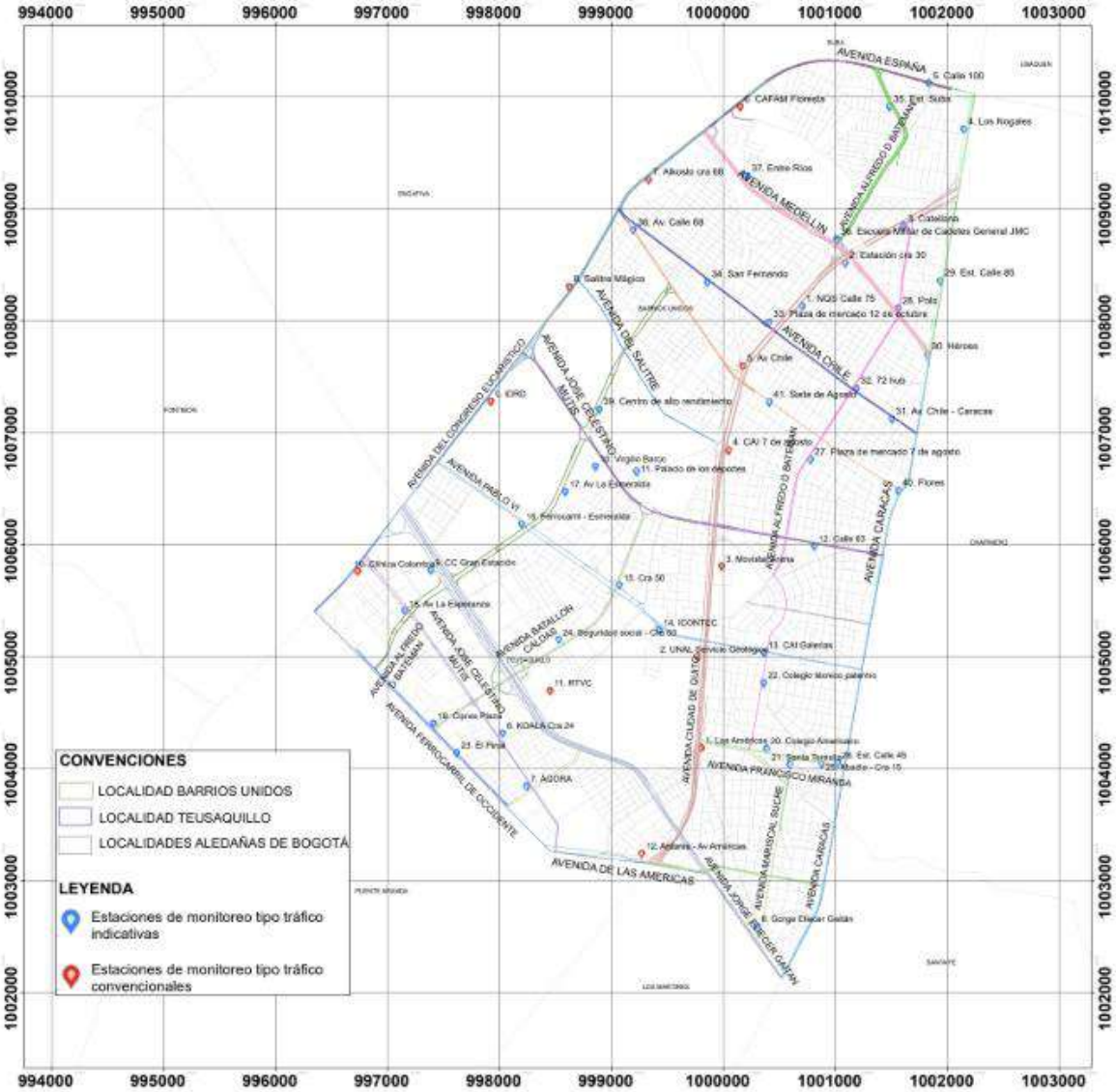
ubicaciones seleccionadas, 42 corresponden a estaciones indicativas, por su facilidad de instalación y alcance para la medición de tendencias, y 12 a estaciones convencionales, destinadas a proveer datos de mayor precisión y continuidad, a cada una de las estaciones se le asignó un nombre y un número, permitiendo así, su fácil identificación. Estas estaciones se distribuyen estratégicamente sobre las vías principales y arterias de las localidades de Barrios Unidos y Teusaquillo, garantizando así una cobertura representativa de las condiciones del tráfico vehicular y su relación con la calidad del aire urbano.

4.2.4 Plano de ubicación

De acuerdo con la ubicación de las estaciones seleccionadas, se evidencia que la vía con el mayor número de puntos de monitoreo es la Avenida Ciudad de Quito (Avenida Carrera 30), con un total de 9 estaciones, 6 convencionales y 3 indicativas. Esta concentración de estaciones responde a la importancia estratégica de esta avenida dentro de la red vial de las localidades de Barrios Unidos y Teusaquillo, ya que actúa como un eje estructurante de movilidad urbana.

La Avenida Ciudad de Quito no solo conecta transversalmente ambas localidades, sino que también facilita el acceso a vías secundarias, corredores complementarios y barrios residenciales y comerciales a lo largo de su trazado. Esta conectividad incrementa significativamente la densidad de tráfico vehicular. En este sentido, priorizar el monitoreo de la calidad del aire en esta arteria vial permite obtener información representativa sobre el comportamiento de las emisiones asociadas al tránsito, tanto local como interzonal. Esta situación se ilustra en el Gráfico 3, donde se presenta la distribución de las estaciones proyectadas en función de la jerarquía vial y la conectividad entre sectores urbanos.

Figura 7. Ubicación estaciones de monitoreo tipo tráfico convencionales e indicativas en las localidades de Barrios Unidos y Teusaquillo.



Fuente. Datos abiertos Secretaría Distrital de Ambiente (2021), Infraestructura de datos espaciales de Bogotá (2024), Secretaría Distrital de Planeación (2024). Modificado por autoras 2025.

La ubicación de las estaciones seleccionadas se presenta en el Plano correspondiente, incluido en el Anexo 6. *"Mapa 5. Ubicación estaciones de monitoreo tipo tráfico convencionales e indicativas".*

4.2.5 Información general estaciones de monitoreo

El análisis de la información general de las estaciones de monitoreo se realizó por cuadrantes con base a las vías arterias y principales tal y como se evidencia en las tablas 4, 5, 6, 7, 8 y 9 y más detalladamente en el Anexo 9 del presente documento.

Tabla 4. Información general estaciones de monitoreo polígono 1

POLÍGONO 1				ESTACIONES DE MONITOREO		
		Punto		6	5	4
		Nombre		CAFAM floresta	Calle 100	Los Nogales
		Coordenada	Latitud	4,68565	4,687661	4,683951
			Longitud	-74,076201	-74,060997	-74,058196
		Ubicación		Parqueadero CAFAM floresta	calle 100 con tv 38 bomba terpel	autopista norte con calle 96
		Tipo de estación	Indicativa		X	X
			Convencion	X		
Descripción	El polígono delimitado abarca un sector comprendido entre las vías Avenida España al norte, La Av ciudad de Quito al sur, la Cra 68 al occidente la calle 100 al oriente. Dentro de este se encuentran 7 puntos de monitoreo.	Descripción del sitio		Espacio amplio al aire libre	Andén amplio para la instalación, cuenta con pocos arboles cerca	Andén amplio, la zona cuenta con edificacines de baja altura cerca
Área (Km2)	2,65	Foto				

ESTACIONES DE MONITOREO			
3	**36**	**37**	**35**
Castellana	Escuela Militar de Cadetes General JMC	Entre Rios	Est. Suba
4,676172	4,675005	4,680227	4,685775
-74,063079	-74,068367	-74,075595	-74,064169
cra 30 antes de puente de la 100 - castellana	Calle 84 #20	Calle 80 #54	Estación suba - Calle 100
X	X	X	X
Cuenta con pocos arboles en su cercanía	Zona despejada en la entrada de la escuela	Ubicada cerca a conjunto residencial, con pocos arboles	Anden amplio con cercanía a edificaciónes de baja altura

Fuente. Autoras. 2025

Tabla 5. Información general estaciones de monitoreo polígono 2

POLÍGONO 2				ESTACIONES DE MONITOREO		
		Punto		7	8	11
		Nombre		Alkosto cra 68	Salitre Mágico	Palacio de los Deportes
		Coordenada	Latitud	4,67985	4,671218	4,65636
			Longitud	-74,083599	-74,089996	-74,084558
		Ubicación		Alkosto de la 68 # 63	Entrada Salitre Mágico	Palacio de los deportes calle 63
		Tipo de estación	Indicativa			X
			Convencional	X	X	
Descripción	El polígono 2 está delimitado por corredores viales estratégicos como la Avenida Medellín al norte, la Avenida NQS y la Avenida Chile al oriente, y la Avenida La Esperanza y la Avenida 68 al occidente. Dentro de este cuadrante se encuentran ubicados 8 puntos de monitoreo. Esta zona se caracteriza por su dinamismo urbano y alto flujo vehicular.	Descripción del sitio		Zona amplia con cercanía de algunos arboles dispersos	Zona despejada en la entrada del parque de diversiones	Zona amplia con cobertura vegetal (pasto), con cercanía de arboles dispersos
Área (Km2)	4,69	Foto				

ESTACIONES DE MONITOREO				
5	33	38	34	39
Av Chile	Plaza de mercado 12 de octubre	Av calle 68	San Fernando	Centro de Alto Rendimiento
4,664806	4,668407	4,675872	4,671613	4,661319
-74,075986	-74,073839	-74,084761	-74,0788	-74,087554
cra 30 con calle 68	Plaza de mercado 12 de Octubre	Av Calle 68 #65	Parque púlico San Fernando	Av La Esmeralda #63
	X		X	X
X		X		
Cercanía a la estación de Transmilenio Av Chile en la cra 30	Zona despejada sin ningun tipo de vegetación cerca, sin embargo cuenta con pocas edificaciones cerca	Zona medianamente despejada con cercanía a varias edificaciones	Se encuentra cerca a zona verde considerable (parque)	Cerca a parque de gran tamaño y densidad de vegtación (Simón Bolivar)

