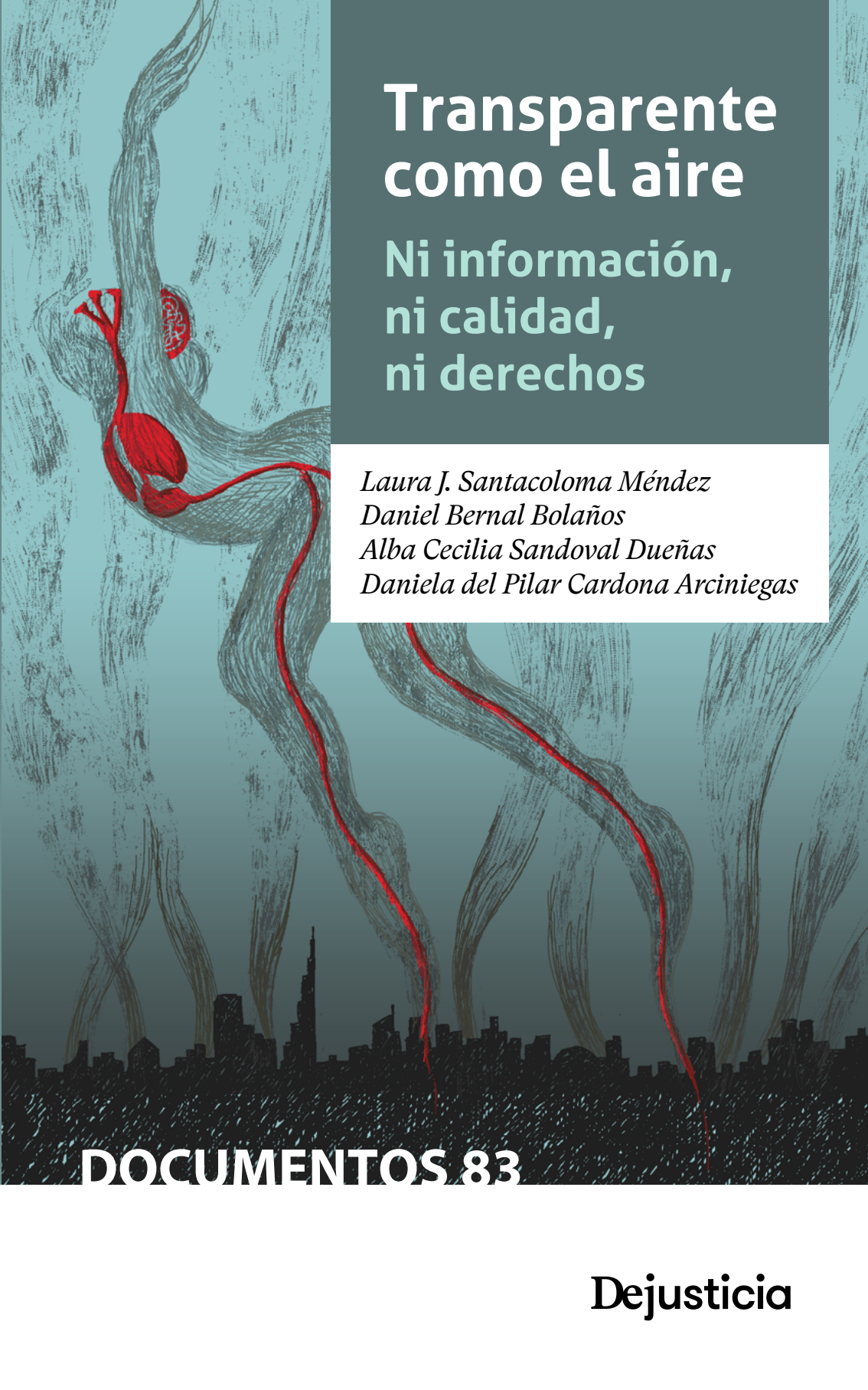




Transparente como el aire

Ni información,
ni calidad,
ni derechos

*Laura J. Santacoloma Méndez
Daniel Bernal Bolaños
Alba Cecilia Sandoval Dueñas
Daniela del Pilar Cardona Arciniegas*

DOCUMENTOS 83

Dejusticia

LAURA J. SANTACOLOMA MÉNDEZ

Abogada de la Universidad Nacional de Colombia. Mg. Derecho Ambiental y PhD en Derecho. Coordinadora de la línea de Justicia Ambiental en Dejusticia. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5349-3772>

DANIEL BERNAL BOLAÑOS

Ingeniero electrónico. Activista ciudadano por la calidad del aire, humedales y ciencia ciudadana. Pertenece a grupos ciudadanos como Aire ciudadano, Red Nacional de la Calidad del Aire, Mecab y Coalición Latinoamericana por el Aire Limpio - Alaire.

ALBA CECILIA SANDOVAL DUEÑAS

Ingeniera ambiental. Activista y educadora experiencial. Pertenece a grupos ciudadanos como Aire ciudadano y la Coalición Latinoamericana por el Aire Limpio, entre otras.

DANIELA DEL PILAR CARDONA ARCINIEGAS

Estudiante de Derecho y Geografía de la Universidad Nacional de Colombia. Pasante de la línea de Justicia Ambiental en Dejusticia.

Transparente como el aire.

**Ni información,
ni calidad, ni derechos**

Laura J. Santacoloma Méndez

Daniel Bernal Bolaños

Alba Cecilia Sandoval Dueñas

Daniela del Pilar Cardona Arciniegas

Laura J. Santacoloma Méndez.

Transparente como el aire. Ni información, ni calidad, ni derechos. / Laura J. Santacoloma Méndez, Daniel Bernal Bolaños, Alba Cecilia Sandoval Dueñas, Daniela del Pilar Cardona Arciniegas. – Bogotá: Editorial Dejusticia, 2022.

148 páginas; mapas; tablas; fotos; gráficas; 24 cm. – (Documentos, 83)

978-628-7517-56-1

1. Calidad del aire 2. Polución 3. Monitoreo 4. Derechos 5. Sensores de bajo costo
6. Ciencia ciudadana 7. Información pública. I. Tít. II. Serie.

Documentos Dejusticia 83

TRANSPARENTE COMO EL AIRE. Ni información, ni calidad, ni derechos

ISBN: 978-628-7517-57-8 Versión digital

978-628-7517-56-1 Versión impresa

© 2022 Dejusticia

Centro de Estudios de Derecho, Justicia y Sociedad, Dejusticia

Calle 35 N° 24-31, Bogotá, D.C.

Teléfono: (57 1) 608 3605

Correo electrónico: info@dejusticia.org

<https://www.dejusticia.org>



Este texto puede ser descargado gratuitamente en <https://www.dejusticia.org>

Licencia Creative Commons 4.0 Internacional

Atribución - No Comercial - Compartir Igual.

Revisión de textos: Andrés Felipe Hernández C.

Portada: Alejandro Ospina

Impresión: Ediciones Antropos Ltda.

Bogotá D.C., Diciembre de 2022

Contenido

AGRADECIMIENTOS	7
INTRODUCCIÓN.....	9
¿Cómo se abordarán estos temas?	17
1. LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE:	
UN PROBLEMA DE DERECHOS.....	21
2. CALIDAD DEL AIRE EN BOGOTÁ: DESARROLLO	
TERRITORIAL, NORMAS E INSTITUCIONES	37
Causas de la polución en Bogotá D.C.	37
Normas y políticas públicas que determinan	
la calidad del aire en Bogotá D.C.	42
Instituciones que controlan y vigilan	47
Sistemas oficiales de monitoreo y vigilancia	
de la calidad del aire en Bogotá D.C.....	53
3. MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE:	
SENSORES DE BAJO COSTO Y CIENCIA CIUDADANA	57
Experimento 1:	
Dinámica de los datos de las estaciones de monitoreo.....	60
Experimento 2:	
Validación de datos de los sensores de bajo costo	66
Experimento 3:	
Medición ciudadana de la calidad del aire	
en Ciudad Bolívar.....	78
Dificultades comunes a los tres experimentos.....	110
CONCLUSIONES.....	115

RECOMENDACIONES120

BIBLIOGRAFÍA.....123

ANEXOS.....131

Anexo 1.

Recopilación de normas y políticas nacionales

sobre la calidad del aire131

Anexo 2.137

Agradecimientos

Esta investigación, producto de un arduo trabajo, fue posible en primer lugar gracias a la participación de la ciudadanía. Queremos agradecer la colaboración que nos brindaron en los barrios Lucero y México, especialmente aquella brindada por Luis Calderón y muchos otros ciudadanos que se interesaron en indagar sobre la problemática localizada de la mala calidad del aire, quienes abrieron sus casas y mentes a la posibilidad de producir conocimiento por y para los vecinos del sector. Sin su colaboración este proyecto no hubiera sido posible. Igualmente, agradecemos a Juan Carlos Pachón por su enorme apoyo como puente.

En segundo lugar, queremos agradecer especialmente a los profesores Luis Belalcázar, José Agustín Zamudio y Néstor Rojas por su interés de promover en la academia nuevos problemas y preguntas sobre asuntos de interés público que requieren mayor atención. Su acompañamiento fue fundamental para definir las metodologías que dieron forma y confiabilidad a los experimentos que se realizaron. También sumamos este agradecimiento a los y las funcionarias de la Secretaría Distrital de Ambiente y el grupo de Calidad del Aire, en especial a la secretaria distrital Carolina Urrutia Vásquez, quienes nos permitieron el ingreso a las estaciones oficiales y nos acompañaron durante todo este proceso.

También agradecemos a Sebastián Rubiano, quien impulsó esta idea en su paso por Dejusticia. Junto a él damos gracias a las compañeras y compañeros que participaron en espacios de discusión y revisión, particularmente a Diana Guarnizo, Diana Guzmán, Víctor Práxedes, Mariana Escobar e Isabel Pereira; sin sus observaciones el texto no tendría el buen norte actual. Por supuesto, agradecemos a la “señora de las publicaciones”, Claudia Luque, quien trabajó en cada detalle de la publicación e impresión de este texto.

Gracias a todas y todos por acompañarnos en este camino.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica, entendida como una afectación a los derechos de las personas, es una problemática mundial que ha obtenido creciente atención. No tenemos más opción que respirar el aire que hay en nuestros lugares de residencia, trabajo o esparcimiento y, consecuentemente, someternos a los perjuicios que su mala calidad pueda causarnos. El desarrollo mundial, principalmente el de las ciudades, se ha dado a partir de la quema de combustibles fósiles, los cuales generan la inmensa mayoría de los contaminantes del aire que respiramos. De hecho, las *materias finas* o *particuladas* son la causa más frecuente de polución dentro de las ciudades y, por lo mismo, tienen una gran incidencia en la salud pública.

En el mundo, casi toda la población (99 %) respira un aire que supera los límites de calidad recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS)¹; es decir que vivimos en un mundo en el que la garantía de la salud humana parece una utopía. Sumado a esto, la polución está relacionada con alrededor de siete millones de muertes prematuras al año a nivel mundial y tiene un gran impacto en la pérdida de años de vida saludable². Mientras tanto, los Estados no logran establecer políticas públicas eficaces para contener la contaminación atmosférica y mejorar la vida de las personas. Si bien la mala calidad del aire es una problemática medioambiental, tienen graves impactos sobre la salud pública y los derechos individuales de las personas, tales como vida, salud, dignidad, integridad e intimidad.

1 Miles de millones de personas siguen respirando aire insalubre: nuevos datos de la OMS (2022, 4 de abril). Organización Mundial de la Salud.

2 Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2022). *Base de datos de la calidad del aire*. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/who-air-quality-database>

La tecnología y la ciencia son las bases para la toma de las decisiones públicas en materia de calidad del aire, porque el monitoreo es determinante para evaluar y corregir los problemas que se presentan. Sin embargo, las limitaciones que tienen las tecnologías y el Estado, así como el precario involucramiento de la ciudadanía en la producción, el análisis y la difusión de este conocimiento científico, generan una brecha casi insalvable entre la información científica y la aplicación tecnológica, por un lado, y el uso que la ciudadanía pueda darle para garantizar su incidencia efectiva en los asuntos públicos, por el otro. Al ser asuntos reservados a la academia y los demás expertos, la ciudadanía no logra beneficiarse suficientemente de este conocimiento³. En consecuencia, las políticas y las decisiones en pro de la garantía de derechos aún distan de asegurar condiciones óptimas de calidad del aire que redunden en una buena salud ambiental.

Al respecto, Trébola Organización Ecológica y Dejusticia⁴ han unido esfuerzos para fortalecer la información disponible sobre calidad del aire. Buscamos que este tema deje de verse solo como un problema técnico-científico, para que sea considerado esencialmente como un problema de derechos fundamentales y de obligaciones del Estado que se debe reflejar en las competencias de las autoridades públicas involucradas. Para este trabajo, consideramos que Bogotá D.C. —al ser la capital del país y su ciudad más poblada— es un caso de estudio que permite comprender cuáles factores (como condiciones físicas y sociales, funcionamiento de las normas y herramientas de política pública aplicadas, entre otras) convergen para que la contaminación atmosférica permanezca y para que la ciudadanía sea o no un partícipe activo en la solución de este problema.