Fuente. Autoras. 2025

Tabla 6. Información general estaciones de monitoreo polígono 3

POLÍGONO 3		ESTACIONES DE MONITOREO				
	Punto	1	2	29	30	31
	Nombre	NQS Calle 75	Est. Cra 30	Est. Calle 85	Héroes	Av Chile - Caracas
	Coordenada Latitud	4,669718	4,673187	4,671758	4,665764	4,660565
	Coordenada Longitud	-74,071224	-74,067736	-74,060094	-74,061095	-74,063995
	Ubicación	cra 30 puente estación calle 75	cra 30 con calle 80 costado sur - norte	Autopista estación Calle 85	Caracas - Autopista - Av Colombia	Av Chile con Caracas
	Tipo de estación Indicativa	X	norte	X	X	X
	Tipo de estación Convencional					
Descripción: El Polígono 3 comprende una zona estratégica delimitada al occidente y al norte por la Avenida Ciudad de Quito, al oriente por la Avenida Caracas, y al sur por la Calle 63. Dentro de este polígono se ubican 11 puntos de monitoreo, lo que lo convierte en el más importante del área de estudio, principalmente por la extensión y relevancia de la Avenida Carrera 30 que abarca gran parte del polígono.	Descripción del sitio	Ubicada a unos 50m del puente peatonal de la estación calle 75 en la cra 30	Ubicada en separador de gran tamaño, despejado con pocos arboles en su cercanía	Andén de gran tamaño despejado con pocos arboles cerca	Ubicada en andén de intersección vial, al lado de semaforos	Ubicada en andén de tamaño medio con edificaciones de baja altura cerca
Área (Km2): 3,91	Foto					

ESTACIONES DE MONITOREO					
40	4	27	41	32	28
Flores	CAI 7 de agosto	Plaza de Mercado 7 de agosto	Siete de agosto	72 hub	Polo
4,654813	4,658091	4,657349	4,661991	4,662996	4,669528
-74,063452	-74,077115	-74,070605	-74,073777	-74,06679	-74,063451
Calle 68 con Caracas	cra 30 con calle 04 costado sur - norte	Plaza de mercado 7 de Agosto	Calle 68 con cra 28b	Calle 72 con cra 20b	Bomba calle 80 con Av Colombia
X		X	X	X	X
	X				
Ubicada en andén de tamaño medio con edificaciones de baja altura y pocos arboles cerca	Ubicada entre cobertura vegetal y pavimento, a unos 20m de puente peatonal, pocos arboles cerca	Cerca a edificación de poca altura y a pocos arboles altos	Ubicada en esquina con andén mediano, cerca a edificaciones de poca alura	Cerca a un parque pequeño con cobertura vegetal y pavimento, arboles cerca	Ubicada al lado de semaforo, con amplio espacio

Fuente. Autoras. 2025

Tabla 7. Información general estaciones de monitoreo polígono 4

POLÍGONO 4				ESTACIONES DE MONITOREO			
		Punto		9	10	2	11
		Nombre		IDRD	Virgilio Barco	UNAL Servicio Geológico	RTVC
		Coordenada	Latitud	4,662039	4,656751	4,641342	4,638615
			Longitud	-74,096216	-74,08787	-74,079667	-74,091542
		Ubicación		IDRD	Virgilio Barco - calle 63	UNAL - 30 con calle 45 costado sur norte	RTVC calle 26
		Tipo de estación	Indicativa		X		
			Convencional	X		X	X
Descripción	Se encuentra delimitado por corredores clave como la Avenida Jose Celestino Mutis (al norte), la Avenida NQS (al oriente), la Avenida La Esperanza (al sur) y la Av. 68 en el occidente. Dentro del poligono hay 3 puntos de monitoreo. Adicionalmente, se encuentran dos espacios amplios y de zonas verdes, el IDRD y la Universidad Nacional.	Descripción del sitio		Ubicada cerca a parque de gran tamaño y vegetación, en andén amplio, a 50m de puente peatonal	Andén amplio con cobertura vegetal al lado, cerca a parque Simón Bolivar	Espacio amplio con cercanía a parque y vegetación de la UNAL	Andén amplio a 10m de bandera de Colombia
Área (Km2)	5,49	Foto					

ESTACIONES DE MONITOREO				
24	14	15	16	17
Seguridad Social - cra 50	ICONTEC	Cra 50	Ferrocarril - Esmeralda	Av La Esmeralda
4,64273	4,64352	4,647157	4,652085	4,654693
-74,090779	-74,082743	-74,085915	-74,093784	-74,090278
Policia Nacional - Seguridad social	ICONTEC	Cra 50 con calle 53	Esmeralda con calle 53 esquina occ - ori	Av la Esmeralda
X	X	X	X	X
Ubicada en andén separador de intersección cra 50 diagonal a Centro de Seguridad Social, al lado del semáforo	Ubicado a 30m de puente peatonal, zona amplia frente a la entrada de centro de ICONTEC	Frente a conuuntos residenciales, andén oriente - occidente zona de cobertura vegetal	Intersección víal, a 10m de semáforos, cerca a parque	Andén amplio con cercanía de cobertura vegetal y algunos arboles

Fuente. Autoras. 2025

Tabla 8. Información general estaciones de monitoreo polígono 5

POLIGONO 5		ESTACIONES DE MONITOREO				
		Punto		3	12	26	25
		Nombre		Movistar Arena	Calle 63	Est Calle 45	Abadía - Cra 15
		Coordenada	Latitud	4,648712	4,650315	4,632849	4,632681
			Longitud	-74,07764	-74,070248	-74,06834	-74,069675
		Ubicación		cra 30 con calle 53 costado norte - sur	calle 63 bomba BRIO costado ori - occ	AK 45 con caracas	Carrera 15 con 65
		Tipo de estación	Indicativa		X	X	X
			Convencional	X			
Descripción	Este polígono está delimitado al norte por la Calle 63, al oriente por la Avenida Caracas, al sur por la Avenida de Las Américas, y al occidente por la Carrera 50 Esta área combina un uso educativo, recreativo y residencial, lo que la convierte en una zona mixta de alta movilidad vehicular. Dentro del polígono hay 10 puntos de monitoreo, siendo el segundo polígono con cobertura por el SVCA diseñado.	Descripción del sitio		En el costado sur de la edificación al lado del parqueadero sur. Parque cerca	En el costado oriente - occidente, al lado de la bomba. Hay pocos arboles cercanos a la zona, anden medianamente espacioso	Por la 45 llegando a la caracas costado occiente - oiente, edificaciones de altura media	Ubicado en separador de calzadas de la vi, en piso con cobertura vegetal, pocos arboles cerca
Área (Km2)	4,65	Foto					

ESTACIONES DE MONITOREO					
8	1	20	21	22	13
Jorge Eliecer Gaitán	Las Américas	Colegio Americano	Santa Teresita	Colegio Técnico Palermo	CAI Galerías
4,619521	4,634021	4,633949	4,632705	4,639261	4,641701
-74,074826	-74,079309	-74,074087	-74,072203	-74,074302	-74,074302
Estatua Gorge Eliecer Gaitán - calle 26	Américas con 30	Calle 45 con 22	Cra 19 con calle 44	Cra 24	CAI frente a CC Galerías
X		X	X	X	X
	X				
Andén amplio con estructuras de altura baja y muy poca vegetación cercana. A 50m de semáforo	Se debe elevar para cumplir con la altura, ya que existen una alta cantidad de arboles de gran tamaño cerca	Proximidad con poca cantidad de árboles en la calle 45 a 50m de cruzar la cra 22	Ubicada en el separador de las dos calzadas en donde hay cobertura vegetal	Andén con espacio medio y justo para la instalación, edificación con bajo nivel de altura	Esquina sur, frente al centro comercial galerías, costado occidente - oriente

Fuente. Autoras. 2025

Tabla 9. Información general estaciones de monitoreo polígono 6

POLÍGONO 6				ESTACIONES DE MONITOREO		
		Punto		10	9	18
		Nombre		Clinica Colombia	CC Gran Estación	Av La Esperanza
		Coordenada	Latitud	4,648257	4,648305	4,645027
			Longitud	-74,106994	-74,101057	-74,103155
		Ubicación		Parqueadero Clinica Colombia	Gran Estación - calle 26	Entre la Esperanza y la Esmeralda
		Tipo de estación	Indicativa		X	X
			Convencional	X		
Descripción	Este polígono se encuentra delimitado por corredores importantes como la Avenida La Esperanza al norte, la Avenida NQS al oriente, y el costado sur del complejo de Corferias y la Avenida de Las Américas. En su interior se ubican sitios clave como el centro comercial Gran Estación, la Clínica Colombia, el edificio de RTVC, la sede del ICONTEC y la sede del Servicio Geológico Colombiano (UNAL). Dentro del polígono se encuentran 8 puntos de monitoreo	Descripción del sitio		Espacio amplio al aire libre	Ubicado a la entrada del Centro Comercial, zona amplia y abierta, está cerca parques	Andén amplio con cobertura vegetal. Edificaciones de conjuntos residenciales a 40m
Área (Km2)	3,23	Foto				

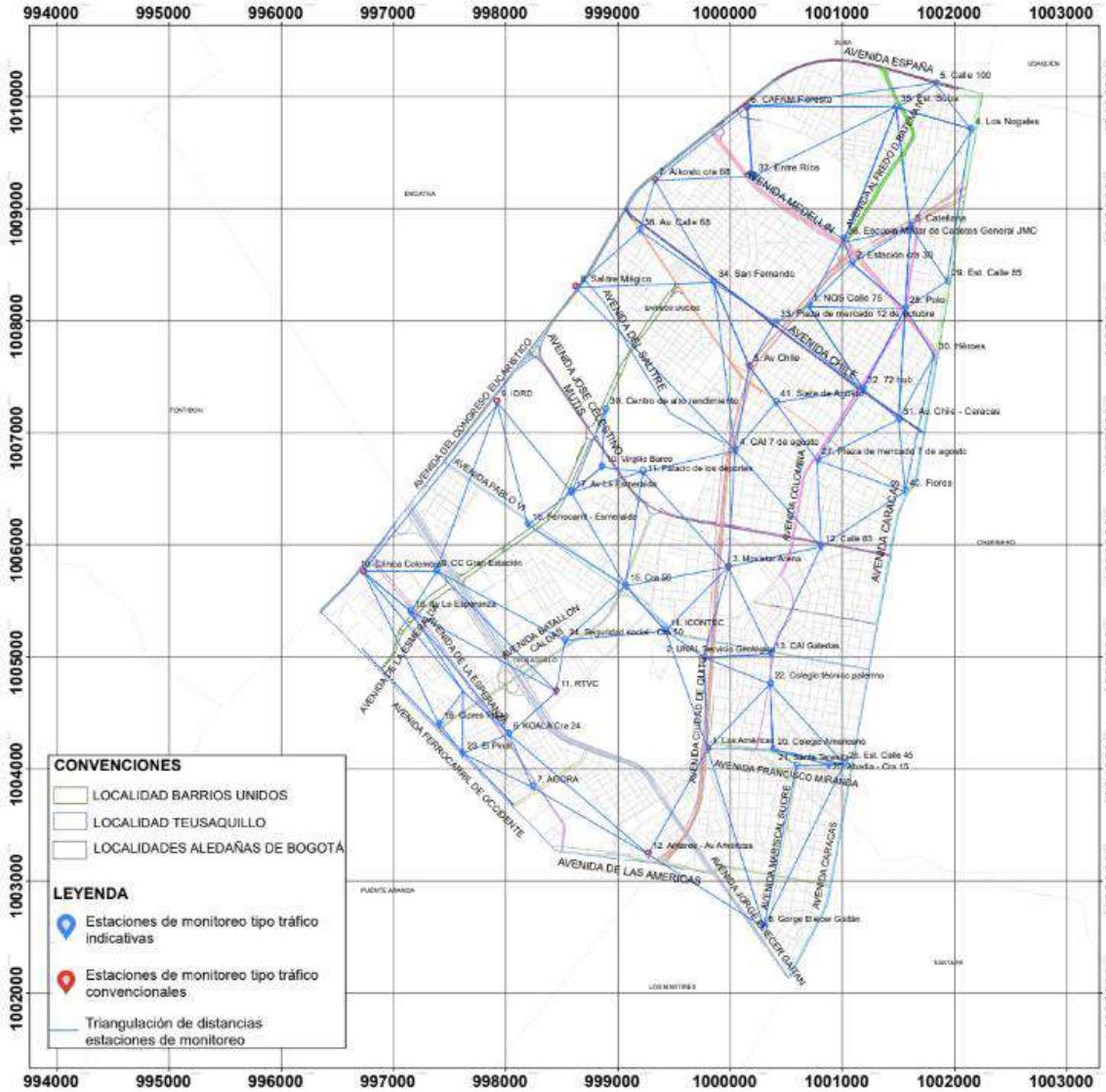
ESTACIONES DE MONITOREO				
19	23	7	6	12
Cipres Plaza	El Pinal	AGORA	KOALA Cra 24	Antares - Av Américas
4,636006	4,633566	4,630839	4,635121	4,625431
-74,100865	-74,099053	-74,09333	-74,095309	-74,084054
CIPRES PLAZA	Conjunto frente al Pinal	Corferias - Av la Esperanza	Cra 24, AV Esperanza - KOALA	Américas con 30
X	X	X	X	
				X
Andén amplio despejado, cercanía de muy pocos arboles	Esquina de andén espacioso, al lado de un poste de luz pública, frente a conjunto residencial de casas (edificaciones bajas)	Ubicada frente a la amplia entrada del centro de convenciones por la Av La Esperanza	Ubicada frente al Grand Hyatt por la Av La Esperanza, andén muy amplio con pocos árboles y despejada de edificaciones	Ubicada en andén de intersección despejado

Fuente. Autoras. 2025

4.2.6 Triangulaciones

Con el propósito de optimizar la ubicación de las estaciones de monitoreo y garantizar una distribución equidistante, se llevó a cabo un análisis geoespacial de alta precisión, considerando tanto las características de las vías en las que se emplazan las estaciones como las interacciones posibles entre estas. Este proceso incluyó un enfoque de triangulación que permitió distribuir las estaciones de forma balanceada, minimizando el sesgo de ubicación y maximizando la representatividad de los datos recolectados en el contexto urbano. La triangulación se realizó utilizando la plataforma de análisis espacial ArcGIS, que facilitó la creación de un modelo digital del terreno con la superposición de datos de red vial y tráfico, generando el Anexo 7*. "Mapa 6. Triangulaciones entre estaciones de monitoreo"* con la distribución óptima de las estaciones.

Figura 7. Triangulaciones entre estaciones de monitoreo



Fuente. Datos abiertos Secretaría Distrital de Ambiente (2021), Infraestructura de datos espaciales de Bogotá (2024), Secretaría Distrital de Planeación (2024). Modificado por autoras 2025.

Para asegurar la efectividad del proceso de triangulación, se consideraron las vías arteriales y las principales, así como sus vías de alimentación (vías de acceso o desembocadura), que conectan con las arterias principales y afectan el flujo vehicular. Estas vías de alimentación desempeñan un papel crucial en la distribución del tráfico y, por ende, en la dispersión de contaminantes atmosféricos, cada una de ellas se encuentra en el Anexo 12. La selección de las ubicaciones de las estaciones implicó un análisis detallado de las intersecciones entre las vías, con un estudio pormenorizado de las conexiones viales que permiten la circulación del tráfico desde las zonas periféricas hasta el centro urbano,

asegurando así que las estaciones se colocaran en puntos de máxima representatividad de la calidad del aire.

Este análisis incluyó el uso de algoritmos de optimización espacial para generar una distribución homogénea de las estaciones dentro de un radio determinado, tomando en cuenta no solo la distancia entre ellas, sino también factores dinámicos como la conectividad vial, las condiciones del flujo vehicular y las características topográficas de la zona. A través de esta metodología, se logró la ubicación de estaciones que no solo cubren adecuadamente las zonas críticas, sino que también están alineadas con los estándares técnicos establecidos en las normativas de calidad del aire y con la necesidad de reflejar de manera precisa los niveles de contaminación derivados del tránsito y las actividades industriales.

Adicionalmente, permite priorizar la instalación de las estaciones de monitoreo en aquellas ubicaciones donde se registra una mayor influencia del tráfico vehicular, considerando la jerarquía vial y el nivel de alimentación de las vías en que se ubican. Esta priorización resulta fundamental, dado el alto costo asociado a la instalación y puesta en operación de las estaciones proyectadas (12 estaciones convencionales y 42 estaciones indicativas). En este sentido, las estaciones que presentan mayor relevancia en términos de cobertura de emisiones vehiculares y representatividad de la red vial tendrán prioridad en su implementación, son las ubicadas sobre la Av ciudad de Quito - Av cra 30 y Av del congreso eucarístico - Cra 68.

4.3 ESTUDIO TÉCNICO SVCA - TRÁFICO

4.3.1 Tipologías de Estaciones

Para llevar a cabo la evaluación y el análisis de la calidad del aire con base en los datos obtenidos por las estaciones de monitoreo, es fundamental considerar las características de los puntos donde se realiza la medición. Por ello, las estaciones se clasifican en distintos niveles, lo que permite identificar con claridad tanto sus características como la representatividad de la información que generan. (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010)

De esta manera, las estaciones de monitoreo consideradas en el presente trabajo se clasifican según los siguientes niveles:

Nivel 1: Tipo de área

Se clasifica la estación con base en la distribución y densidad de edificaciones presentes en su entorno. Para este estudio, corresponde a un **área urbana**, es decir, una zona completamente urbanizada.

Nivel 2: Tiempo de muestreo

Este nivel busca establecer la representatividad temporal de los datos recolectados. En este caso, se incluyen estaciones **fijas**, según el tipo de monitoreo realizado.

Nivel 3: Emisiones dominantes

Se clasifica la estación de acuerdo con la influencia de las fuentes emisoras predominantes en el área. Para el presente estudio, las estaciones corresponden a la **categoría de tráfico**, dado que están expuestas principalmente a emisiones vehiculares y es el objeto de estudio del presente proyecto.

Nivel 4: Información adicional

Hace referencia a especificaciones adicionales relacionadas con la caracterización de las estaciones. En este caso, se determina que la escala es de **microescala**, lo que implica una alta resolución espacial en el análisis del entorno inmediato de la estación.

De acuerdo con la tipología establecida en los cuatro niveles de clasificación (tipo de área, tiempo de muestreo, emisiones dominantes e información adicional) se desarrolló el diseño completo de las estaciones de monitoreo. Esta clasificación permitió orientar cada una de las decisiones técnicas del proyecto, desde la selección de las ubicaciones hasta la definición de los equipos y métodos de medición más adecuados. En ese sentido, el diseño de las estaciones responde de manera coherente a las características del entorno urbano, a las necesidades de representatividad temporal, a la influencia de las fuentes emisoras para este caso emisiones vehiculares y a una escala de análisis detallada que favorece una

caracterización precisa de la calidad del aire en puntos estratégicos de las localidades evaluadas.

4.3.1.1 Indicativas

Las estaciones indicativas de calidad del aire tipo tráfico son estaciones de monitoreo que se instalan en áreas con alta actividad vehicular, pero a diferencia de las estaciones convencionales, su propósito principal no es obtener una medición exacta y precisa de la calidad del aire en términos absolutos, sino proporcionar información indicativa sobre las tendencias de la contaminación en esas zonas específicas. Es decir, permiten evaluar la influencia del tráfico sobre la calidad del aire a través de mediciones periódicas y estimaciones de los niveles de contaminantes en el aire.