Así, de una parte, el texto busca recoger el esquema normativo y de gestión pública más relevante en materia de calidad del aire, a fin de

3 En relación con la importancia de la participación ambiental en la construcción de políticas sobre calidad del aire, en el libro *La desigualdad que respiramos* https://www.dejusticia.org/wp-content/uploads/2021/08/La-desigualdad-que-respiramos_web-2_compressed-1.pdf (Daza Castillo et al., 2021) los autores concluyen que “establecer una radiografía completa de los actores involucrados en la política requiere de espacios de participación amplios, representativos y horizontales, que no propendan únicamente por informar a las personas, sino por considerar las implicaciones de la política en sus vidas” (p. 80).

4 Estos experimentos hicieron parte de la consultoría realizada por Trébola Ecológica y contratada por Dejusticia. Sus resultados fueron incluidos en el informe técnico final y son la principal información que se recoge en esta publicación.

identificar aquellas dificultades que puedan estar incidiendo para que la ciudadanía aún respire un aire de calidad defectuosa. Al respecto, una de las preocupaciones que antecedió el estudio estaba relacionada con lo difuso que resultaba el marco de normas para que los ciudadanos pudieran acceder a información más concreta sobre la intervención de la administración pública. Por esto, el lector encontrará en este libro una descripción de las normas distritales, nacionales e internacionales, así como de sentencias de la Corte Constitucional colombiana, que identifican cómo trabaja (o, mejor dicho, debe trabajar) el Estado para garantizar que sus ciudadanos respiren un aire sano.

Por otra parte, considerando las crecientes iniciativas ciudadanas que buscan involucrarse en el monitoreo de la calidad del aire, realizamos tres experimentos para evaluar la confiabilidad de *sensores de bajo costo*. Específicamente, analizamos la exposición de las personas en tiempo real al *material fino o particulado resuspendido*⁵ de 2.5 microgramos por metro cúbico (PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), uno de los contaminantes que más impacto causa en la salud.

Además, se diseñó y se puso en funcionamiento el piloto de una *red barrial de monitoreo de calidad del aire*, a fin de vincular a la ciudadanía con el proceso científico y obtener datos de un *microambiente*⁶ contaminado. En este caso, uno de los líderes sociales y ambientales de Ciudad Bolívar se mostró interesado en realizar una medición con estos sensores para corroborar su preocupación: que los niveles de contaminación atmosférica del lugar donde habita superan los niveles permitidos por las normas. Para esto, él sirvió como puente con la comunidad que estaba interesada en

5 Uno de los principales contaminantes del aire es el material particulado (PM), pues este puede permanecer suspendido en el aire, provocando obstrucciones de las vías respiratorias. Se suele clasificar según su diámetro aerodinámico y puede medir entre 2.5 y 10 micras. La presencia de ese material surge de actividades humanas, condiciones atmosféricas y fenómenos meteorológicos. Las fuentes humanas de contaminación son producto principalmente de sectores industriales y fuentes móviles (Fischer & Beltrán, 2022).

6 Los microambientes son aquellas porciones espaciales en las que se concentran los estudios. Un ejemplo de ello se presenta en Mazaheri et al. (2018), donde se detalla el estudio que se realiza en microambientes urbanos cerrados y abiertos, como, por ejemplo, exposición que ocurre al esperar el transporte público o en otros espacios cotidianos. Una característica importante en estudios con microambientes es el tiempo que permanecen las personas en dicho espacio.

alguna actividad, bien fuera prestando su casa para la instalación y puesta en funcionamiento de los sensores o para, por ejemplo, participar en el conteo de carros.

Cabe señalar que la medición de la calidad del aire es una práctica relativamente reciente, que se basa en la mejor tecnología disponible (o asequible). En dichos estudios, por medio de diferentes métodos y equipos técnicos, se recolectan las partículas resuspendidas en el aire en un momento y lugar determinados, bajo unas condiciones atmosféricas específicas. Estos datos se cruzan y a partir de ellos se estiman las concentraciones, las cuales se comparan con los *límites permisibles* que establecen las normas; es decir, el máximo nivel de contaminantes que se considera adecuado para la salud humana.

Según la OMS, en la actualidad más de 6000 ciudades de 117 países monitorean la calidad del aire. Esto no quiere decir que la gente respire mejor aire, pero, cuando menos, demuestra que cada vez existen más datos para identificar causas y buscar soluciones a estos problemas. En Colombia, un país de ingreso medio, pocas ciudades cuentan con sistemas robustos para medir la calidad del aire (principalmente Bogotá y aquellas ubicadas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá), y difícilmente se ha podido identificar monitoreos en zonas rurales. Esto último es particularmente importante en zonas de extracción minera de carbón y/o algunos materiales de construcción, pues estos procesos generan alta dispersión de material particulado. Así las cosas, la línea base de información del aire es un privilegio de algunos grupos que pueden coincidir, pero no necesariamente allí se incluye a los más afectados.

Además, el objetivo de los sistemas oficiales de medición es identificar la contaminación atmosférica de cinco *contaminantes criterio*⁷ en un rango amplio. Es decir, esta evaluación permite identificar la relación entre fuentes y estaciones de monitoreo, pero solamente en los 20 puntos⁸ de la ciudad en donde están instaladas⁹. Por tanto, el sistema de medición oficial tiene algunas limitaciones. Para empezar, el método oficial abarca

7 Material particulado (PM10 y PM2.5), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃) y monóxido de carbono (CO).

8 Al momento de finalizar esta investigación, solo 18 estaban en funcionamiento. La estación ubicada en Bosa fue hurtada y la de La Sevillana no ha arrojado datos desde hace meses.

9 Estas estaciones están ubicadas a lo largo de la ciudad y pueden ser consultadas por medio de la página de la Secretaría de Ambiente de Bogotá, en: <https://www.ambientebogota.gov.co/estaciones-rmcab>.

grandes zonas, por lo que no es posible establecer relaciones directas entre individuos o grupos específicos de personas con las *fuentes generadoras de contaminación*¹⁰ y sus efectos. Adicionalmente, el funcionamiento de la red oficial depende de la gestión contractual para su ubicación y operatividad y, además, requiere un alto presupuesto —dado que se necesitan servidores y una red de comunicaciones—, algo que no pueden costear la mayor parte de municipios del país.

A su vez, lo anterior incide en que no haya datos o que estos sean precarios, parcializados o exclusivos. Consecuentemente, tampoco es posible establecer la afectación directa a los derechos de los individuos ni adoptar mecanismos más eficaces para su protección. Dicha situación también se traduce en un débil involucramiento de la ciudadanía en la toma de decisiones y la protección de sus derechos.

Por otra parte, hay que considerar que históricamente la gestión pública del aire se ha abordado desde una perspectiva ambiental y de derechos colectivos. Sin embargo, la evidencia muestra que es esencial incluir también un enfoque desde la salud pública y los derechos individuales que son vulnerados por la polución. Esto se debe a que el material particulado incide directamente en el desarrollo de enfermedades agudas y crónicas, así como en las tasas de mortalidad.

Las partículas finas suspendidas que se miden en los análisis se dividen principalmente en dos tamaños: las de 10 y las de 2.5 microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Estas últimas, por su tamaño reducido y toxicidad, llegan a la profundidad de los pulmones y el torrente sanguíneo, y son las que más efectos nocivos tienen en la salud, sobre todo porque generan enfermedades cardiovasculares y respiratorias, además de cáncer de pulmón (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Instituto Nacional de Ecología, 2011, p. 33). Así, la suspensión de estas partículas en el aire, pese a originarse en actividades que generan impacto ambiental, tiene consecuencias específicas graves para la salud y la dignidad humana. Por tales razones, este estudio busca brindar herramientas jurídicas, teóricas y prácticas para comprender, en el ámbito local, ciertas dinámicas cotidianas que requieren atención del público en general y, especialmente,

10 Estas fuentes pueden ser *fijas*, como las fábricas o los *chircales* —lugares artesanales de cocción y producción de ladrillos (uno de los mayores problemas en Bogotá)—, o *móviles*, como los vehículos que funcionan por medio de gasolina o gas. Estas últimas generan el 75 % de las emisiones de material particulado (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020, p. 213).

de las autoridades para lograr construir políticas más articuladas, oportunas y eficaces.

Por otra parte, en este estudio se intenta presentar la ciencia ciudadana como una alternativa que puede conectar la política pública con la participación activa de la comunidad y sus territorios. Como ejemplo presentaremos algunos experimentos piloto que buscan modelar procesos científicos para y con la ciudadanía. Hay que considerar que la pandemia por COVID-19, entre otros factores, redujo el margen de acción ciudadana. No obstante, nuestra pretensión es que lo aquí descrito sirva como antecedente de futuros ejercicios y que convoque a más ciudadanos para la producción y el análisis del conocimiento local.

La ciudadanía deliberante y activa es, entonces, a quien nos dirigimos en primera instancia con la elaboración de este estudio. Sin embargo, no por eso excluimos a otras audiencias. De hecho, los análisis y la información que se presentarán en el desarrollo de este texto son altamente relevantes para quienes toman decisiones relacionadas con medio ambiente, salud pública y movilidad en zonas del país afectadas por la contaminación atmosférica, así como para los jueces y académicos que se ven enfrentados con los problemas jurídicos y prácticos entre derechos y calidad del aire.

Los sensores de bajo costo, como tecnología que le permite a la ciudadanía realizar mediciones del aire alternativas a la red institucional, son una herramienta novedosa que facilita el cierre de brechas entre el Estado y la ciudadanía, porque ambos pueden conocer la incidencia de la calidad del aire a su alrededor, incluso en sus casas, oficinas, medios de transporte y en sus vidas en general. Sumado a esto, los sensores se pueden ubicar fácilmente, presentan sus datos en plataformas web de código abierto (no requieren la compra de un *software* específico) y su costo oscila entre 50-70 USD.

Tal generalidad en la recolección de datos del sistema oficial impide, igualmente, acercarse a algunos microambientes, lo que significa que el rango de medición no es lo suficientemente detallado para evidenciar problemas concretos sobre la relación directa entre fuentes de contaminación y derechos individuales de las personas (salud, intimidad, dignidad), ni tampoco para establecer soluciones posibles. Pero, además, no es posible conocer el estado del aire que se respira en la mayor parte del país.

Esto incide también en que el Estado no establezca reglas apropiadas para defender los derechos de los ciudadanos. Al no existir información detallada, sino solo sobre probabilidad de ocurrencia de enfermedad en la población, y al ser un asunto de competencia casi exclusiva del sector

ambiental, los ciudadanos tienen, en la práctica, pocas garantías para defender sus derechos amenazados.

Cabe señalar que dichas sustancias que por sus características son nocivas para la salud, tal como sucede con los contaminantes atmosféricos, han empezado a ser controladas e incluso prohibidas por los gobiernos. Ejemplo de esto es el uso normalizado del asbesto y el mercurio, que han cobrado incontables vidas y han disminuido la calidad de vida de muchas personas. Ese caso demuestra la gravedad de no controlar adecuadamente los contaminantes, al igual que la dificultad para que se protejan los derechos.

En la localidad de Fontibón (Bogotá) se presentó un caso relacionado durante los picos más mortales de la pandemia por COVID-19. El funcionamiento continuo de hornos crematorios¹¹ generó una enorme contaminación localizada. La ciudadanía no podía acceder a herramientas técnicas y jurídicas oportunas y eficaces para demostrar que la producción excesiva de material particulado resuspendido provenía de dicha actividad, y que, por ende, sus derechos fundamentales estaban siendo lesionados.

Sin embargo, en el mundo algunas cosas se están replanteando. La transición a economías libres de combustibles fósiles no solo tiene un gran impacto en la reducción de gases de efecto invernadero, sino que también mejora la calidad del aire afectada por material resuspendido. Además, los principios ambientales de prevención y precaución se han posicionado para exigirle al Estado que adopte medidas para evitar la generación de daños graves en el medio ambiente y la salud humana.

Las más recientes victorias ciudadanas frente a sustancias presunta o probadamente tóxicas son muestra de un avance en ese sentido. Por ejemplo, se condenó a Bayer (antes Monsanto) por su pesticida *Round up* (o glifosato), dado que contiene componentes cancerígenos (2018). También, el caso de una niña de nueve años en el Reino Unido que falleció como consecuencia de una crisis de asma atribuida a las concentraciones ilegales de contaminantes en el aire (2020) muestra una tendencia hacia una protección más fuerte ante las sustancias tóxicas.

Este giro mundial hacia una protección más eficaz de los derechos humanos asociados al medio ambiente ha empezado a impulsar normas y políticas internacionales que buscan acercar más a la ciudadanía con las

11 “Alarma por humareda”, 2020.

decisiones de las administraciones públicas. En ese mismo sentido, los sistemas de medición ciudadana de la calidad del aire por medio de sensores de bajo costo son cada vez más estudiados por las autoridades públicas en el mundo. Se les ha considerado como herramienta complementaria a los sistemas de monitoreo oficiales y resultan útiles para tener más y mejores fuentes de información para la toma de decisiones.

Sumado a esto, los datos de estas redes de monitoreo ciudadano de calidad del aire se pueden ubicar en lugares donde las redes oficiales no, y más importante aún, miden la *exposición individual*, o sea, la calidad de aire que directamente respira un ciudadano en un determinado momento. Así, no solo consideran la *contaminación de fondo* —aquella presente en zonas no afectadas directamente por fuentes emisoras de contaminantes y que es representativa de una gran extensión de territorio (Agencia Estatal de Meteorología [AEMET], s. f.)— tal y como sucede con las estaciones fijas.