Estas estaciones no tienen la misma precisión y especificidad que las estaciones convencionales (que proporcionan datos para comparaciones y normativas), pero son útiles para detectar los niveles de contaminación en áreas de alta afluencia vehicular.

Aunque no se espera que los datos sean tan precisos como los de una estación convencional, las estaciones indicativas brindan una buena estimación de los niveles de contaminantes y las variaciones a lo largo del tiempo. Los datos obtenidos se usan principalmente para identificar tendencias y posibles problemas de calidad del aire en áreas urbanas (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010)

Su principal objetivo es recolectar datos precisos y consistentes sobre los contaminantes que afectan la calidad del aire en las vías de las dos localidades. Para ello, se tuvieron en cuenta diversas medidas y especificaciones que, en general, son recomendadas para este tipo de estaciones, adaptándolas a las condiciones particulares de los puntos seleccionados a lo largo de las vías. Esto incluyó una evaluación detallada del aforo vehicular en cada área, así como un análisis de los tipos de contaminantes que podrían estar presentes debido al tránsito y las características propias de cada vía. La información obtenida permitió ajustar las estaciones de manera que cumplieran con los requisitos técnicos y operativos, garantizando que fueran eficaces en la medición de la contaminación atmosférica. Como resultado de este proceso de evaluación y ajuste, se concluyó que es posible instalar un

total de 42 estaciones de tráfico tipo indicativas en los puntos estratégicos identificados dentro de las localidades.

4.3.1.2 Convencionales

Las estaciones convencionales de calidad del aire tipo tráfico son instalaciones de monitoreo ambiental ubicadas en áreas con alto flujo vehicular. Estas estaciones tienen como objetivo medir los niveles de contaminantes específicos generados principalmente por el tráfico vehicular en zonas urbanas.

Estas estaciones están equipadas con una serie de sensores y dispositivos de muestreo que permiten medir de manera continua la concentración de estos contaminantes en el aire. Las estaciones están diseñadas para soportar condiciones climáticas variables y operan de forma automática, registrando los datos que luego se utilizan para análisis a largo plazo, además estás estaciones están ubicadas en estructuras metálicas con protección para los equipos internos, asegurando su funcionamiento sin interferencias externas. Además, para asegurar la transferencia de datos, las estaciones convencionales suelen estar equipadas con sistemas de comunicación que permiten transmitir la información en tiempo real o de manera periódica a centros de control o bases de datos. (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010)

Con base en los criterios evaluados, tanto en campo como a nivel cartográfico e informativo de fuentes terciarias, se logró determinar que las estaciones convencionales que pueden instalarse en el área de estudio son un total de 12 estaciones. Estos puntos específicos cumplen con los requisitos necesarios, tanto en términos de espacio como en condiciones físicas adecuadas para su correcta instalación y funcionamiento. Además, se consideró cuidadosamente el tipo de vía y la cantidad de vehículos que transitan por ella, ya que, para la instalación de este tipo de estaciones, es esencial que las vías presenten un alto flujo vehicular y una considerable extensión en carriles. Este factor es clave, ya que un mayor volumen de vehículos en circulación conlleva a un incremento en los niveles de contaminación atmosférica, lo que hace que la ubicación de las estaciones en estos puntos sea aún más relevante para un adecuado y minucioso monitoreo de la calidad del aire.

4.3.2 Parámetros a medir

4.3.2.1 Contaminantes

Las estaciones de monitoreo de calidad del aire tipo tráfico, tanto convencionales como indicativas, están orientadas a la medición de contaminantes asociados principalmente a fuentes móviles. En el caso de las estaciones convencionales, diseñadas con una instalación fija, su objetivo es realizar mediciones continuas, precisas y representativas de la contaminación atmosférica en vías con alto flujo vehicular. Estas estaciones utilizan analizadores de referencia que garantizan un alto grado de exactitud y confiabilidad, permitiendo así la generación de datos robustos para el análisis de la calidad del aire. Los contaminantes criterio que se incluirán en el monitoreo son: Material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) y carbono negro (Black Carbon), este último como un indicador clave de las emisiones derivadas de la combustión de diésel. Por su parte, las estaciones indicativas, que emplean tecnologías de menor costo y mayor portabilidad como sensores electroquímicos, realizarán el monitoreo de contaminantes relevantes CO, SO_2, NO_2, PM_{10} y $PM_{2.5}$, lo que permite obtener una caracterización adecuada de la calidad del aire en zonas de alta exposición vehicular.

Los contaminantes a medir son generados principalmente por procesos de combustión vehicular tanto en motores a gasolina como diésel, frenado, desgaste de llantas, resuspensión de polvo y emisiones de evaporación.

4.3.2.2 Meteorología

En el diseño y operación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire tipo tráfico, tanto convencionales como indicativas, la caracterización de las condiciones meteorológicas locales es un componente fundamental para garantizar la representatividad y la correcta interpretación de los datos obtenidos. De acuerdo con lo establecido en la normativa EPA 40 CFR Part 58 (U.S. Department of the Interior, 2024), las estaciones convencionales contarán con instrumentos meteorológicos de referencia que permiten medir la velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y presión

barométrica. Estas variables son esenciales para entender el comportamiento y la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

En el caso de las estaciones indicativas, si bien la normativa permite mayor flexibilidad en cuanto al tipo de instrumentos y nivel de precisión, se medirán variables meteorológicas básicas, particularmente la dirección y velocidad del viento, debido a su influencia directa en la acumulación o dispersión de contaminantes en los corredores viales.

4.3.3 Tipo de tecnología

4.3.3.1 Indicativas

Los equipos que podrían ser instalados como parte de la estación de monitoreo indicativa tipo tráfico, el equipo debe ser seleccionado con base en sus capacidades técnicas, compatibilidad con sensores de bajo costo y su aplicabilidad en entornos urbanos de alta densidad vehicular. La elección de estos equipos deberá responder a criterios como el tipo de contaminantes que pueden medir (gases y material particulado), la precisión y exactitud de sus mediciones, la facilidad de instalación y operación, el mantenimiento requerido, el costo de inversión y operación, así como la capacidad de transmisión y almacenamiento de datos en tiempo real. Estos equipos están orientados a fortalecer el sistema de vigilancia de calidad del aire, permitiendo una caracterización más detallada y representativa de las emisiones asociadas al tráfico vehicular.

Tabla 10. Equipos a emplear en las estaciones indicativas de la SVCA.

PARÁMETROS A MEDIR		EQUIPO				
CO, SO2, NO2, PM10 y PM2.5						
Nombre		Cairnet®	Kunak AIR Pro	Laminar AQM21	SENSIT® RAMP	Libelium PRO
Empresa		Envea	Kunak	Aeron	SENSIT Technologies	Libelium
Método de medición		Sensores electroquímicos	Gases - sensores electroquímicos Partículas - sensor óptico de partículas	Sensores de contaminantes multigas	Gases – Electroquímico Partículas – Dispersión Laser	Sensores electroquímicos
Rango	O3	0 - 250 ppb	0 - 2000 ppb	0 - 20 ppm	1 - 1000 ppm	0 - 18 ppm
	NO2	1 - 250 ppb	0 - 5000 ppb	0 - 20 ppm	1 - 1000 ppm	0 - 20 ppm
	SO2	0 - 1000 ppb	0 - 10000 ppb	0 - 100 ppm	1 - 1000 ppm	1 - 20 ppm
	CO	0 - 20000	0 - 12000 ppb	0 - 1000 ppm	400 - 10000 ppm	0 - 25 ppm
	PM 2.5	1 - 1000 µg/m3	0 - 2000 µg/m3	0 - 2000 µg/m3	1 - 1000 µg/m3	-
	PM10	0 - 1000 µg/m3	0 - 10000 µg/m3	0 - 2000 µg/m3	-	-

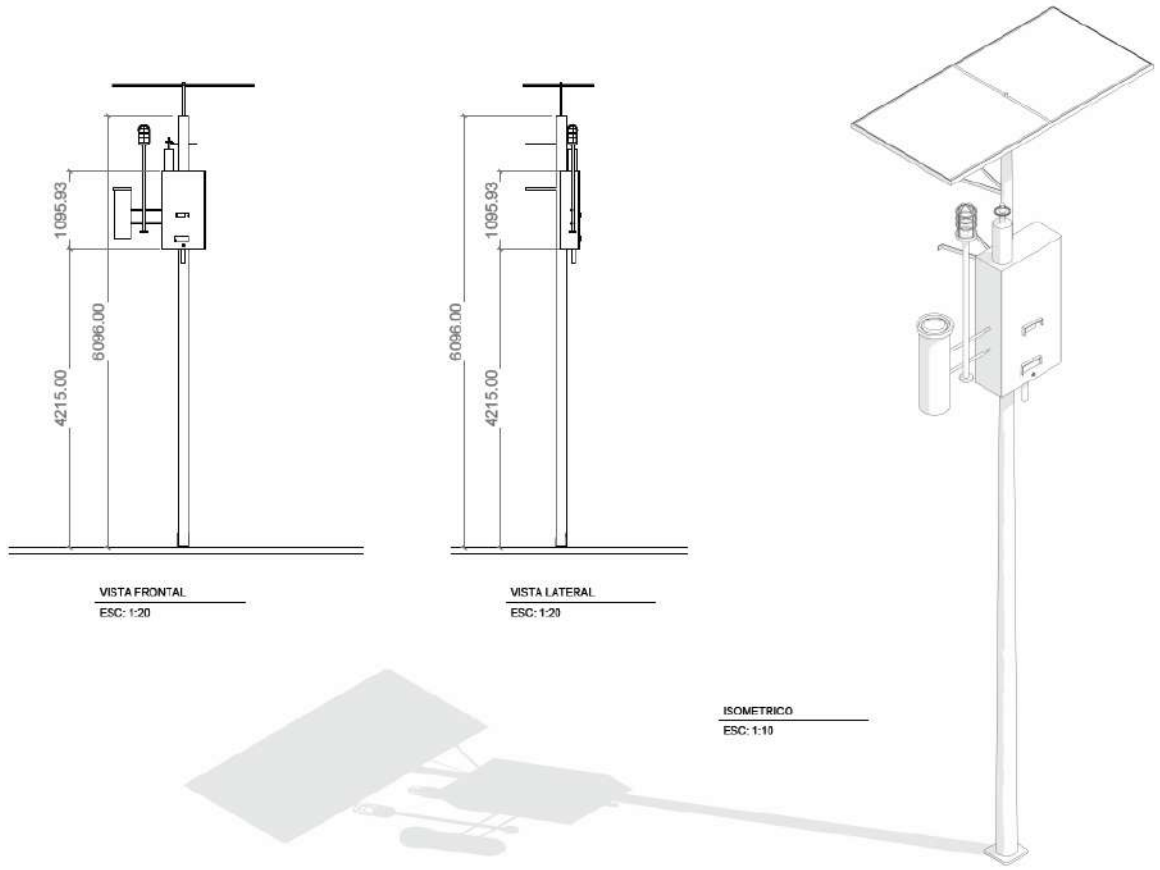
Fuente. Autores. 2025 de acuerdo con fichas técnicas correspondientes.