Hay que considerar también que cada vez es más fuerte la tendencia de avanzar hacia la complementariedad entre redes de monitoreo de bajo costo y estaciones oficiales, de tal manera que se perfeccionen los datos. Esto sirve además para propiciar la participación ciudadana en la producción y valoración de conocimiento sobre el problema de la calidad del aire. Una muestra es el proyecto AirNow en EE. UU., que utiliza una red de sensores Purple Air. En grandes eventos de mala calidad del aire, como los incendios forestales en California (Mataka, 2020), esta red ha demostrado la importancia de sus datos para complementar los de la red oficial de monitoreo.

En Colombia existe la red de ciudadanos científicos del Sistema de Alertas Tempranas Ambientales de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA)¹². Esta cuenta con 250 sensores de bajo costo instalados cuya información, infortunadamente, no es tenida en cuenta dentro de los datos de la red oficial (Hoyos, 2020). Además, dicha red estuvo en mantenimiento casi dos años y los datos no pueden ser fácilmente procesados. Recientemente, en septiembre de 2022, la Alcaldía de Bogotá lanzó la Red Colaborativa de Microsensores para medir la calidad del aire de varias zonas de la ciudad¹³. También, en este mismo mes se puso en marcha la primera red zonal ciudadana denominada “Red de cuidadores del aire de Puente Aranda”.

12 Ver: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/siata/Paginas/ciudadanos-cientificos.aspx>

13 Ver: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/bogota-lanza-la-red-de-microsensores-para-medir-la-calidad-del-aire>

De todas formas, aunque estos datos ciudadanos todavía son tomados con cierto recelo por los expertos y las autoridades públicas (administrativas y judiciales), poco a poco la opinión pública, la academia y los tomadores de decisiones han venido comprendiendo las oportunidades que abren estos sensores para generar un monitoreo más completo, inmediato y detallado.

Las problemáticas más locales sobre la calidad del aire que se respira, tales como avenidas contaminadas, industrias o concentración de vehículos contaminantes, no son detectadas en todos los casos por la red oficial tradicional, pues está diseñada para recoger datos, medirlos y hacer un estimado de la calidad del aire a su alrededor a cierta altura (6 m en promedio) y, además, solo cuenta con 20 puntos específicos en la ciudad. Esto no quiere decir que sea un modelo ineficiente; de hecho, logra predicciones de altas correlaciones con la realidad de la ciudad, que se espera mejoren con la red complementaria instalada. Los sensores de bajo costo, permiten visibilizar exposiciones locales e individuales en tiempo real que pueden complementar los datos del sistema oficial. De esta manera, las decisiones en materia de salud pública e impacto de actividades pueden ser más precisas y oportunas.

En el caso de Bogotá, las mediciones ciudadanas empezaron a ser populares en 2017, a través del trabajo realizado por Daniel Bernal en la red social Twitter. Este ejercicio visibilizó las limitaciones que tiene la red oficial de monitoreo y ha dado herramientas a la ciudadanía para exigir respuestas, de cara a la mala calidad del aire en la capital. Además, ante las frecuentes caídas y limitaciones de la red oficial, las redes ciudadanas son una alternativa en lugares donde esta no recopila datos, tal y como sucede en Ciudad Bolívar, Usme y Soacha.

El aire no es un elemento sobre el cual podamos decidir si queremos consumirlo o no. Simplemente, no hay opción. Por eso, es urgente que el Estado colombiano se comprometa más decisivamente con la protección de la salud ambiental de las personas. En esa vía, la producción y acceso a la información para la participación ciudadana requiere de un enfoque que proteja los derechos de los individuos potencialmente afectados por la polución, y la ciencia ciudadana es una herramienta determinante para comprender dicha relación.

¿Cómo se abordarán estos temas?

A continuación se realizará una descripción conceptual del problema de la polución y los derechos, especialmente en lo que a medio ambiente y

salud se refiere. Posteriormente se especificará el contexto de la contaminación del aire en Bogotá, con las instituciones y normas involucradas en su gestión. De esta manera, el lector podrá comprender cuál es el sistema de reglas y competencias que definen la gestión pública sobre la materia.

Finalmente, mostraremos los resultados, aprendizajes y desafíos de tres experimentos¹⁴ concomitantes realizados por Trébola Organización Ecológica, en compañía de Dejusticia. El *primero* buscaba identificar, indicativamente, qué tanto varían los datos recopilados en los alrededores de una estación oficial en la medida en que los sensores se alejan de esta, algo que no suele tenerse en cuenta dentro de los datos recopilados. El *segundo* se hizo para establecer la correlación entre la información que arrojan los sensores de bajo costo y las estaciones oficiales de monitoreo; y, el *tercero*, para medir la calidad del aire en una de las zonas que parece tener una carga desproporcionada de contaminantes resuspendidos. Se escogió la avenida Boyacá con calle 66 Sur (ambos costados), entre los barrios México (costado oriental) y Lucero (costado occidental), en la localidad de Ciudad Bolívar¹⁵.

Por último, este documento, desafiante por la necesidad de traducir el lenguaje técnico científico a uno generalizado, es también una apuesta por la democratización del conocimiento y por la garantía efectiva del acceso a la información y la ciencia para fortalecer los derechos de la ciudadanía en cualquier rincón del país. Así, nace de la necesidad de fortalecer

-
- 14** El diseño de los experimentos fue realizado con apoyo del profesor Luis Belalcázar, a quién agradecemos su valiosa participación, con base en el estudio de tráfico y modelación incluido en la tesis de grado de Maestría en Ingeniería Ambiental de José Agustín Zamudio Peña <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59910>*tesis de grado de Maestría en Ingeniería Ambiental. Además, agradecemos al profesor Alejandro Murad y a su equipo de la Universidad Distrital, quienes participaron en el experimento y facilitaron el uso de la estación de monitoreo de la calidad del aire de dicha institución. También damos las gracias al profesor Néstor Rojas por sus aportes, así como a la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, particularmente a una parte del equipo de la subdirección de Aire y a Fredy Escobar, como líder del manejo de los sensores de bajo costo.
- 15** El proyecto estuvo acompañado por la generosa asesoría de los expertos Luis Belalcázar, Néstor Rojas y Alejandro Murad, así como de los funcionarios de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB); específicamente: Hugo Sáenz, Sebastián Gómez, Luis Álvaro Hernández y Fredy Escobar, entre otros, a quienes agradecemos su participación. También queremos agradecer al líder del grupo de fuentes móviles (SDA), Juan Carlos Parra, por su revisión y comentarios finales.

los reclamos sobre legitimidad, credibilidad y relevancia del uso de estos datos en la toma de decisiones sobre la calidad del aire, al igual que del consecuente clamor por respirar aire limpio y gozar de garantías para una calidad de vida digna y un medio ambiente saludable y libre de tóxicos.

1. LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE: UN PROBLEMA DE DERECHOS

La calidad del aire, que es un elemento que hace parte del medio ambiente, está dada a partir de su composición, y puede verse alterada por la presencia de *sustancias contaminantes*¹. Según su cantidad, constitución y exposición, la contaminación atmosférica puede ser, además de un problema ambiental, un riesgo para la vida y dignidad de las personas afectadas. En específico, como una sustancia potencialmente tóxica que entra al organismo al respirar, el material resuspendido permanece en las residencias, los medios de transporte y cualquier espacio en el que pase tiempo una persona. No hay forma de escapar de dicha contaminación. Esas partículas reposan o se adhieren a la ropa, la piel y todo aquello con lo que entren en contacto.

Así las cosas, la invasión inevitable de sustancias que afectan la salud humana requiere medidas estatales para proteger a los ciudadanos de aquellas actividades generadoras de la contaminación ambiental. Esto es especialmente relevante en los países que tienen compromisos internacionales en materia de derechos humanos y medio ambiente², los cuales

-
- 1 La contaminación del aire sucede al introducir en la atmósfera partículas o productos secundarios que pueden ser riesgosos o dañinos, y los principales medios de contaminación atmosférica se concentran en los procesos industriales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], s. f.-a). Algunas sustancias contaminantes son las partículas PM10, PM2.5 y carbono negro, entre otras.
 - 2 Dentro de los acuerdos más representativos en materia de DD. HH., Colombia ha suscrito la Convención Americana de Derechos Humanos y su protocolo adicional de San Salvador, así como el Convenio 169 de la Organización Internacional del Trabajo (oit). En materia de medio ambiente, el país cuenta con obligaciones relacionadas con el Convenio sobre la Diversidad Biológica, la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio

están desarrollados (o por desarrollar) a través de políticas públicas y normas de derecho interno (como la constitución política o leyes).

No obstante, en la práctica son muchos los factores que determinan que la garantía de estos derechos no sea efectiva. Para empezar, los problemas estructurales en la conformación del Estado (desigualdad, fragilidad estatal, economía, entre otros) inciden en que las transformaciones en favor de un ambiente seguro, limpio, saludable y sostenible³ sean de largo aliento o no se den. A esto se suman la rápida transformación social y la novedad de lo científico y lo tecnológico, que inciden en el uso de nuevas sustancias, técnicas y métodos nunca antes vistos que han profundizado la crisis ambiental (p. ej. plásticos, aerosoles, *fracking*, etc.).

Ejemplo de esta relación es la gestión de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá D.C., que por su origen e impacto no solo altera al ambiente, sino que termina afectando seriamente la salud pública (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020). A nivel nacional, el aire contaminado es un factor de riesgo al que se le atribuyen cerca de 15 000 muertes al año. Esta cifra incluye aquellas que son producto de las enfermedades relacionadas con la exposición al PM2.5, entre ellas la enfermedad isquémica del corazón (EIC) y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Instituto Nacional de Salud [INS], 2018, p. 96). De hecho, son múltiples los estudios que han asociado la polución con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, con bronquitis crónica y con infecciones respiratorias⁴.

Las grandes ciudades tienen mayores probabilidades de estar expuestas a este factor de riesgo. Por ejemplo, Bogotá D.C. y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)⁵ reportan que más del 75 % de la mortalidad es atribuible a la contaminación atmosférica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012, p. 94). Para el caso de la capital colombiana, en 2020 las infecciones respiratorias agudas (IRA)

Climático (CMNUCC) y el Acuerdo de París.

- 3 Resolución 48/13 del Consejo de Derechos Humanos de las Naciones Unidas (CDHNU).
- 4 Al respecto, ver: Golub, E., Klytchnikova, I., Sanchez-Martinez, G. & Belaus-teguioitia, J. C. (2014). *Environmental Health Costs in Colombia*. World Bank Group. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/21096/929560WP0P14940s0occ.0paper0series0.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- 5 Como región está conformada por diez municipios: Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Itagüí en el sur, Medellín en el centro del valle, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa en el norte.

representaron 1 141 625 casos (Secretaría Distrital de Ambiente [SDA], 2020, p. 132). De igual manera, para el caso del AMVA, en Medellín enfermedades como asma, EPOC y otras enfermedades respiratorias crónicas (ECR) estaban relacionadas en un 44 % a la carga de enfermedad producida por la mala calidad del aire (Alcaldía de Medellín, 2020, p. 56).

En general, las normas que regulan este tema se refieren a *límites permisibles*, es decir, a la cantidad de contaminantes en el aire que las autoridades consideran que no afectan la salud de las personas. Sin embargo, en muchos lugares, las personas están respirando sustancias que inmediata o potencialmente afectan su salud, sin que la política pública establezca un enfoque de prevención apropiado para quienes tienen mayor riesgo y/o son más vulnerabilidades. Por ejemplo, las personas con ECR (como asma, EPOC, rinitis alérgica e hipertensión pulmonar, entre otras) o con infecciones respiratorias agudas (IRA) (causadas por diferentes microorganismos como virus y bacterias) son más susceptibles a la contaminación. A esto se suman factores como preexistencias y condiciones socioeconómicas que profundizan dichos factores de riesgo.

En Bogotá, en línea con la tendencia global, la calidad del aire es tratada como un asunto ambiental que tiene alguna incidencia en la salud pública. Esto implica que la polución está vinculada principalmente a su génesis, las fuentes de contaminación, y no a sus consecuencias, o sea, el deterioro de la salud de los y las habitantes de la ciudad. El desafío en este punto es, entonces, poder identificar la relación entre los impactos o daños ambientales producidos como consecuencia de la polución y la afectación a la salud y vida cotidiana de las personas.

En esto coinciden expertos como Luis Belalcázar —profesor de la Universidad Nacional de Colombia y experto en fuentes fijas y móviles— y Sebastián Gómez —profesor de calidad del aire y exfuncionario de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA)—, quienes señalan que es difícil poder atribuirle una afectación a una fuente determinada, así sea aparentemente evidente. Estas limitaciones se hacen aún más complejas si lo que se busca es evidenciar el daño a la salud y la calidad de vida de un determinado individuo o una comunidad.