El método de medición utilizado por los equipos de las estaciones indicativas es el método de sensores electroquímicos es una técnica de medición utilizada principalmente en estaciones de monitoreo indicativas o de bajo costo para la detección de gases contaminantes. Este método se basa en una reacción química redox que ocurre dentro de una celda electroquímica: el gas objetivo difunde a través de una membrana hacia un electrodo de trabajo, donde se oxida o reduce, generando una corriente eléctrica proporcional a la concentración del gas. El sistema normalmente incluye un electrodo de referencia y uno auxiliar para mantener la estabilidad y sensibilidad del sensor. Los sensores electroquímicos son compactos, de bajo consumo energético y permiten una operación continua. (Mead et al., 2013)

4.3.3.2 Plano estación indicativa

Los planos diseñados para la estación de monitoreo tipo tráfico indicativa se observan en la figura 10 y se presentan en el Anexo 13 del presente documento. En ellos se especifican las alturas de instalación recomendadas para cada uno de los componentes de monitoreo, conforme a los lineamientos técnicos establecidos por la normativa nacional y por la EPA en el 40 CFR Part 58. Estas alturas son fundamentales para asegurar la representatividad de las mediciones, evitando interferencias por obstrucciones físicas cercanas y garantizando una adecuada exposición de los sensores a las condiciones atmosféricas reales del entorno vial. Adicionalmente, tiene incluido el soporte para el equipo de monitoreo y los sensores meteorológicos.

Figura 9. Planos de diseño para estaciones de monitoreo tipo tráfico indicativas.



Fuente. Autores 2025

4.3.3.3 Convencionales

A continuación, se presentan los equipos que podrían ser considerados para su instalación en una estación de monitoreo convencional tipo tráfico. La selección debe basarse en criterios técnicos rigurosos que garanticen la representatividad, continuidad y confiabilidad de los datos en zonas urbanas de alta densidad vehicular. Estos equipos deben estar certificados con métodos de referencia, y ser capaces de operar de forma continua bajo condiciones ambientales variables.

La elección de estos instrumentos deberá considerar su capacidad para medir contaminantes criterio, tanto gases como material particulado, su precisión, rango y límite de detección, así como aspectos operativos como la facilidad de instalación, los requerimientos de calibración y mantenimiento, el costo total de propiedad y la interoperabilidad con plataformas de gestión de datos en tiempo real.

- PM10 y PM2.5

Tabla 11. Equipos de medición para PM10 y PM2.5

PARÁMETROS A MEDIR	EQUIPO				
PM10 y PM2.5					
Nombre	E-BAM PLUS	MP101M	BAM 1020	MODELEDM 180+	1405-F TEOM
Empresa	MetOne Instruments	ENVEA	MetOne Instruments	GRIMM	Thermo Fisher Scentific
Método de medición	Atenuación por radiación	Atenuación por radiación	Atenuación por radiación	Atenuación por radiación	Atenuación por radiación
Rango	-15 µg/m3 - 10000 µg/m3	0 - 10000 µg/m3	0 - 10000 µg/m3	0,1 - 1500 µg/m3	0 - 1000000 µg/m3
Precisión	1 µg/m3	±2 µg/m3	±2 µg/m3	±2 µg/m3	±2 µg/m3 (1h) ±1 µg/m3 (24h)
Sensibilidad	< 3 µg/m3 (1h) < 6 µg/m3 (24h)	< 0,5 µg/m3 (24h) <4,8 µg/m3 (1h)	< 4,8 µg/m3 (1h) < 1 µg/m3 (24h)	0,1 µg/m3	< 0,5 µg/m3
PARÁMETROS A MEDIR	EQUIPO				
PM10 y PM2.5					
Nombre	Model602BetaPLUS	Model T640	BAM 1022	5014i Beta	5030i
Empresa	Teledyne	Teledyne	MetOne Instruments	Thermo Fisher Scentific	Thermo Fisher Scentific
Método de medición	Atenuación por radiación	Atenuación por radiación	Atenuación por radiación	Atenuación por radiación	Atenuación por radiación
Rango	1 - 15000 µg/m3	0,1 - 10000 µg/m3	-15 µg/m3 - 10000 µg/m3	0 - 10000 µg/m3	1 - 10000 µg/m3
Precisión	±1 µg/m3 (24 h)	±0,5 µg/m3 (1h)	±2 µg/m3	±2 µg/m3 < 80 µg/m3 (24h)	±2 µg/m3 < 80 µg/m3 (24h)
Sensibilidad	3 µg/m3 (1h) 0,3 µg/m3 (24h)	< 0,1 µg/m3 (1h)	< 4,8 µg/m3 (1h) < 1 µg/m3 (24h)	4 µg/m3 (1h) 1 µg/m3 (24h)	5 µg/m3 (1h) 1 µg/m3 (24h)

Fuente. Autores. 2025 de acuerdo con fichas técnicas correspondientes.

Los equipos utilizados para la medición de PM10 y PM2,5 emplean el método de atenuación por radiación beta. Este método consiste en recolectar el material particulado sobre una cinta transportadora que se desplaza periódicamente. Una fuente de radiación beta de bajo nivel emite un haz a través de la cinta. A medida que se acumulan las partículas, el haz es atenuado, es decir, su intensidad disminuye. Esta disminución es proporcional a la masa depositada, lo que permite calcular la concentración de material particulado en el aire a partir del incremento de masa en función del tiempo. (CORPONOR et al., 2022).

- SO_2

Tabla 12. Equipos de medición para SO_2

PARÁMETROS A MEDIR	EQUIPO				
SO_2					
Nombre	SERINUS 50 SO2 ANALYSER	AF22e	APSA - 370	Model T - 100	SERES Model SF 2000 G
Empresa	ACOEM ECOTECH	ENVEA	HORIBA	Teledyne	-
Método de medición	Fluorescencia	Fluorescencia	Fluorescencia	Fluorescencia	Fluorescencia
Rango	0 - 20 ppm	0 - 10 ppm	0-0,05/0,1/0,2/0,5 ppm	0 - 20 ppm	0.1 - 0.5 - 1 - 5 and 10 ppm
Precisión	0,5 ppb	±1 %	±1 %	0,50%	±1 %
Sensibilidad	< 0,3 ppb	< 0,4 ppb	0,02 ppm	< 0,4 ppb	< 1ppb

Fuente. Autores. 2025 de acuerdo con fichas técnicas correspondientes.

El método utilizado para la medición de dióxido de azufre (SO_2) es la fluorescencia ultravioleta, un fenómeno óptico que ocurre en cuerpos fríos. En este proceso, las moléculas de SO absorben fotones de alta energía (luz ultravioleta), lo que provoca la excitación de uno de sus electrones. Al regresar a su estado basal, el electrón libera parte de esa energía en forma de fotones de menor energía (mayor longitud de onda) y el resto se disipa como energía vibracional (calor). La intensidad de la fluorescencia emitida es proporcional a la concentración de SO en la muestra, lo que permite su cuantificación. (Aeronáutica civil, 2018)

- CO

Tabla 13. Equipos de medición para CO

PARÁMETROS A MEDIR	EQUIPO				
CO					
Nombre	CO12e	Serinus 30 ®	MEZUS-310	APMA-370	FPI-Model AQMS-400
Empresa	ENVEA	ACOEM ECOTECH	KENTEX	HORIBA	FPI
Método de medición	Fotometría infrarroja	Fotometría infrarroja	Fotometría infrarroja	Fotometría infrarroja	Fotometría infrarroja
Rango	0 - 50 ppm / 0 - 300 ppm	0 - 200 ppm	0 - 50 ppm / 0 -100 ppm	0 - 50 ppm	0 - 50 ppm / 0 - 1000 ppm
Precisión	±1 %	0,1 ppm	< 0,05 ppm	±1 %	< 1%
Sensibilidad	0,05 ppm	< 0,04 ppm	0,1 ppm	0,02 ppm	< 0,04 ppm

Fuente. Autores. 2025 de acuerdo con fichas técnicas correspondientes.