Desde una perspectiva jurídica, en el mundo hay varios casos sobre la incidencia de la calidad del aire en los derechos de las personas. Varios litigios del Tribunal de Justicia de la Unión Europea están relacionados con excedencias frente a la Directiva de Calidad del Aire de la Unión Europea, que establece los límites de emisiones para los países miembros. Este es el

caso de Italia, Alemania, Francia, Polonia, Bulgaria, España, Hungría, Reino Unido y Rumania. A nivel interamericano, el caso de La Oroya, Perú, que actualmente se encuentra en estudio de la Corte Interamericana de Derechos Humanos (Corte IDH), puede ser el primer precedente sobre la relación entre la falta de control estatal de los niveles de emisiones permisibles y la vulneración de derechos humanos.

En el país, dentro de la estructura del Estado colombiano es posible identificar diferentes normas y políticas asociadas a la protección de los habitantes por los daños que se generen en el medio ambiente, que principalmente giran en torno a la defensa de derechos de las personas. Sin embargo, por ser un tema asociado casi exclusivamente a lo ambiental, la calidad del aire se ha desligado de la incidencia que tiene en la salud o la intimidad de las personas. Hay que recordar que más allá del problema ambiental, hay diferentes derechos —fundamentales y colectivos— que resultan afectados.

Los *derechos fundamentales* son aquellos que tienen una conexión directa con los principios constitucionales, lo que quiere decir que son resultado de la aplicación directa de la Constitución Política y la jurisprudencia de la Corte Constitucional (como intérprete autorizado). Estos derechos son inherentes al ser humano e irrenunciables, y el Estado tiene la obligación de respetarlos y hacerlos respetar, por lo que se pueden exigir vía acción de tutela⁶. Dentro de estos justamente se encuentran el derecho a la vida, a la salud y a la intimidad.

Los *derechos colectivos*, por su parte, pretenden garantizar valores o bienes indivisibles de la ciudadanía en general. Por ejemplo, el *derecho a gozar de un ambiente sano* (art. 79 de la Constitución) es de tipo colectivo y solo adquiere la calidad de fundamental si entra en *conexidad* con uno fundamental⁷. De manera muy específica, la polución del aire está

6 Definición basada en la Sentencia T-406/92 de la Corte Constitucional.

7 Las diferencias entre los derechos colectivos y los derechos fundamentales han sido expresadas por la Corte Constitucional en las siguientes definiciones: “la Sala Plena de la Corte definió el derecho colectivo como el ‘interés que se encuentra en cabeza de un grupo de individuos, lo que excluye motivaciones meramente subjetivas o particulares’ (...) De otra parte, la Corporación afirmó que: ‘un derecho es fundamental y, por consiguiente, puede ser protegido por vía de tutela cuando se demuestre la afectación subjetiva o individual del demandante y, será colectivo, protegido mediante la acción popular, cuando afecte a una comunidad general que impida dividirlo o materializarlo en una situación particular’”. (Corte Constitucional de Colombia, T-341/16).

conceptualmente caracterizada como una manifestación del deterioro del derecho a gozar de un ambiente sano. Sin embargo, a la luz de la jurisprudencia de la Corte Constitucional en la materia, este problema debe ser analizado considerando los derechos fundamentales potencialmente afectados —tales como salud, vida, intimidad y vivienda—, que en general se refieren a vivir una vida libre de tóxicos y en condiciones de dignidad.

Las consecuencias de la contaminación del aire —como la enfermedad crónica, aguda o grave en los sistemas cardiacos y respiratorios, al igual que las molestias recurrentes en ojos, garganta, nariz y piel— tienen efectos en el goce de una vida en condiciones saludables. Estos efectos a la salud han sido estudiados y explicados por autores como Carlos Echeverri (2019), quien enfatiza en las consecuencias de la intrusión de partículas al sistema respiratorio y, además, asocia el aumento del material particulado PM10 con un aumento de alrededor del 1 % de mortalidad de todas las causas (Echeverri, 2019, p. 95).

Además, las personas se quejan también de otros impactos no tan evidentes, pero igualmente importantes, como persistencia de polvo en el interior de las residencias. La permanencia del hollín y polvo dispersado en enseres, plantas, ropa, alimentos y, en fin, en todo espacio en el que se reside o trabaja vulnera el derecho fundamental a la intimidad. Es así porque el estándar constitucional garantiza que las personas tienen derecho a no ser molestadas, así como a estar libres de injerencias arbitrarias (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-154 de 2013).

En ese mismo sentido, los “gastos hormiga” relacionados con la atención domiciliaria de las consecuencias del material particulado —como gotas para irritación de ojos o remedios caseros con miel, limón, panela y jarabes para molestias en la garganta, gripas leves, etc.— tienen impactos directos en la capacidad adquisitiva de las personas. A menores ingresos, mayor representatividad de estos gastos en el costo de vida.

Todos los Estados que han suscrito tratados en derechos humanos tienen el deber de prevenir la exposición a sustancias y desechos peligrosos (como lo señala el documento ONU A/74/480⁸). De este modo,

8 Tuncak, B. (Relator Especial sobre las implicaciones para los derechos humanos de la gestión y eliminación ecológicamente racionales de las sustancias y los desechos peligrosos), *Implicaciones para los derechos humanos de la gestión y eliminación ecológicamente racionales de las sustancias y los desechos peligrosos*, doc. ONU A/74/480 (7 de octubre de 2019).

están obligados a respetar y cumplir los derechos humanos reconocidos; esto incluye enfrentar las amenazas y consecuencias de la exposición a sustancias tóxicas, pues afectan los derechos humanos a la vida, la salud, la alimentación y el agua potable, la vivienda adecuada y las condiciones de trabajo seguras y saludables. Colombia, en virtud de sus compromisos internacionales, tiene el deber de prevenir los daños en los derechos humanos y el medio ambiente. Desde el primer ámbito, el Estado debe garantizar el pleno respeto de la integridad de la persona, razón por la cual todo ser humano debería tener derecho a controlar lo que le sucede a su cuerpo (Relator Especial sobre las implicaciones para los derechos humanos de la gestión y eliminación ecológicamente racionales de las sustancias y los desechos peligrosos, 2018).

Por su parte, en materia de medio ambiente, la prevención debe ser la política principal, porque no es posible devolver la naturaleza a su estado anterior al daño producido (Medio Ambiente y Derechos Humanos, OC-23/2017). Esta idea está reforzada por el reconocimiento nacional y regional del derecho a un medio ambiente seguro, limpio, sano y sostenible. Incluso, el Informe del Relator Especial sobre los derechos humanos y el medio ambiente (Boyd, 2022), con la colaboración de la relatoría sobre las consecuencias para los derechos humanos de la gestión y eliminación ambientalmente racional de sustancias y desechos peligrosos, estableció la no toxicidad del ambiente como un elemento sustantivo del derecho a un medio ambiente sin riesgos, limpio, saludable y sostenible.

En consecuencia, el análisis de las normas internacionales sobre DD. HH. y medio ambiente a las que el Estado colombiano se ha comprometido permite concluir que existe un deber público de prevenir la exposición a sustancias tóxicas. Así, las políticas públicas —no solo las ambientales, sino especialmente las de salud— deben establecer las medidas adecuadas para evitar la exposición de las personas a una calidad de aire perjudicial para su salud. Según la jurisprudencia de la Corte Constitucional, las autoridades estatales tienen la obligación de reducir daños ambientales irreparables para garantizar “el acceso a un entorno limpio y libre de emisiones y perturbaciones riesgosas para la salud y la vida humana” (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-614/19). Para esto, el Estado debe cumplir las siguientes obligaciones:

- (i) conservar y restaurar la naturaleza; (ii) prevenir y controlar eficazmente los factores de deterioro ambiental; y, (iii) garantizar las condiciones para lograr un desarrollo sostenible que

permita el crecimiento económico en condiciones aptas para la preservación del ambiente y la salud humana (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-614/19).

En ese mismo sentido, la Corte ha manifestado que “el derecho al medio ambiente no se puede desligar del derecho a la vida y a la salud de las personas”, porque el deterioro del medio ambiente causa perjuicios “irreparables en los seres humanos y si ello es así habrá que decirse que el medio ambiente es un derecho fundamental para la existencia de la humanidad” (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-092/93). Igualmente, otro derecho fundamental que tiene conexión con el ambiente sano es la intimidad de las personas. Según la Corte, la exposición a factores contaminantes en el interior de las moradas puede implicar “molestias para desarrollarse en su ámbito privado personal y familiar” (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-219/ 1994).

En general, la jurisprudencia constitucional resalta la relación ineludible entre la garantía de un ambiente saludable y la efectividad de múltiples derechos fundamentales. Específicamente, la calidad del aire es un tema que se ha abordado, mayoritariamente, respecto a la contaminación por el ruido o las partículas resuspendidas derivadas de la explotación y el transporte de carbón y otros minerales, pero no se ha considerado el impacto de las diferentes actividades contaminantes en las ciudades.

A continuación se presentan algunos fallos de tutela relevantes sobre la contaminación del aire por material particulado. En ellos se evidencia la relación directa entre la concentración de partículas resuspendidas y la vulneración de derechos fundamentales amparados por el sistema constitucional colombiano.

■ Sentencia T-528 de 1992

Un ciudadano presentó una acción de tutela por los fuertes niveles de material particulado, ruido y vibraciones ocasionados por la actividad minera del Cerrejón, en La Guajira. Al respecto, la Corte Constitucional manifestó su preocupación por una “clara y notoria omisión” de proteger las vidas e integridad física de las personas.

■ Sentencia T-046 de 1999

Esta acción de tutela buscó proteger los derechos de varios habitantes de la bahía de Santa Marta (Magdalena), que se veían vulnerados por la contaminación producida con el transporte, cargue y descargue de carbón en un puerto aledaño. Si bien se verificó el cumplimiento de las normas

ambientales, la dispersión de partículas de carbón estaba afectando la salud respiratoria de los pobladores. En ese sentido, la Corte Constitucional manifestó que no se estaba garantizando el derecho a un ambiente sano y que, además, se estaban violentando los derechos fundamentales a la integridad personal, la tranquilidad y la intimidad.

■ Sentencia T-154 de 2013

Este fallo tuvo origen en una demanda interpuesta por un ciudadano que consideró que sus derechos a la vida, la salud, la intimidad y al ambiente sano —así como los de su núcleo familiar— habían sido vulnerados por el ruido producido por las máquinas para la explotación de carbón y por la contaminación derivada de la suspensión del polvillo que se dispersaba en el aire, que también deterioraba las fuentes de agua que utilizaban. La Corte concluyó que el incumplimiento de las normas en materia ambiental no solo vulnera el derecho colectivo a gozar de un ambiente sano, o los derechos fundamentales a la vida y la salud, sino que también desconoce deberes internacionales en materia de desarrollo sostenible⁹.

■ Sentencia T-256 de 2015

Ciudadanos de una comunidad afrodescendiente en La Guajira presentaron una demanda de tutela, entre otras cosas, como consecuencia de la contaminación ambiental que produce la mina del Cerrejón. Al final, la discusión versó más sobre los derechos al agua potable y a la consulta y el consentimiento previo, los cuales fueron amparados junto con aquellos referidos al ambiente sano, a la vida y a la salud.

■ Sentencia T-733 de 2017

Bajo circunstancias similares, en esta decisión un ciudadano reclamó la protección de sus derechos fundamentales al medio ambiente sano y a la salud, que estaban siendo vulnerados por la ausencia de controles adecuados para evitar la contaminación de fuentes hídricas debido al material particulado producido en la extracción de níquel y ferroníquel. Estos procesos afectan de forma particular a las comunidades indígenas y afrodescendientes en la región del Alto San Jorge (Córdoba). En efecto, la Corte encontró un grave perjuicio derivado de dicha actividad minera, y resaltó que el acatamiento de los *valores límites permisibles* —es decir, aquellos

9 “El incumplimiento de las normas sobre mantenimiento de la calidad del aire conlleva, en consecuencia, no solo un desconocimiento del derecho colectivo al ambiente sano y los individualizables de la vida y la salud, entre otros, sino un quebrantamiento grave de deberes internacionales” (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-154/13).

que han establecido las autoridades ambientales como máximos de contaminación— no excluye *per se* la existencia de afectaciones a la salud o al medio ambiente.

■ Sentencia T-614 de 2019

Algunas mujeres integrantes del resguardo indígena Wayúu Provincial, ubicado en el municipio de Barrancas (La Guajira), acudieron a la acción de tutela para proteger los derechos fundamentales a la vida, a la integridad personal, a la salud, al ambiente sano y a la intimidad de los habitantes de su comunidad, pues estaban siendo vulnerados como consecuencia de los graves impactos que tenía la explotación minera del Cerrejón en el resguardo.

Dentro del material probatorio valorado se pudo verificar la existencia de residuos de polvillo de carbón en muebles, puertas, tejados, cuerpos de agua, vegetación y dentro de los hogares. Se encontró, además, una afectación significativa de la calidad del aire por la emisión de partículas, ruido y olores ofensivos. Pese a condenas judiciales anteriores sobre temas muy relacionados¹⁰, la zona aún no contaba con monitoreo para la calidad del aire de PM2.5, que es el más dañino para la salud humana. Con todo, y dada la falta de debida diligencia de la empresa minera, la Corte concedió la protección de los derechos fundamentales a la salud y al ambiente sano de los habitantes del resguardo indígena.

Como se puede observar, la jurisprudencia de la Corte Constitucional resalta la protección jurídica de los derechos fundamentales de aquellas personas que sean afectadas por la contaminación del aire. Incluso, la defensa del medio ambiente y la salud humana está por encima del simple “cumplimiento de la normatividad aplicable o de valores límite de concentración” (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-614/19). Observar las normas no necesariamente excluye la posibilidad de que se generen daños graves a la naturaleza o a las personas, por lo que deben adoptarse todas las medidas para evitarlos, prevenirlos, corregirlos y, en general, manejarlos. Además, según la Corte, la falla del Estado en el control del medio ambiental constituye un incumplimiento de

- (i) los deberes cualificados de protección que tiene el Estado en materia nacional e internacional frente al ambiente y los pueblos indígenas; (ii) el deber constitucional de controlar los factores

10 Sentencias SU-698 de 2017, T-704 de 2016, T-256 de 2015 y T-528 de 1992.

de deterioro ambiental; y, (iii) la obligación de hacer compatible el desarrollo económico con la defensa de la naturaleza y la protección de los derechos fundamentales (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-614/19).

Ahora bien, los casos judiciales estudiados por la Corte se han desarrollado en circunstancias especiales producto de una fuente de contaminación (minería de carbón en la Guajira y el Cesar) cuya actividad es la que mayor probabilidad de incidencia negativa tiene en la vida de las personas. Esto no ocurre en las ciudades, en donde los altos niveles de contaminación son generados por diferentes fuentes.

En la medida en que el diseño de las ciudades, las industrias y los parques automotores no está adecuadamente planeado y/o controlado, la calidad del aire se deteriora. Esto ocurre como consecuencia de la presencia de diferentes sustancias¹¹ producidas por la quema de combustibles fósiles (principalmente), es decir, gasolina, diésel y gas. A su vez, esto genera diversas *emisiones*, tales como material particulado y *gases de efecto invernadero*¹². Otros factores como el clima y la geografía pueden incidir en que la contaminación se acentúe o disperse, tal y como sucede en el caso del Valle de Aburrá.

Hay que considerar, además, que la *dispersión* de la contaminación —es decir, cómo se separa y esparce en diferentes direcciones— no es uniforme. Esta se concentra e impacta de manera más severa o crónica a poblaciones e individuos específicos, y suele coincidir con zonas en las que habitan personas con grandes vulnerabilidades. De hecho, el libro *La desigualdad que respiramos* (Daza Castillo *et al.*, 2021) muestra cómo las decisiones de política para disminuir la polución han profundizado las desigualdades socioeconómicas. De esta relación se infiere que, además de las presiones asociadas a la pobreza multidimensional, las poblaciones más

11 Estas sustancias se conocen como contaminantes. Para el caso de Colombia se miden las siguientes: material particulado, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono y monóxido de carbono. Según la norma de calidad del aire, cada uno de estos contaminantes tiene efectos particulares en la salud (Resolución 2254 MADS, 2017).

12 La atmósfera se compone de gases y aerosoles. Los gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, son gases variables que hacen parte de los procesos meteorológicos. Por su parte, el material particulado es un componente no gaseoso (sólido) que se suspende en el medio atmosférico y proviene de diversas fuentes como erupciones volcánicas, contaminación industrial, entre otras (Reyes Coca, 2002, p. 26).

vulnerables cargan —al menos en Bogotá— con mayor contaminación que el resto de la población. Esta es una evidencia del largo camino que aún hay por recorrer para que las políticas públicas se desarrollen en el marco de una justicia ambiental efectiva.

La capital colombiana, por su dinámica y magnitud, ha tenido dificultades para manejar sus niveles de contaminación atmosférica, que se concentran más fuertemente entre los meses de diciembre y marzo. Esto se debe a la ausencia de lluvias, los cambios en los vientos y el aumento de la temperatura, que inciden para que el material particulado se concentre con mayor intensidad¹³. Esta situación es muy importante, en especial frente a los escenarios de sequía que pueden acentuarse con las tendencias de calentamiento climático.

Si bien es notorio el creciente esfuerzo desde distintos niveles de la administración pública para mejorar las condiciones ambientales, aún existen desafíos que reducen la calidad de vida de los bogotanos, en particular “la transformación tecnológica del sector de carga y las estrategias para mejorar las coberturas verdes y la pavimentación de vías” (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021, p. 9).

Este problema tiene mayor repercusión en el suroccidente de la ciudad. Según la publicación *La desigualdad que respiramos* (Daza Castillo *et al.*, 2021), esta zona no solo soporta mayor contaminación atmosférica, sino que además tiene una enorme desigualdad que acentúa las vulnerabilidades de quienes allí residen, estudian o trabajan. De hecho, la misma administración pública adoptó una meta diferencial de reducción de contaminación del aire del 18 % para el suroccidente, frente al 10 % para el resto de la ciudad (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021, pp. 9 y 107). Por estas razones, es justamente en esa zona de la ciudad donde se concentran los experimentos descritos en el presente documento.

La participación ambiental y la adecuada repartición de cargas y beneficios derivados de la explotación, el uso o el aprovechamiento de recursos naturales son elementos esenciales de la *justicia ambiental*¹⁴. Sin este

13 Esto es producto de los procesos por los que atraviesan los contaminantes en la atmósfera, un conjunto de procesos conocido como dinámica de contaminación en la atmósfera, según las especificaciones de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA, 2020).

14 “La génesis del concepto de justicia ambiental da cuenta de los dos principales elementos que lo integran. El primero, es una demanda de justicia distributiva que aboga por el reparto equitativo de las cargas y beneficios ambientales entre los sujetos de una comunidad (...) En segundo lugar, la

equilibrio la carga del progreso económico puede aplastar los derechos de las personas y deteriorar desproporcionadamente el medio ambiente. En este sentido, la sostenibilidad exige actividades balanceadas para proteger el bienestar humano y la conservación de la naturaleza. Así, por ejemplo, en la Sentencia T-614/19, la Corte señaló que las comunidades indígenas cercanas a las minas de carbón son altamente vulnerables a riesgos ambientales y de salud, mientras que la empresa y el Estado se lucran de la actividad. Esta situación rompe dicho criterio de justicia ambiental.

En las ciudades, si bien el control de las fuentes es más difuso, las obligaciones a cargo del Estado no son diferentes. Por esto, las medidas que se adopten deben garantizar de forma efectiva los derechos a la vida, salud, integridad, intimidad y medio ambiente sano de sus habitantes. Esta es una tarea en la que los gobiernos locales de Bogotá han avanzado; de todas formas, aún falta camino por recorrer, como se mostrará en el desarrollo de este libro.

Además de los derechos fundamentales ya mencionados, existen otros que son de tipo procedimental, los cuales buscan garantizar que la ciudadanía tenga incidencia efectiva en las decisiones públicas y pueda velar directamente por sus intereses. Así, la administración pública debe promover la adopción de políticas, programas y proyectos que prevengan, mitiguen y controlen la contaminación, para garantizar la eficacia de los derechos ciudadanos. En esas decisiones son esenciales el *acceso a la información* y la *participación ambiental*¹⁵, para lo cual es necesario contar con mecanismos administrativos y judiciales que permitan su defensa

justicia ambiental incorpora una demanda de justicia participativa, esto es, un reclamo de participación significativa de los ciudadanos, en particular de quienes resultarán efectiva o potencialmente afectados por la ejecución de determinada actividad" (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-294/14).

- 15** Esta posición consta en la Sentencia T-361/17: "así las cosas, la Sala Octava de Revisión estima que la *participación de la ciudadanía debe ser previa, amplia, deliberada, consciente, responsable y eficaz. Además, debe ser abordada desde una perspectiva local*. La gestión ambiental tiene la obligación de garantizar las condiciones para que los distintos actores intervengan en igualdad de oportunidades. En ese ámbito se quiere otorgar voz a quienes jamás la han tenido. En tales eventos, la participación en el manejo de recursos naturales debe realizarse con una visión global y holística del ambiente y de la sociedad" (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-361/12, énfasis propio).

(Sentencia T-361/17). Es decir que deben existir instancias adecuadas que permitan la incidencia efectiva de la comunidad en la toma de decisiones.

Hay que mencionar que el acceso a la información y la participación ambiental son dos derechos cuya garantía aún requiere desarrollo. Esto pasa porque en muchos casos la información pública no es de fácil consulta, ni clara o suficiente; pero, además, porque existen pocos o ningún escenario de participación efectiva. Particularmente en lo que se refiere a la gestión de la calidad del aire, el lenguaje de la información es muy técnico/científico y falta difusión e involucramiento de la ciudadanía en los debates sobre las causas, consecuencias y soluciones de la polución. Dicha dupla de garantías para la incidencia ciudadana se complementa con el derecho de *acceso a la administración de justicia*. Este implica “la posibilidad de que cualquier persona solicite a los jueces competentes la protección o el restablecimiento de los derechos que consagran la Constitución y la ley” (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia C-037 de 1996). Así, la ciudadanía tiene un marco de acción directa para comprender, incidir y exigir sus derechos.

No obstante, lo científico y lo tecnológico soportan la información que determina las decisiones públicas para hacer frente a la contaminación del aire. Esta situación tiene varios problemas. Para empezar (i), el acceso a la información está restringido para la ciudadanía en general, porque el lenguaje utilizado es altamente científico y su acceso no siempre es fácil. En segundo lugar (ii), la tecnología para medir la calidad del aire está, por regla general, por fuera del alcance ciudadano, lo que lo aleja más de poder comprender el fenómeno de la polución y su gestión. (iii) Sin información, la ciudadanía no puede comprender los problemas sobre la calidad del aire ni participar para solucionarlos. Así, (iv) sin que la ciudadanía participe, las políticas públicas no avanzan. Más aun, (v) sin mecanismos de acceso administrativos y judiciales apropiados para enfrentar las causas de la vulneración de derechos, los ciudadanos se encuentran inermes ante la inacción o acción negativa del Estado. Por último (vi), si el Estado no actúa, incumple compromisos internacionales en materia de derechos humanos y medio ambiente, y desconoce sus fines esenciales.

Al respecto, desde hace algunos años diversos grupos de ciudadanos han empezado a interesarse por producir ciencia para mejorar sus condiciones de vida. Desde diferentes ámbitos, como la observación de especies, los monitoreos comunitarios de agua, la recuperación de humedales,

la supervisión de pesticidas¹⁶, entre otros, la ciudadanía ha empezado a diseñar metodologías para recopilar información, identificar problemáticas y buscar soluciones.

Esto es lo que se conoce como *ciencia ciudadana*, que no es más que un tipo de producción científica basada en la participación de las personas, según la cual se presupone que cualquiera pueda aportar para conseguir resultados científicos de utilidad social. La participación de la sociedad civil en la recolección, la verificación, el análisis, el intercambio y la difusión de datos a partir del uso de herramientas tecnológicas de fácil acceso busca aportar a la teorización, pero también quiere influir en la determinación de políticas públicas (Finquelievich & Fischnaller, 2014, p. 12). La ciencia ciudadana es, además, una expresión del *derecho humano a la ciencia*¹⁷, que busca la democratización del conocimiento científico y tecnológico. Su promoción, entonces, impulsa la realización de varios derechos para el fortalecimiento del Estado.

Al respecto, también Marcos Orellana —Relator Especial sobre las implicaciones para los derechos humanos de la gestión y eliminación ambientalmente racionales de las sustancias y los desechos peligrosos— presentó su informe “El derecho a la ciencia en el contexto de las sustancias tóxicas” (A/HRC/48/61). Allí muestra la relevancia de la ciencia para adoptar mejores medidas enfocadas en evitar las consecuencias de la exposición a sustancias peligrosas. Entre otras cosas, el relator señala que los gobiernos deben apoyar la investigación científica mediante la generación y difusión de conocimientos científicos.

Para esto, la accesibilidad, inteligibilidad y práctica del conocimiento científico permiten fortalecer a la sociedad civil en el ejercicio de su derecho a participar en los asuntos públicos. De este modo, los proyectos de ciencia ciudadana generan oportunidades para que los ciudadanos recopilen datos, contribuyan a su interpretación y análisis, y colaboren

16 Ejemplo de esto es la Red de Acción en Plaguicidas de Asia y el Pacífico, que sigue y registra los efectos del uso de plaguicidas. En Bogotá se encuentra la Red de Humedales, que monitorea su estado.

17 Así lo reconocen la Declaración Universal de los Derechos Humanos (1948), el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (1966), la Declaración Americana de Derechos y Deberes del Hombre (1948) y el Protocolo de San Salvador sobre Derechos Económicos Sociales y Culturales (DESC) (1988), entre otros. Para más información, ver Comentario General n.º 25 sobre ciencia y DESC (doc. ONU E/C.12/GC/25).

en la difusión de información científica; todo esto siempre dentro de parámetros metodológicos y protocolos científicos que garanticen la confiabilidad de dicha información. Este tipo de vinculación robustece la autonomía de las comunidades para actuar y garantiza que los beneficios de la ciencia sirvan a las personas que la necesitan.

En Bogotá específicamente, una de las ciudades con mayor contaminación del aire, se han desarrollado diferentes proyectos de ciencia ciudadana para la medición de la calidad del aire. Los más destacados han sido las redes Unloquer, AireCiudadano, CanarIO y, recientemente, la Red de Cuidadores del Aire de Puente Aranda. Todos son proyectos ciudadanos para medir la calidad del aire que utilizan plataformas de datos abiertos y sensores de bajo costo.