El método de medición utilizado por los equipos para determinar la concentración de monóxido de carbono (CO) es la fotometría infrarroja no dispersiva. Este método se basa en la capacidad de las moléculas de CO para absorber radiación infrarroja a longitudes de onda específicas. A diferencia de la radiación ultravioleta, los rayos infrarrojos no provocan transiciones electrónicas, pero sí inducen vibraciones y rotaciones moleculares,

especialmente en moléculas con momento dipolar variable. Cuando el haz de radiación infrarroja atraviesa la muestra de aire, las moléculas de CO absorben parte de esta energía. La cantidad de radiación absorbida está directamente relacionada con la concentración del gas. El resto de la radiación no absorbida es captada por un detector óptico, que traduce esa señal en una lectura cuantitativa. Esta técnica permite la detección de CO en concentraciones muy bajas (niveles de ppb), con alta precisión y estabilidad. Además, el análisis del espectro de absorción infrarroja proporciona información estructural sobre la molécula, lo que refuerza su confiabilidad como método de referencia para el monitoreo ambiental. (Aeronáutica civil, 2018)

- NO_2

Tabla 14. Equipos de medición para NO_2

PARÁMETROS A MEDIR	EQUIPO			
NO_2				
Nombre	AC32e	Model 405 nm NO 2 / NO / NOx Monitor	APNA - 370	Serinus 40 ®
Empresa	ENVEA	2B Technologies	HORIBA	ACOEM ECOTECH
Método de medición	Quimioluminiscencia	Quimioluminiscencia	Quimioluminiscencia	Quimioluminiscencia
Rango	0 - 10 ppm	0 - 10 ppm (NO2) 0 - 2 ppm NO	0 - 10 ppm	0 - 20 ppm
Precisión	1%	< 0,5 ppb	±1 %	±1 %
Sensibilidad	< 0,02 ppb	< 1ppb	~ 0,5 ppb	< 0.4 ppb

Fuente. Autores. 2025 de acuerdo con fichas técnicas correspondientes.

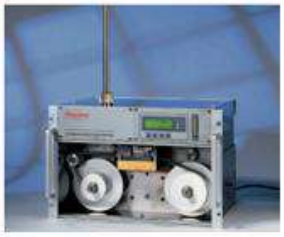
Los equipos utilizados para la medición de óxidos de nitrógeno (NO y NO2) emplean el método de quimioluminiscencia, el cual permite detectar concentraciones a niveles de ppb con alta sensibilidad y precisión. Este método se basa en una reacción química en la que el NO reacciona con ozono (O_3), generando productos en estados excitados que liberan radiación electromagnética (luz) al regresar a su estado basal.

La energía emitida en forma de fotones es captada por un detector óptico, y la intensidad de la luz es directamente proporcional a la concentración de NO presente en la muestra. Este principio fisicoquímico es similar al de la absorción o dispersión de luz, pero en este caso, la fuente de excitación es química, no luminosa. Para la medición de NO2, este gas se convierte térmica o químicamente en NO, y luego se mide con el mismo principio.

Gracias a su alta sensibilidad y rapidez de respuesta, la quimioluminiscencia es el método de referencia establecido por agencias como la EPA para la medición continua de NO_x en ambientes urbanos e industriales. (Aeronáutica civil, 2018)

- BLACK CARBON

Tabla 15. Equipos de medición para Black Carbon

PARÁMETROS A MEDIR	EQUIPO		
Black Carbon			
Nombre	Thermo Scientific 5012 MAAP	MODEL AE33	eXtinctiometer PAX
Empresa	AyT Grupo	MAGEE SCIENTIFIC	DROPLET
Método de medición	Aetalometría	Aetalometría	Aetalometría
Rango	Promedio 2 minutos: < 100 ng/m3 Promedio 10 minutos: < 50 ng/m3 Promedio 30 minutos: < 20 ng/m3	<0,01 a >100 µg/m3	< 1 a 10 000 Mm^{-1}
Precisión	±10 %	0,03 µg/m3	< 10–19 s
Sensibilidad	< 20 - 100 ng/m3	<0,005 µg/m3 (1h)	~1×10^{-6} m^{-1}

Fuente. Autores. 2025 de acuerdo con fichas técnicas correspondientes.

El método de medición utilizado por los equipos para la detección de Black Carbon (BC) es la aetalometría. Este método se basa en la absorción de luz por parte de partículas de carbono recolectadas sobre un filtro. El equipo que emplea este principio, denominado aetalómetro, realiza mediciones en tiempo real y es capaz de determinar la concentración de BC utilizando múltiples longitudes de onda, generalmente siete: 370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm y 950 nm.

El funcionamiento del aetalómetro se basa en registrar la atenuación de la luz que atraviesa el filtro a medida que este se carga con material particulado. En particular, la longitud de onda de 880 nm es empleada como referencia para calcular la concentración de BC, bajo el supuesto de que este es el principal absorbente en esa banda espectral. A partir de la disminución progresiva de la intensidad de luz transmitida, el equipo estima la masa de carbono negro depositada en el filtro, y por ende, su concentración en el aire.

Este método permite una medición continua, precisa y diferenciada del BC y otros componentes absorbentes, lo que lo hace especialmente útil para estudios de contaminación atmosférica urbana y caracterización de fuentes emisoras. (Toquinto Manjarrez et al., 2020)

- CALIBRADORES

Tabla 16. Calibradores estación de monitoreo convencional

	EQUIPO				
CALIBRADORES					
Nombre	MGC101	ZAG7001	Modelo T700	Modelo T701	tetra Cal
Empresa	ENVEA	ENVEA	Teledyne	Teledyne	MesaLabs
Flujo	Dilución y generación de gas 0 - 10 SLPM Gas de cilindo 0 - 100 cc/min	1-20 NL / min a 2,07 bares (30 psig)	Dilución de aire 0 – 10 SLPM Gas de cilindro 0 – 100 cc/min	~ 30 psig	0,1 - 30 LPM
Precisión de flujo	±1 % de la escala completa	± 1 % de la escala completa	± 1 % de la escala completa	± 1 psig de la escala completa	± 1 % de la escala completa

Fuente. Autores. 2025 de acuerdo con fichas técnicas correspondientes.

La instalación de equipos automáticos para la medición de contaminantes atmosféricos, junto con sus sistemas de calibración, requiere de un shelter o cabina especializada, como se observa en la figura 10. Este espacio debe estar diseñado para ofrecer condiciones óptimas de operación, lo que implica contar con una superficie adecuada, control de temperatura interna, estabilidad en el suministro eléctrico y mecanismos de seguridad que protejan tanto los equipos como la integridad de los datos.

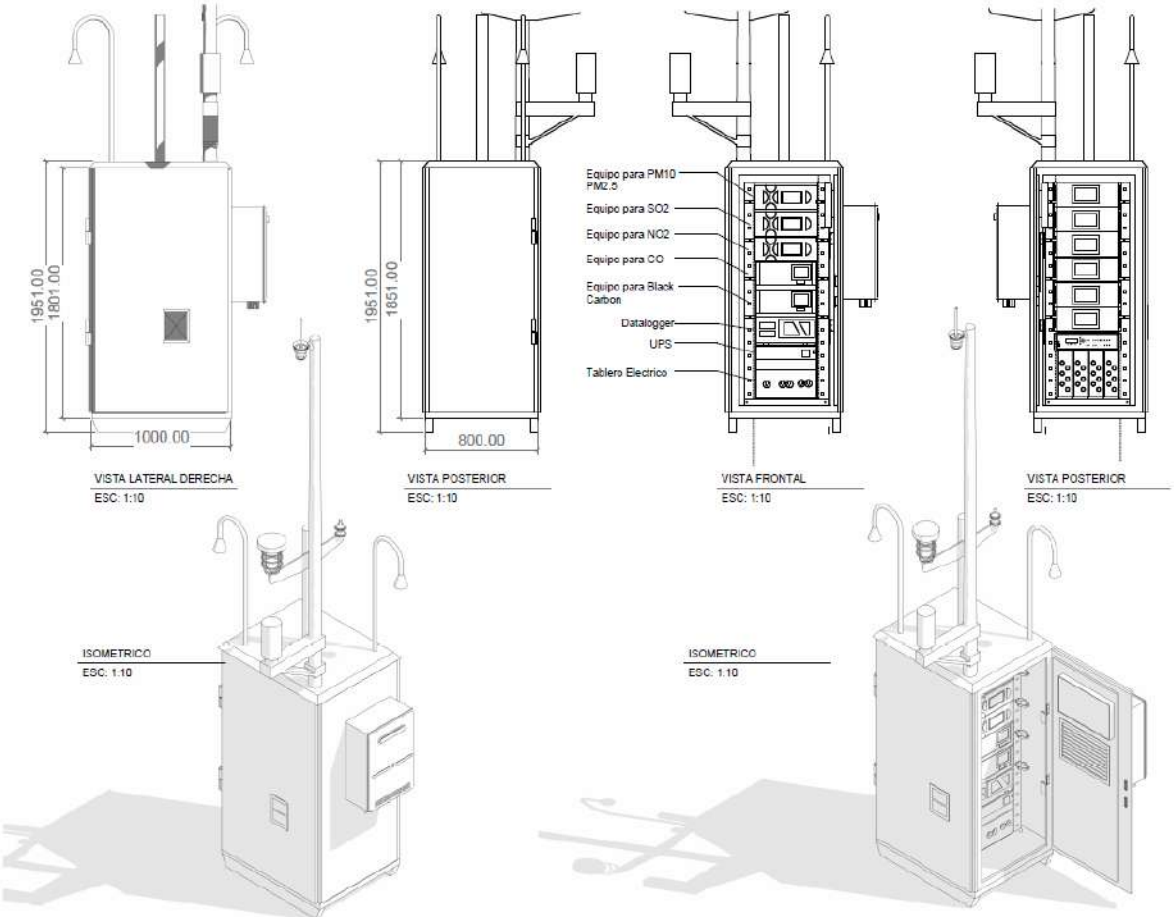
Figura 10. Shelter estación de monitoreo convencional

Fuente. https://mecadelinte.com/para-que-sirven-las-cabinas-tipo-shelter/

4.3.3.4 Plano estación convencional

Los planos diseñados para la estación de monitoreo tipo tráfico convencional se presentan en el plano correspondiente, incluido en el Anexo 14 de este documento. En estos se detallan las dimensiones de la cabina, la distribución interna de los equipos de medición y la ubicación propuesta para la estación meteorológica asociada. Esta información permite establecer los lineamientos básicos para la instalación física de los analizadores de referencia y demás componentes técnicos, garantizando una disposición ordenada y funcional conforme a los criterios operativos y de seguridad recomendados. La representación gráfica incluida en el plano sirve como guía para el montaje adecuado de la estación, asegurando condiciones óptimas de ventilación y cumplimiento con los estándares establecidos en la normativa nacional e internacional vigente, incluyendo lo estipulado por la EPA en el 40 CFR Part 58.