2. CALIDAD DEL AIRE EN BOGOTÁ: DESARROLLO TERRITORIAL, NORMAS E INSTITUCIONES

Para situar el problema de la polución en la capital del país, así como el estudio que se presentará en la próxima sección, es importante conocer de dónde viene la contaminación del aire que hay en la ciudad. Para empezar, existen factores socioambientales como el ordenamiento territorial, el estado de la infraestructura urbana (malla vial), el clima y los vientos, el parque automotor (quema de combustibles fósiles) e, incluso, la arborización. Las relaciones entre las condiciones geográficas, meteorológicas y climáticas, en conjunto con las particularidades de la sociedad bogotana, construyeron un tipo de atmósfera contaminada (Ángel Macías, 2020, p. 11).

El sistema normativo de gestión y control público sobre la calidad del aire contiene las decisiones del Estado que se han venido construyendo conforme la sociedad, la ciencia y la tecnología han identificado que tiene problemas. En ese sentido, la interacción entre esos factores socioambientales determinantes y el marco normativo para su manejo nos brinda un panorama general sobre el alcance de la gestión pública actual en la materia, así como sobre los espacios que tiene la ciudadanía para incidir efectivamente en las decisiones. Sobre estos temas versará esta sección.

Causas de la polución en Bogotá D.C.

Uno de los factores más importantes que ha permitido y mantenido la contaminación atmosférica en Bogotá es su proceso histórico de ordenamiento del territorio. Tal vez el autor colombiano que más ha profundizado en esta relación es Mauricio Ángel Macías (2020), quien en su tesis doctoral describe cómo han cambiado los patrones alrededor de los cuales se construyó la ciudad. Estos incluyen las migraciones provenientes del campo colombiano y una distribución espacial definida por relaciones

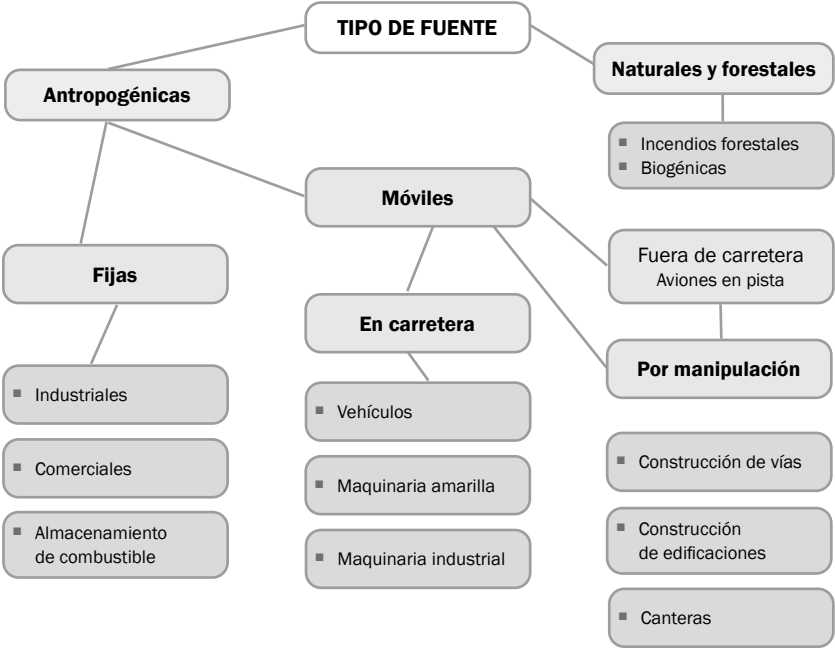
de poder, según la cual los obreros se ubicaron en el sur y el occidente, mientras que las personas con mayores ingresos se establecieron en el nororiente¹. Esta decisión se debió principalmente a razones de seguridad y disfrute de “las mejores características ambientales del territorio”.

Igualmente, el autor resalta que la calidad del aire no fue objeto de atención del Estado durante el proceso de construcción y consolidación de la Bogotá que hoy conocemos, pues no era entonces un factor que pareciera amenazar la salud de los bogotanos. Sin embargo, con el aumento de la población crecieron las presiones del transporte urbano y de sus correspondientes vías (Ángel Macías, 2020, p. 128). Así, si bien Bogotá contó con un sistema de buses *trolly* y tranvía, estos resultaron insuficientes por sus rutas fijas y así se definió el modelo que actualmente conocemos. En consecuencia, las *fuentes móviles*, como los automotores, han sido —y continúan siendo— los mayores generadores de emisiones de la ciudad. Por su parte, las *fuentes fijas*, como las industrias, si bien han incidido en la contaminación atmosférica (Ángel Macías, 2020, p. 200), son menos representativas.

Estas fuentes de emisión tienen diferentes grados de impacto en la calidad del aire de la capital bogotana. Por ejemplo, si bien las fuentes móviles *en carretera* (figura 1) representan 2090 toneladas de material particulado en un año, las vías no pavimentadas emiten un total de 51 652 PM10 y 5341 PM2.5 en el mismo período. Por su parte, las emisiones de CO (monóxido de carbono), uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI), producidas por este tipo de fuentes representaron 393 953 toneladas en el año 2018 (SDA, 2020, p. 9). Como se puede observar, la

1 “Con base en teorías higienistas y posteriormente sanitarias de influencia anglosajona, orientadas hacia la limpieza y el saneamiento de los espacios, los focos pestilentes se eliminaron para dar paso a espacios de habitación dignos, limpios y con acceso a servicios que permitieran condiciones de vida adecuadas para los obreros y más necesitados. Estos renovados espacios se localizaron especialmente hacia el sur y occidente de la ciudad, en lugares antes anegados y con peligros ecosistémicos probados. Mientras tanto, los habitantes más ricos, disfrutaban de las mejores características ambientales del territorio, en el nororiente, estableciendo desde entonces un patrón diferencial de exposición a riesgos que corresponderían, con el tiempo, con las malas condiciones del aire bogotano. Y es que a pesar de la movilidad que se le atribuye, y de la imposibilidad de contenerla con barreras físicas, la atmósfera de Bogotá construyó un patrón de distribución relacionado con la estructura urbana producida en relaciones de poder que conformaron cada área del territorio construido” (Macías Ángel, 2020, p. 198).

FIGURA 1.
Esquema de las fuentes de emisión para Bogotá



FUENTE: elaboración propia con base en SDA (2020).

contaminación del aire no se distribuye, concentra o produce de la misma manera, razón por la cual las normas deben ajustarse a estas diferencias en términos de sustancias, efectos y fuentes.

La ubicación geográfica de la capital también incide en que la calidad del aire varíe. Ángel Macías enfatiza en que las condiciones de altura bogotanas hacen difícil la respiración². Este es un factor que debería ser tenido en cuenta a la hora de tomar decisiones sobre las *concentraciones máximas permitidas*, es decir, aquellas que la autoridad pública considera seguras para la exposición humana³.

2 “El aire, en estas condiciones de altura, se hace difícil de respirar por las menores presiones barométricas, de hasta 560 milímetros de mercurio (mm/Hg) —760 a nivel del mar— las cuales hacen que disminuya la presión parcial de oxígeno de 117,6 mm/Hg por cada m3 de aire —159,6 a nivel del mar—” (Ángel Macías, 2020, p. 44).

3 En Bogotá, las concentraciones permitidas en las normas de calidad del aire deberían disminuir entre un 30 % y 40 % para ajustarse a los patrones fisiológicos de adaptación a la altura y así disminuir el riesgo a la salud humana (Bravo Álvarez et al., 2013; Pérez, 2017).

Otro factor relevante es que la cantidad de material resuspendido en la atmósfera está determinado por el clima de la ciudad. La *inversión térmica*, que en Bogotá se da en épocas secas, consiste en que la temperatura del aire aumenta con la altura; esto genera un confinamiento de las capas de aire, por lo cual no se presenta una dispersión de los contaminantes, sino que se concentra una capa de contaminación intermedia entre el aire caliente de arriba y el frío de abajo (Velásquez Salamanca, 2016, p. 9). Según Ángel, este fenómeno se ha intensificado por el efecto de *isla de calor*⁴, que a su vez es acentuado por el tipo de suelo urbano, transformado con cemento y asfalto. Esto incide en que el material particulado se concentre en cantidades por encima de los límites que las autoridades consideran permisibles (Ángel Macías, 2020, p. 47).

También inciden el sistema de vientos alisios, que limpia el aire hacia el occidente, y las lluvias, que se llevan consigo los contaminantes resuspendidos en la atmósfera. Sin embargo, los vientos también pueden venir cargados de material particulado, como sucede cuando hay incendios en la Amazonía⁵, o traen arenas del Sahara⁶.

El suroccidente de la ciudad, por las razones climáticas ya mencionadas y motivos de desarrollo urbano (centrales de abastos a las que llega la mayor cantidad de carga a la ciudad, concentración de vehículos con tecnologías más deficientes, etc.), es donde se concentra la peor calidad del aire durante todo el año (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021, p. 30). Como se vio, las relaciones de poder presentes en el ordenamiento del territorio han incidido en que sea una de las zonas de la ciudad con mayor desigualdad, pero también allí hay un precario desarrollo

4 El fenómeno de variación de islas de calor es un efecto de calentamiento en zonas de la ciudad, por lo general aquellas con altas densidades de edificaciones. Este produce una acumulación espacial de temperatura alrededor de las construcciones, que aumenta la temperatura en aquellos lugares (Salas Pérez & Coy Castro, 2019, p. 3).

5 Ver: Medina, 2019.

6 Ver: “Polvo del desierto del Sahara”, 2020.

de infraestructura y espacios públicos, como pavimentación de vías⁷ y arborización⁸.

Desde hace poco más de una década, los gobiernos han empezado a corregir los errores que han derivado en la contaminación atmosférica de la ciudad. Por ejemplo, el más reciente Plan de Ordenamiento Territorial (POT) (Decreto 555, 2021) tiene entre sus propuestas la creación de las Zonas Urbanas por un Mejor Aire (ZUMA), una estrategia que busca mejorar la calidad de vida de las personas afectadas por la relación entre contaminación y vulnerabilidad socioeconómica.

Además, el aire se incorporó como un asunto relativo en la planeación de la ciudad, particularmente como un principio rector del ordenamiento. Es además considerado

(1) uno de los once lineamientos para las intervenciones del espacio público para la movilidad, eje esencial en la estructura funcional y del cuidado; y (2) como determinante para las estrategias de intervención y transformación territorial tales como Barrios Vitales, Bogotá a Cielo Abierto, Corredores Verdes, Eco-barrios, entre otros (SDA, s. f.-a).

La administración distrital ha elaborado otros instrumentos para mejorar la calidad del aire. Además, cuenta con un marco normativo robusto para avanzar en el diseño y la ejecución de medidas adecuadas.

7 Ver: Puentes, A. (2021, 21 de noviembre). Pavimentar vías sería clave para mejorar la calidad del aire de Bogotá. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/bogota/como-mejorar-la-calidad-del-aire-en-el-suroccidente-de-bogota-633529>. Es importante mencionar que las emisiones de material particulado (PM10) por causa de la deficiente o inexistente pavimentación equivalen a 51 562 toneladas/año. Las localidades que presentan la mayor concentración de material resuspendido por esta razón son Kennedy, Bosa, Ciudad Bolívar, Suba, Engativá y Fontibón; son las tres primeras (zona suroccidental) las que soportan la mayor cantidad de vías sin pavimentar (SDA, 2020, p. 66).

8 Al respecto, la OMS (2016, p. 8) señala que entre los beneficios de las áreas verdes urbanas están los impactos indirectos a la salud pública, los cuales se producen gracias a las capacidades de captura de carbono y al humedecimiento de la polución producida por la vegetación.

Normas y políticas públicas que determinan la calidad del aire en Bogotá D.C.

Normas internacionales

Un problema de salud pública tan complejo requiere soluciones estructurales. Las actividades que son fuente de contaminación deben ser reguladas para eliminar o disminuir los impactos, de tal manera que no constituyan un riesgo para la población. Las normas y políticas que se han adoptado en el país partieron de considerar al aire como elemento del medio ambiente, pero cada vez más su manejo se ha acercado a la atención de preocupaciones por la salud y vida digna de los ciudadanos. Esta tendencia ha sido reiterada por la OMS en sus recomendaciones y guías.

Además de estas guías, otros organismos de carácter internacional han empezado a llamar la atención sobre las problemáticas que representan la calidad del aire y el ambiente sano en general. Documentos como la Observación General n.º 14 del Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (sobre *El derecho al disfrute más alto de nivel posible de salud*) y la Opinión Consultiva 23/17 de la Corte IDH (*Sobre las obligaciones en materia ambiental de los Estados*), junto a otra serie de documentos y comunicaciones de quienes hacen parte del sistema internacional, demuestran estas preocupaciones para la agenda internacional.

La mencionada observación del Comité DESC (2000) afirma que “todo ser humano tiene derecho al disfrute del más alto nivel posible de salud que le permita vivir dignamente” (párr. 1). Por eso, los Estados deben formular y aplicar políticas nacionales para reducir y suprimir la contaminación del aire, entre otras acciones. Igualmente, dicha observación señala que los Estados tienen la obligación de proteger a las personas. Si estos no adoptan todas las medidas necesarias para evitar las violaciones del derecho a la salud por terceros, estarían incumpliendo sus compromisos internacionales. Esto ocurre cuando el Estado no promulga o hace cumplir las leyes para impedir la contaminación del aire.