Figura 11. Planos de diseño para estaciones de monitoreo tipo tráfico indicativas.



Fuente. Autoras 2025

4.3.4 COSTOS DE INVERSIÓN E IMPLEMENTACIÓN

Dentro de los costos iniciales considerados, se contemplan diversos insumos técnicos indispensables para la operación y puesta en marcha de las estaciones. Estos incluyen cintas de filtro, necesarias para la recolección de material particulado en equipos automáticos; PMT (PhotoMultiplier Tubes), esenciales para la detección óptica precisa; así como desengrasantes y limpiadores que aseguran el mantenimiento adecuado de los instrumentos. Se incluye también el consumo de energía eléctrica como un requerimiento operativo básico, filtros y accesorios para preservar la calidad del aire de entrada, herramienta menor para actividades de ajuste y calibración, bombas de bajo flujo utilizadas en la toma controlada de muestras, y gases Span requeridos en los procesos de calibración de los sensores. Además, se consideran rodamientos y empaques que garantizan el funcionamiento mecánico de los sistemas, y repuestos de sensores que permiten sustituir componentes críticos en caso de fallas o desviaciones. Estos elementos representan la base técnica y operativa necesaria para la implementación efectiva del estudio, permitiendo garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos y el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto.

De acuerdo con el análisis de los costos de inversión asociados a las estaciones de monitoreo convencionales e indicativas, en la Tabla 17 se presenta de forma discriminada el CAPEX correspondiente a cada tipo de estación, así como el CAPEX total del sistema propuesto. Por su parte, la Tabla 18 expone los costos de operación, detallando el OPEX anual por tipo de estación y el OPEX total del sistema de vigilancia planteado.

Tabla 17. Costos de inversión de estaciones de monitoreo tipo convencional e indicativo

Tipo de estación	Cantidad	Valor Unitario	Valor total
Equipo convencional	12	$ 809.200.000,00	$ 9.710.400.000,00
Cabina / Shelter - Datalogger	12	$ 89.250.000,00	$ 1.071.000.000,00
Cuadalímetros, Equipo Aire Cero/Span y gases patrones	3	$ 17.850.000,00	$ 53.550.000,00
Estación meteorológica	12	$ 53.550.000,00	$ 642.600.000,00
CAPEX ESTACIONES CONVENCIONALES		**$ 969.850.000,00**	**$ 11.477.550.000,00**
Equipo indicativo	42	$ 71.400.000,00	$ 2.998.800.000,00
Soporte equipo indicativo	42	$ 9.520.000,00	$ 399.840.000,00
Sensores meteorológicos	42	$ 8.330.000,00	$ 349.860.000,00
CAPEX ESTACIONES INDICATIVAS		**$ 89.250.000,00**	**$ 3.748.500.000,00**
CAPEX TOTAL			**$ 15.226.050.000,00**

Fuente. Laboratorio de referencia

Adicionalmente, se identifican y contemplan los costos operacionales y de mantenimiento necesarios para la correcta ejecución y sostenibilidad del proyecto. Dentro de estos se incluyen los recursos destinados al personal directivo, técnico y operativo, cuyo conocimiento especializado es esencial para la gestión, instalación, supervisión y análisis de los datos obtenidos en campo. Asimismo, se consideran los gastos asociados al arriendo de los sitios de instalación del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA), los cuales deben cumplir con condiciones estratégicas y técnicas definidas por los parámetros de localización. Se suman los servicios públicos indispensables para el funcionamiento continuo de los equipos, así como los servicios generales que respaldan el mantenimiento físico y logístico de las estaciones y sus instalaciones. Igualmente, se incluyen las adecuaciones necesarias en las sedes de operación del proyecto, garantizando condiciones óptimas de infraestructura, y la dotación de equipos de cómputo que permitan el procesamiento, almacenamiento y análisis de la información recolectada. Estos costos representan componentes fundamentales para asegurar la operatividad técnica, administrativa y logística del proyecto, permitiendo cumplir con los objetivos académicos y científicos propuestos.

Tabla 18. Costos de operación de estaciones de monitoreo tipo convencional e indicativo

Equipo convencional				
	Valor unitario		Valor total	
Costos de operación anual (30%)	$	290.955.000,00	$	3.443.265.000,00
Costos de mantenimiento anual (5%)	$	48.492.500,00	$	573.877.500,00
Insumos anuales (7%)	$	67.889.500,00	$	803.428.500,00
OPEX TOTAL	**$**	**407.337.000,00**	**$**	**4.820.571.000,00**
Equipo indicativo				
Costos de operación anual (15%)	$	13.387.500,00	$	562.275.000,00
Costos de mantenimiento anual (3%)	$	2.677.500,00	$	112.455.000,00
Insumos anuales (4%)	$	3.570.000,00	$	149.940.000,00
OPEX TOTAL	**$**	**19.635.000,00**	**$**	**824.670.000,00**
OPEX ANUAL TOTAL			**$**	**5.645.241.000,00**

Fuente. Laboratorio de referencia

En los costos mencionados en la tabla 17 y la tabla 18 se encuentra incluido el IVA y el valor por estación incluye los equipos complementarios.

5. CONCLUSIONES

- El análisis cartográfico de la infraestructura vial en las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos permitió identificar una red compleja de vías, destacando las arterias y principales por su alto flujo vehicular, múltiples carriles y conexión con corredores urbanos estratégicos. Estas características las posicionan como fuentes lineales relevantes de emisiones contaminantes, especialmente material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO), derivados de la combustión vehicular. Por tanto, estas vías representan sectores clave para la ubicación de estaciones de monitoreo de calidad del aire, ya que permiten una medición representativa de la exposición a contaminantes del transporte, lo cual es esencial para diseñar estrategias efectivas de gestión ambiental y protección de la salud pública.

- En concordancia con los hallazgos obtenidos y el análisis técnico de las condiciones viales y ambientales, se definieron ubicaciones estratégicas para la instalación de estaciones del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire en las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos, con un total de 54 estaciones. La selección se basó en los criterios de macro y micro localización establecidos por la normativa ambiental colombiana y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, considerando aspectos como la representatividad espacial, la influencia de fuentes lineales de emisión y la accesibilidad operativa. De esta manera, la totalidad de las estaciones cumplen con criterios técnicos y normativos, y están ubicadas en sectores con alta susceptibilidad a la acumulación de contaminantes, permitiendo una evaluación más precisa de la calidad del aire en zonas urbanas con alto tránsito vehicular, y fortaleciendo la toma de decisiones para la gestión ambiental y la protección de la salud pública.

- A partir del análisis integrado del aforo vehicular, los datos de conteo de la Secretaría Distrital de Movilidad y la delimitación espacial por cuadrantes, se evaluó la conectividad funcional y la densidad del tránsito en Teusaquillo y Barrios Unidos. Esto permitió identificar las vías con mayor flujo y complejidad estructural, y definir distancias adecuadas entre estaciones de monitoreo, considerando también las vías de alimentación. Se estableció que corredores como la Autopista Norte, Calle 80, Carrera 68, Carrera 30, Av. Suba y Calle 26 presentan condiciones críticas de movilidad que favorecen la

acumulación y dispersión de contaminantes atmosféricos. Por tanto, estas vías son prioritarias para ubicar estaciones del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire, debido a su alta influencia en la contaminación urbana y en la evaluación del impacto de las emisiones vehiculares.

- Las estaciones de monitoreo de calidad del aire, tanto las convencionales como las indicativas, cuentan con instrumentación de alta precisión que permite realizar mediciones continuas y confiables de contaminantes criterio, gracias a su sensibilidad, resolución temporal y exactitud, de acuerdo al análisis técnico realizado para cada una de ellas. Estas capacidades permiten generar información robusta y representativa sobre las condiciones atmosféricas locales, esencial para el análisis de exposición y la formulación de estrategias de control ambiental.

- La adquisición, instalación y operación de las estaciones de monitoreo implica una inversión considerable, atribuida tanto al nivel tecnológico de los equipos como a los requerimientos de calibración periódica, mantenimiento bajo protocolos certificados y la necesidad de personal técnico especializado. Por ello, toda estrategia de implementación debe incluir una planificación financiera y operativa adecuada que garantice la sostenibilidad del sistema de vigilancia a mediano y largo plazo.

6. RECOMENDACIONES

- Dado el alto costo asociado a la implementación, operación y mantenimiento del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire, se recomienda adoptar una estrategia de ejecución por etapas, que permita una inversión progresiva y técnicamente justificada en las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos. Esta planificación escalonada debe basarse en criterios de priorización derivados del análisis de aforo vehicular, enfocándose en las vías arterias y principales con mayor tránsito de fuentes móviles emisoras. En este sentido, se sugiere que la fase inicial contempla la instalación de estaciones en corredores clave como la Carrera 30 (Av. Ciudad de Quito), Autopista Norte (Av. Paseo de los Libertadores), Calle 80 (Av. Medellín), Carrera 68 (Av. del Congreso Eucarístico), Av. Suba (Av. Alfredo D. Bateman) y Calle 26 (Av. Jorge Eliécer Gaitán). La selección de estos puntos responde tanto a su papel como fuentes significativas de emisión como a su potencial para generar datos representativos que orienten decisiones ambientales y políticas públicas de gestión de la calidad del aire.

- En la primera fase del proyecto realizar la instalación de los equipos indicativos, lo cual permite obtener información de la calidad del aire en los puntos priorizados con una inversión inicial moderada. Esta estrategia no solo facilita la evaluación del comportamiento del contaminante en zonas clave, sino que también optimiza los costos de inversión (CAPEX) en la etapa inicial. Posteriormente, realizar la instalación de equipos convencionales, cuya tecnología ofrece mayor precisión y continuidad en el monitoreo, pero requiere una inversión más alta. Esta implementación escalonada permite distribuir los costos en el tiempo y garantizar un uso más eficiente de los recursos destinados al sistema de vigilancia diseñado.