Por su parte, la opinión consultiva de la Corte IDH define las obligaciones de los Estados en relación con el medio ambiente en el marco de la protección y garantía de los derechos a la vida y a la integridad personal. Entre otras cosas, este pronunciamiento señala que los daños ambientales pueden afectar todos los derechos humanos, ya que el pleno disfrute depende de un medio propicio. Sin embargo, algunos derechos humanos son más susceptibles que otros. Estos se pueden clasificar en dos

grupos: (i) los derechos sustantivos (por ejemplo, los derechos a la vida, a la integridad personal, a la salud o a la propiedad) y (ii) los derechos de procedimiento, como derechos a la libertad de expresión y asociación, a la información, a la participación en la toma de decisiones y a un recurso efectivo. Además, la Corte toma en cuenta que la afectación a estos derechos puede darse con mayor intensidad en determinados grupos que están en situación de vulnerabilidad.

Específicamente, la Corte IDH afirma que los Estados tienen obligaciones derivadas de los deberes de *respetar y garantizar* los derechos a la vida y a la integridad personal, en el contexto de la protección del medio ambiente. En ese sentido:

los Estados deben abstenerse de (i) cualquier práctica o actividad que deniegue o restrinja el acceso, en condiciones de igualdad, a los requisitos para una vida digna, como lo son, el agua y la alimentación adecuada, entre otros, y de (ii) contaminar ilícitamente el medio ambiente de forma que se afecte las condiciones que permiten la vida digna de las personas (Medio Ambiente y Derechos Humanos, OC-23/2017).

La segunda obligación de los Estados es la de *garantía*, que implica adoptar todas las medidas apropiadas para proteger y preservar los derechos a la vida y a la integridad. Este es esencialmente un deber de prevención, y abarca todas aquellas medidas de carácter jurídico, político, administrativo y cultural para el cuidado de los derechos humanos.

Finalmente, en relación con las obligaciones frente a posibles daños al medio ambiente que afecten los derechos a la vida y a la integridad personal, las dimensiones de *respetar y garantizar* implican que los Estados están obligados a cumplir con las obligaciones adquiridas bajo la Convención Americana con debida diligencia o cuidado. A su vez, esto entraña las siguientes obligaciones:

(A) la obligación de prevención; (B) el principio de precaución; (C) la obligación de cooperación, y (D) las obligaciones procedimentales en materia de protección del medio ambiente, con el propósito de establecer y determinar las obligaciones estatales derivados de la interpretación sistemática de dichas normas junto con las obligaciones de respetar y garantizar los derechos a la vida e integridad personal consagrados en la Convención Americana (Convención Americana sobre Derechos Humanos, 1969).

Normas nacionales

En lo que respecta a la normatividad nacional, también han existido una serie de avances significativos⁹. Estos comienzan con la expedición del Decreto 948 de 1995 (Por el cual se reglamenta la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire) y van hasta una de las leyes más recientes sobre este tema, la Ley 1712 de 2014 (Por la cual se establece la protección de derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes).

Siguiendo esta misma línea, la formulación de políticas como la Política de prevención y control de la contaminación del aire (2010) y la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (2019) evidencia la preocupación existente en torno a dicho asunto. A su vez, la evolución de estos documentos refleja una respuesta a esta problemática cada vez más urgente, tanto por el aumento en la certeza sobre los efectos negativos de la contaminación atmosférica como por la implementación de un enfoque interinstitucional que permita coordinar el actuar de diversas autoridades. Sin embargo, hay otros puntos débiles en torno a la capacidad de participación de la ciudadanía y a las herramientas de información efectiva sobre estos temas.

Normas distritales

Desde el ámbito local, la normatividad distrital también contiene una serie de particularidades que responden a cómo se ha abordado esta problemática en Bogotá. Una de las resoluciones distritales más importante es aquella emitida por las secretarías de Ambiente y Salud para adoptar el Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA). Las actuales estrategias del gobierno local han buscado revertir los efectos nocivos que ha tenido el ordenamiento de la ciudad en torno a la emisión de contaminantes. En este sentido, las entidades distritales se han enfocado en la promulgación de instrumentos como el anterior Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá 2010-2020 y el actual Plan Aire 2030.

También, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), una entidad nacional cuyas acciones se pueden ver reflejadas en el ámbito municipal, adoptó un plan de acción local para mejorar la calidad

9 Ver el anexo de la página 131 (Recopilación de normas y políticas sobre la calidad del aire).

del aire en Ciudad Bolívar (5 de marzo de 2022). Este es un proyecto piloto ubicado en el sector del Parque Minero Industrial El Mochuelo que busca guiar la realización de planes de acción locales para mejorar la calidad del aire¹⁰. Debe tenerse en cuenta que, por su jurisdicción, la CAR se limita a ejercer funciones en el suelo rural de Bogotá.

Como puede observarse, existe una profusa reglamentación general y específica sobre este problema. Sin embargo, las limitaciones tecnológicas restringen el análisis del impacto que tiene la polución en los derechos de los individuos, lo que hace que la planeación de la calidad del aire sea un tema importante pero no urgente. Ejemplo de ello es la norma nacional que determina las concentraciones máximas de contaminantes permitidas, la cual está muy lejos de alcanzar los estándares de concentración de contaminantes señalados por la OMS en sus guías, como se puede observar en la tabla siguiente.

TABLA 1.
Comparativo de concentraciones máximas establecidas para material particulado (PM) y dióxido de nitrógeno (NO₂) por la OMS (2021) y por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017)

Contaminante	Escala temporal	Guías OMS 2005	Guías OMS 2021	Resolución 2254 de 2017	Resolución 2254 en 2030
PM2.5	Anual	10 ug/m3	5 ug/m3	25 ug/m3	15 ug/m3
PM2.5	Diario	25 ug/m3	15 ug/m3	37 ug/m3	37 ug/m3
PM10	Anual	20 ug/m3	15 ug/m3	50 ug/m3	30ug/m3
PM10	Diario	50 ug/m3	45 ug/m3	75 ug/m3	75 ug/m3
NO2	Anual	40 ug/m3	10 ug/m3	60 ug/m3	40 ug/m3
NO2	Diario	-	25 ug/m3	(1h-200 ug/m3)	(1h-200 ug/m3)

FUENTE: Fajardo Montaña, 2021.

En la actualidad, pese a los avances en la reducción de carga contaminante del aire, no se han alcanzado los niveles de seguridad en salud pública definidos por la OMS. Para mencionar un ejemplo, el contaminante PM2.5, que es el de mayor incidencia en la salud de la ciudadanía bogotana, muestra una concentración superior a dichas recomendaciones en todas las estaciones de medición oficiales (Alcaldía Mayor de Bogotá,

10 Se basa en el documento PAMCA-Local realizado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

2020, p. 340). Incluso, los datos de estaciones de monitoreo como Carvajal-Sevillana, Kennedy, Puente Aranda y Tunal —las zonas de mayor pobreza multidimensional ubicadas en el suroccidente (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021, p. 30)— superan con mucha frecuencia los límites de la Resolución 2254.

Estas decisiones sobre límites permisibles pueden ser problemáticas no solo por la exposición de las personas, sino también por la responsabilidad del Estado en el manejo de la problemática de calidad del aire. La Sentencia T-614 de 2019 ya mencionada ordena cumplir con los lineamientos de la OMS, razón por la cual la empresa minera debe “controlar que sus emisiones de material particulado no lleguen a niveles de concentración que afecten la calidad de aire en el resguardo de Provincial”. En criterio de la Corte Constitucional, esos niveles guía mitigan el riesgo de manera significativa, y gracias a eso se reducen las probabilidades de adquirir enfermedades asociadas a la contaminación por material resuspendido.

De hecho, la Corte ha manifestado su preocupación ante la tendencia de considerar como daños ambientales aquellos relacionados con que se superen los límites de concentración de contaminantes permitidos. Al respecto manifiesta que el control ambiental “no puede reducirse a la verificación matemática del cumplimiento de unos valores límite; menos aún, puede afirmarse que, si se acreditan estos parámetros, no se han ocasionado daños ambientales, como si se tratase de una especie de ‘dictamen pericial anticipado’” (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-614, 2019).

No obstante, la reducción de la contaminación implica internalizar o eliminar la contaminación. Esto suele requerir cambios estructurales y tecnológicos que resultan costosos no solo para el Estado, sino también para la ciudadanía. Así las cosas, se podría ajustar la norma colombiana de calidad del aire junto con planes de corto y mediano plazo enfocados en alcanzar rápidamente los estándares propuestos. Esto involucra diversos sectores, como planeación, comercio, minas y energía, transporte, salud y ambiente, entre otros.

De otra parte, si bien los Estados son autónomos en sus decisiones, es importante tener en cuenta los compromisos internacionales adquiridos. Estos obligan al país a adoptar las medidas preventivas necesarias para evitar daños en la salud y la integridad personal, tal y como lo describió la Corte IDH en su OC-23/17 ya mencionada. Sobre este asunto, hace poco inició el estudio de uno de los más recientes casos admitidos —pero no resuelto aún— en la Corte IDH sobre las consecuencias de la

contaminación en la comunidad de La Oroya (Perú), por causa de un complejo metalúrgico que generaba altos contenidos de plomo, cobre, zinc, plata, oro y otras sustancias. Lo más importante en dicho caso es que se está considerando la responsabilidad del Estado peruano. En esta ocasión Perú no justificó las razones por las cuales el país mantuvo límites permisibles tan favorables para la empresa por tanto tiempo, cuando la OMS ya había fijado como parámetro guía un límite inferior al 10 % de lo fijado por las normas ambientales de dicha nación.

En consecuencia, la Comisión Interamericana de Derechos Humanos presentó el caso ante la Corte IDH, por considerar que el Estado peruano incumplió sus obligaciones relativas a la protección del derecho a un medio ambiente sano y la salud. Esto se debe a que existe una relación causal entre la fijación de los límites permisibles para determinadas sustancias y los niveles que son aceptables para el ambiente y la salud humana.

Cabe señalar que el hecho de que las guías no sean obligatorias no quiere decir que no deban ser una meta urgente a la que el Estado colombiano deba apuntar, particularmente en un contexto de cambio climático y de pandemia asociada a infecciones en las vías respiratorias. De hecho, la ausencia de participación del sector salud en la definición de estos estándares —si se tiene en cuenta que la regulación surge únicamente del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible— da cuenta de un problema estructural: la gestión ambiental deja de lado el impacto que tiene la contaminación en la vida de las personas y, en consecuencia, en sus derechos fundamentales.

Instituciones que controlan y vigilan

La gestión de la calidad del aire en Bogotá, pese a concentrarse en el sector ambiental, requiere una gran coordinación con otras autoridades públicas en sectores como salud, transporte y movilidad, gestión del riesgo, planeación y desarrollo urbano, entre otras. Para comprender el entramado de actores públicos, a continuación se describen las principales normas y competencias de instituciones públicas en materia de contaminación atmosférica.

Sector ambiente

Según el Decreto Ley 2811 de 1974 (art. 8, l. a), la contaminación del aire es una de las causas del deterioro del medioambiente. Esta es una de las premisas generales que justifica la intervención del sector ambiental

como el primer llamado a actuar ante dicho problema. Por este motivo, la Ley 99 de 1993 (art. 5, n. 10, 11 y 14) faculta al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) para establecer las normas y regulaciones ambientales mínimas a las que deben ajustarse los centros urbanos, así como todas aquellas que buscan controlar la contaminación y definir y regular los instrumentos y mecanismos necesarios para prevenir el deterioro ambiental. Además, la norma reglamentaria del sector ambiente (Decreto Ley 1076 de 2015, art. 2.2.5.1.6.1.) le otorga competencia específica al MADS para establecer la norma técnica de calidad del aire (o inmisión) y todo aquello relacionado con la prevención y el control en la materia.

Las corporaciones autónomas regionales, de desarrollo sostenible y grandes centros urbanos, al ser autoridades ambientales, también tienen competencias en la prevención y el control de la calidad del aire. El mencionado Decreto 1076 establece que estas autoridades tienen a su cargo otorgar permisos; declarar niveles de alerta y adoptar medidas para conjurar emergencia; realizar mediciones, planes y programas de prevención, control y mitigación; así como imponer medidas preventivas, entre otras funciones relacionadas (art. 2.2.5.1.6.2.).

Además, según el artículo 66 de la Ley 99 de 1993,

los municipios, distritos o áreas metropolitanas cuya población urbana fuere igual o superior a un millón de habitantes (1.000.000) ejercerán dentro del perímetro urbano las mismas funciones atribuidas a las Corporaciones Autónomas Regionales, en lo que fuere aplicable al medio ambiente urbano.

Por esto, Bogotá cuenta con la Secretaría Distrital de Ambiente, que no solo cumple un rol como secretaria de la Alcaldía Mayor, sino que es la autoridad ambiental dentro del perímetro de la ciudad. Respecto al suelo rural, este es competencia de la CAR.