- Al evidenciar el aforo vehicular en las vías del estudio, se constata que existe una brecha temporal en los datos suministrados entre los años 2021 y 2025 por lo que se dificulta un análisis del todo adecuado, en este sentido, se recomienda que las entidades responsables del monitoreo implementen mecanismos de estandarización y actualización periódica de los datos en todos los nodos y no de manera sectorizada, con el fin de garantizar la integridad, representatividad y vigencia de la información utilizada en estudios ambientales y planificación territorial.

- Dentro de los equipos propuestos para la implementación de las estaciones indicativas, únicamente el modelo Cairnet de ENVEA y el Kunak Air Pro de Kunak permiten la medición de compuestos orgánicos volátiles (COV), una variable crítica en las estaciones de monitoreo tipo tráfico. Por lo tanto, es fundamental tener en cuenta este factor para la Fase II del estudio, correspondiente a la implementación y puesta en operación de las estaciones, con el fin de asegurar su inclusión dentro de las variables a medir.

7. ANEXOS

Anexo 1. Marco Conceptual

Anexo 2. "*Mapa 1. Representatividad de las localidades de trabajo*"

Anexo 3. "*Mapa 2. Mapa vías arterias y principales localidades Teusaquillo y Barrios Unidos*"

Anexo 4. "*Mapa 3. Usos del suelo en vías seleccionadas de las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos*",

Anexo 5. **"***Mapa 4. Posibles ubicaciones estaciones de monitoreo tipo tráfico convencionales e indicativas"*

Anexo 6. "*Mapa 5. Ubicación estaciones de monitoreo tipo tráfico convencionales e indicativas*"

Anexo 7. "*Mapa 6. Triangulaciones entre estaciones de monitoreo*"

Anexo 8. "*Mapa 7. de nodos de monitoreo aforo volumen vehicular*"

Anexo 9. Características vías de estudio

Anexo 10. Especificaciones técnicas estaciones de monitoreo

Anexo 11. Información general estaciones de monitoreo

Anexo 12. Vías de alimentación

Anexo 13. Plano 1. Sistema de vigilancia de la calidad del aire tipo indicativo.

Anexo 14. Plano 2. Sistema de vigilancia de la calidad del aire tipo convencional.

Anexo 15. Concepto evaluativo

8. REFERENCIAS

Aeronáutica civil. (2018). Metodología Mediciones Especial Aeronáutica Civil [Anexo D. Metodología]. In *TÉRMINOS DE REFERENCIA EN ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA EL AEROPUERTO INTERNACIONAL ELDORADO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.* https://www.aerocivil.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=13097

Avendaño, G. (2024, Febrero 14). *¿Cuáles son los tipos de vías que hay en Colombia y cuáles es su prioridad?* Revista Motor. Retrieved Junio 24, 2025, from https://www.motor.com.co/seccion/industria/cuales-son-los-tipos-de-vias-que-hay-en-colombia-y-cuales-es-su-prioridad_17604

CORPONOR, Alcaldía de San José de Cúcuta, Gobernación del Norte de Santander, & Minambiente. (2022, 03 16). *TÉCNICAS Y PRINCIPIOS DE EQUIPOS DE MEDICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM)* [Nota técnica]. Corponor. /https://corponor.gov.co/web/wp-content/uploads/2022/04/2021-03-23-NOTA-Tecnica-14-VF-1.pdf

Mead, M.I., Popoola, O.A.M., Stewart, G.B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J.J., McLeod, M.W., Hodgson, T.F., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J.R., & Jones, R.L. (2013). The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment*, *70*, 186 - 203. //doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2010). *PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE*. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Diseno.pdf?utm

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2017). *GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf?utm

Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá – RMCAB. (2023, septiembre). *Informe Mensual de Calidad del Aire de Bogotá Septiembre 2023* (3). Informe mensual de la Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá – RMCAB. http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Informe%20mensual%20septiembre%202023.pdf?utm

Sandoval Moreno, P. C. (2022, 2 25). *Diseño y operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire en Colombia*. Diseño y operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire en Colombia. https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/1e54aaed-1037-4bcb-b986-b8d69f394b86/content?utm

Toquinto Manjarrez, F. Y., Vázquez Gálvez, F. A., Hernández García, Y. G., Bernadac Villegas, L. G., Solís, S. S., Soto Padilla, M. Y., Domínguez Acosta, M., Velázquez Angulo, G., Flores Tavizón, E., & Granados Olivas, A. (2020). *Patrones de concentración de carbono negro y principales fuentes de emisión en Ciudad Juárez, Chihuahua* (2nd ed.) [Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible]. https://revistascientificas.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/view/399

U.S. Department of the Interior. (2024). *U.S. Environmental Protection Agency*. U.S. Department of the Interior Stewarding Conservation and Powering Our Future. https://www-doi-gov.translate.goog/recovery/about-us/primary-agencies/EPA?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=rq#:~:text=The%20U.S.%20Environmental%20Protection%20Agency,human%20health%20and%20the%20environment

9. BIBLIOGRAFÍA

ACOEM. (s. f.). *Serinus 30: Analizador de monóxido de carbono (CO)*. https://www.acoem.com/es/products/analizadores-de-gases-de-calidad-del-aire/aire-ambiente/analizador-de-co/serinus-30/

ACOEM. (s. f.). *Serinus 50: Analizador de dióxido de azufre (SO_2)*. https://www.acoem.com/es/products/analizadores-de-gases-de-calidad-del-aire/aire-ambiente/serinus-50/

ENVEA. (s. f.). *AF22e: Monitor de SO_2*. https://www.es.envea.global/s/ambiental/monitores-de-gas/so2-a/af22e/

ENVEA. (s. f.). *CO12e: Monitor de CO*. https://envea.global/es/product/co12e/

ENVEA. (s. f.). *MGC101: Generador de gas multipropósito*. https://envea.global/es/product/mgc101/

ENVEA. (s. f.). *ZAG7001: Generador de gas cero y gas de dilución*. https://www.es.envea.global/gas-generators-a/zag7001

ENVEA. (s. f.). *MP101M: Monitor de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$*. https://www.es.envea.global/s/ambient/particulate-monitors/mp101m-pm10-pm2-5/

ENVEA. (s. f.). *Cairnet: Monitor de gases portátil*. https://www.es.envea.global/s/ambient/gas-monitors-a/cairnet/

HORIBA. (s. f.). *APSA-370: Analizador de SO_2*. https://www.horiba.com/esp/process-and-environmental/products/detail/action/show/Product/apsa-370-452/

HORIBA. (s. f.). *APMA-370: Analizador de CO*. https://www.horiba.com/int/process-and-environmental/products/detail/action/show/Product/apma-370-453/

Teledyne API. (s. f.). *T100: Analizador de dióxido de azufre (SO_2)*. https://www.teledyne-api.com/en-us/products/t100

Teledyne API. (s. f.). *T700: Generador de gas de dilución*. https://www.teledyne-api.com/en-us/products/t700

Teledyne API. (s. f.). *T701: Generador de gas cero*. https://www.teledyne-api.com/en-us/products/t701

Teledyne API. (s. f.). *T640: Monitor de partículas en tiempo real*. https://www.teledyne-api.com/en-us/products/t640

Teledyne API. (s. f.). *Model 602 BetaPlus: Sistema de medición de partículas*. https://www.yumpu.com/en/document/view/32300986/model-602-betaplus-particle-measurement-system-teledyne-api

Met One Instruments. (s. f.). *E-BAM Plus: Monitor portátil de partículas*. https://metone.com/products/e-bam-plus/

Met One Instruments. (s. f.). *BAM-1020: Analizador de partículas* PM_{10}. https://metone.com/products/bam-1020/

Met One Instruments. (s. f.). *BAM-1022: Analizador de partículas en tiempo real*. https://metone.com/products/bam-1022/

Thermo Fisher Scientific. (s. f.). *5014i: Monitor de partículas* PM_{10}. https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/5014I

Thermo Fisher Scientific. (s. f.). *5030i: Analizador de carbono orgánico e inorgánico*. https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/5030I

Thermo Fisher Scientific. (s. f.). *TEOM 1405F: Monitor de masa de partículas*. https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/TEOM1405F

Magee Scientific. (s. f.). *Aethalometer: Medición de carbono negro*. https://www.aerosolmageesci.com/products/aerosol-magee-scientific-aethalometer/

Environmental Expert. (s. f.). *AQMS-400: Carbon Monoxide (CO) Analyzer*. https://www.environmental-expert.com/products/fpi-model-aqms-400-carbon-monoxide-co-analyzer-616727

EMIN. (s. f.). *Kentek Mezus 310: Analizador de CO (50–100 ppm)*. https://emin.asia/kentekmezus-310-kentek-mezus-310-co-analyzer-50-100ppm-151767/pr.html

DURAG. (s. f.). *EDM 180: Hoja técnica (en español)* [PDF]. https://www.durag.com/mediafiles/stream/?id=d/a/e/1/dae19a32b10642315fd4ddd7dff341c21b67a7f6_Datasheet_EDM_180__es_final.pdf

HTEL Ltda. (s. f.). *Calibrador de flujo TetraCal*. https://hteltda.com/product/calibrador-de-flujo-tetracal/

Kunak. (s. f.). *Kunak AIR: Estación de monitoreo ambiental portátil*. https://kunakair.com/es/monitor-calidad-aire/

Aeron Systems. (s. f.). *LAMINAR AQM21: Sistema IoT para monitoreo de calidad del aire*. https://aeronsystems.com/solutions/iot-solutions/air-quality-monitoring-system/laminar-aqm21/

SENSIT Technologies. (s. f.). *RAMP Air Quality Monitor*. https://gasleaksensors.com/es/products/sensit-ramp-air-quality-monitor/

Libelium. (s. f.). *Calibrated Air Quality Smart Cities*. https://www.libelium.com/es/libeliumworld/calibrated-air-quality-gas-dust-particle-matter-pm10-smart-cities