Por último, es importante tener en cuenta que el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) se encarga de hacer la revisión y el seguimiento a las entidades que realicen la medición de contaminantes generadas por fuentes móviles. Igualmente, esta entidad establece el procedimiento de autorización y seguimiento al proceso de medición (resoluciones 2509 de 2010, 2488 de 2010 y 0946 de 2011, y *Protocolo de revisión y seguimiento autoridades ambientales del proceso de medición de emisiones generadas por fuentes móviles organismos de evaluación de la conformidad* de 2019 del IDEAM). Además, realiza informes sobre el

estado de la calidad del aire en el país; el más reciente fue el *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia* emitido en 2019.

Sector salud

El sector salud es esencial en la construcción de una gestión integral de la calidad del aire. Sin embargo, pese a la importancia de su rol, no es tan protagonista como se requiere. De hecho, en el CONPES 3550 de 2008 —que daba lugar a una política pública integral en salud ambiental— era notoria la necesidad de articular efectivamente a las diferentes autoridades públicas que tenían incidencia en los problemas de agua, aire y saneamiento, entre otros, pero que por razón del diseño institucional no trabajaban de la mano (p. 20).

Las políticas públicas de salud deben ser integrales en su formulación, esto implica que deben tener la capacidad de atender factores del entorno que también inciden sobre la salud de las personas. A estos factores se les ha denominado “determinantes sociales de salud”¹¹, y es deber del Estado establecer medidas para reducir las desigualdades, pues suponen una sobrecarga en materia de salud pública para ciertos grupos poblacionales (Ley 1751 de 2015, art. 9).

Una de las autoridades responsables de reducir las cargas desiguales sobre los determinantes sociales de salud es la Subdirección de Salud Ambiental del Ministerio de Salud y Protección Social. Así mismo, es deber de cada dirección territorial de salud reportar sus avances en materia de calidad del aire y salud. Sin embargo, estas dependencias carecen de competencias en la vigilancia de la calidad del aire.

En el CONPES 3943 de 2018 sobre calidad del aire, el enfoque de salud pública desapareció casi por completo; la incidencia de la polución en la salud de las personas está vinculada al éxito de estrategias de descontaminación del aire, que son diseñadas para cubrir grandes áreas. Mientras tanto, la exposición local tiene efectos graves en la salud respiratoria de las personas, y no se han desarrollado lineamientos de política pública para el diagnóstico y la prevención de la contaminación concentrada del aire, así como de sus efectos en la salud.

11 “Aquellos factores que determinan la aparición de la enfermedad, tales como los sociales, económicos, culturales, nutricionales, ambientales, ocupacionales, habitacionales, de educación y de acceso a los servicios públicos”. (Ley 1751 de 2015, art. 9, par.).

Así, actualmente la calidad del aire sigue siendo un asunto liderado por el sector ambiental, mientras que el de salud se limita a recopilar información sobre morbilidad y mortalidad relacionada. No obstante, la política pública y las soluciones integrales requieren el trabajo articulado de los sectores involucrados en esta problemática, en especial cuando los derechos fundamentales de la ciudadanía están bajo amenaza.

Por otra parte, el Instituto Nacional de Salud (INS) es la autoridad científico-técnica del sector. Esta tiene dentro de sus funciones desarrollar y gestionar conocimiento científico; realizar investigación científica básica y aplicada; así como operar y desarrollar el sistema de vigilancia y control en salud pública, entre otras (Decreto Ley 4109 de 2011). A través de su Observatorio Nacional de Salud, esta entidad recoge y analiza información sobre asuntos de salud pública, como la mala calidad del aire.

Uno de los informes más destacables realizados por este Observatorio es *Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia* (2018), en el que se concluye que se le puede atribuir a la exposición a la mala calidad del aire (así como a la causa de enfermedad general) gran parte de las muertes por enfermedad isquémica del corazón, el accidente cerebro vascular, la enfermedad pulmonar obstructiva (EPOC), las infecciones respiratorias agudas y las cataratas (p. 97).

En la ciudad de Bogotá, la Secretaría Distrital de Salud (SDS) es la principal autoridad ambiental del municipio. Su objetivo es orientar y liderar la formulación, adaptación, adopción e implementación de políticas, planes, programas, proyectos y estrategias dirigidas a garantizar el derecho a la salud de los habitantes del Distrito Capital; así, realiza las funciones de inspección, vigilancia y control en salud pública, entre otras. Sus competencias fueron establecidas en la Ley 715 de 2001 (artículos 44 y 76) y son vigilar la calidad del aire en coordinación con las autoridades para la preservación de la salud pública y tomar las medidas necesarias para el control, la preservación y la defensa del ambiente.

También es necesario señalar que la SDS financia o cofinancia proyectos de interés local en materia ambiental, con la finalidad de promover programas que mantengan el ambiente sano. Actualmente existe el programa Bogotá Vital es Salud Urbana, una estrategia que busca reducir los riesgos de afecciones crónicas para los ciudadanos a través de la prevención, con el objetivo de mejorar la salud cardiovascular y respiratoria de la población.

A raíz de los trabajos conjuntos entre los sectores ambiente y salud se emitió la Resolución 868 de 2021 de las dos secretarías. Dicho acto

administrativo busca fortalecer la divulgación de las recomendaciones que se emiten con relación al IBOCA, considerando el impacto que este tiene en la salud la polución, o a otras sustancias contaminantes que requieren de medición constante.

Sector movilidad y transporte

En consonancia con lo dispuesto en el CONPES 3943, dicho sector se ha concentrado en introducir tecnologías vehiculares de cero y bajas emisiones; adoptar una estrategia nacional para la renovación y modernización del parque automotor (CONPES 3963 de 2019); revisar y actualizar los métodos de medición de emisiones contaminantes en vehículos; reducir la tasa de evasión de la revisión técnico mecánica y de emisiones contaminantes; y buscar la reducción de emisiones contaminantes en el sector transporte, priorizando las motocicletas y los vehículos con motor diésel.

A nivel municipal, la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM), en coordinación con la SDA, ha trabajado para reducir las emisiones contaminantes que afectan la calidad del aire, como el material particulado y los gases de efecto invernadero. Para esto, se ha propuesto aumentar a 6500 los vehículos de cero y bajas emisiones en el parque automotor de Bogotá, incluyendo la implementación de 20 puntos públicos de carga rápida y la reducción del 10 % de la concentración promedio de PM10 y PM2.5. También, se ha concentrado en transformar las dinámicas de viajes y fomentar caminatas, movilidad en bicicleta, micromovilidad y transporte masivo limpio, entre otras (SDM, 2020). Sin embargo, este sector no cuenta con estrategias localizadas para aquellas vías que por la carga vehicular mantienen niveles muy elevados de material particulado. Como se verá más adelante, esta ausencia afecta determinadamente a la ciudadanía.

Sector planeación y desarrollo urbano

En general, otras entidades del Distrito Capital tienen incidencia en la gestión de la calidad del aire. Por ejemplo, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y la Unidad de Mantenimiento Vial (UMV) tienen competencias en la mejora de la malla vial. También, el Jardín Botánico de Bogotá tiene a su cargo la arborización de la ciudad, la cual ayuda a mitigar el impacto de la contaminación, especialmente respecto al material particulado resuspendido.

Sector minas y energía

Los combustibles utilizados en el transporte han requerido una continua mejora de su calidad, lo que ha incidido en la reducción de material

particulado. Para esto, los ministerios de Minas y Energía y de Ambiente y Desarrollo Sostenible expedieron la Resolución 40103 de 2021.

Sin embargo, la quema de combustibles fósiles (gasolina, diésel y gas) debe ser reemplazada por energías limpias, un proceso que ha sido liderado este sector a través de apuestas como energía eólica y solar. Por supuesto, aún falta un largo recorrido para la transformación de la matriz energética del país. De todas formas, el impulso que le ha dado la Alcaldía Mayor a la transformación de la flota de buses públicos en eléctricos y los planes para un transporte más sostenible son el inicio de un camino prometedor.

Sector gestión del riesgo

En materia de calidad del aire, la gestión de los riesgos por contaminación en Bogotá y el país está asociada al control de eventos críticos (Decreto Ley 1076 de 15, art. 2.2.5.1.9.1); es decir, el manejo que se realiza cuando el daño ya se produjo y la población en general está en riesgo. En el diagnóstico de la Política nacional para el mejoramiento de la calidad del aire (CONPES 3943 de 2018) se reconoce que hay una baja gestión del riesgo por contaminación del aire en el país. Básicamente, solo Bogotá y Medellín cuentan con planes para la atención de episodios críticos.

En la capital, este plan nace del Sistema de Alertas Tempranas Ambientales de Bogotá (SATAB), adoptado mediante el Decreto 595 de 2015. Por un lado, el IBOCA sirve como criterio para definir los estados de prevención, alerta o emergencia, en el marco del Sistema Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático de Bogotá para la atención de eventos críticos. Este sistema, regulado principalmente por el Acuerdo Distrital 546 de 2013, se estableció para articular las políticas, las estructuras, los recursos, los procesos y los procedimientos del Estado y de la ciudadanía, con el fin de generar sinergia en los procesos que integran la gestión de riesgos y cambio climático de Bogotá.

En específico, la ciudad cuenta con el Sistema de Alertas Tempranas Ambientales de Bogotá para su componente aire, SATAB-aire (artículo 3 del Decreto Distrital 595 de 2015). Este busca recolectar, procesar y utilizar la información sobre el riesgo por contaminación atmosférica en Bogotá para definir acciones y protocolos de actuación ante alertas y de respuesta ante emergencias.

Sistemas oficiales de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire en Bogotá D.C.

La tecnología y la ciencia juegan un papel determinante en la evaluación y el control de la calidad del aire. De hecho, los datos de las redes de monitoreo son el eje central de las discusiones sobre contaminación atmosférica. En Bogotá, esta tarea se realiza por medio de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), que alimenta el Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA) y el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE), administrado por el IDEAM.

Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (rmcab)

Esta red hace seguimiento a la concentración de contaminantes que se presentan en el aire de Bogotá (como material particulado de 2.5 y 10 micras, entre otros) (SDA, 2020). Se integra por estaciones de monitoreo, las cuales recolectan datos para ser analizados por especialistas y así poder evaluar los niveles de exposición de la ciudadanía en ciertas zonas de la ciudad. La red está integrada por 20 estaciones oficiales utilizadas para analizar el comportamiento de las concentraciones de material particulado (PM10, partículas suspendidas totales [PST], PM2.5) y de gases contaminantes (dióxido de azufre [SO₂], dióxido de nitrógeno [NO₂], monóxido de carbono [CO], ozono [O₃]). Además, se usan para analizar variables meteorológicas de precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar, humedad relativa y presión barométrica (Resolución 2410 de 2015).

Las concentraciones de contaminantes se miden, en general, por promedios de horas (1, 8, 24) y años. Si las mediciones superan los valores permitidos por la Resolución 2254 de 2017 del MADs, llamadas *excedencias*, estas son vigiladas con más detenimiento cuando se presentan de manera continua. Esto se hace con el fin de establecer su comportamiento —cuánto tiempo duran y con qué frecuencia se presentan— pues estos son los criterios clave para las declaratorias de alerta en la ciudad.

Índice Bogotano de Calidad del Aire y Riesgo en Salud (IBOCA)

Este es un indicador que se calcula a partir de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en un momento y lugar de la ciudad. Tiene el fin de comunicar el riesgo ambiental por contaminación atmosférica, el estado de la calidad del aire de Bogotá, las afectaciones y recomendaciones para el cuidado de la salud, y las medidas voluntarias para que la

TABLA 2.
Índice Bogotano de Calidad del Aire y Riesgo en Salud (IBOCA)

Atributos del IBOCA				(5) Intervalos de concentración para cada contaminante y tipos de exposición del IBOCA (ug/m ³) ⁽³⁾					
(1) Intervalos de valores adimensionales ⁽¹⁾	(2) Color	(3) Estado de calidad del aire	(4) Estado de actuación y respuesta	PM 10 (24h)	PM 2.5 (24h)	CO (8h)	SO2 (1h)	NO2 (1h)	O3 (8h)
0 - 50		Favorable	Prevención	0-54	0-12	0-5094	0-92	0-100	0-106
51 - 100		Moderada	Prevención ⁽²⁾	55-154	121-35.4	5095-10818	93-197	101-188	107-137
101-150		Regular	Alerta Fase 1	155-254	35.5-55.4	10819-14253	198-485	189-677	138-167
151-200		Mala	Alerta Fase 2	255-354	55.5-150.4	14254-17688	486-796	678-1220	168-205
201-300		Peligrosa	Emergencia ⁽³⁾	355-604	150.5-250.4	17689-34861	797-1582	1221-2349	207-392
301-500				425-604	250.5-500.4	34862-57703	1583-2681	2350-3853	---

FUENTE: SDA, s. f.-b.

ciudadanía contribuya a mantener o mejorar la calidad del aire de la ciudad. También funciona como indicador de riesgo ambiental por contaminación atmosférica, en el marco del Sistema Distrital de Alertas del Sistema Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático (Resolución 2410 de 2015).

Este índice está alimentado por los datos de la RMCAB. Con los valores resultantes del IBOCA se toman las decisiones de declarar estados de prevención, alerta o emergencia, al igual que la restricción de actividades contaminantes en el territorio. Vale la pena resaltar que este índice es un esfuerzo conjunto entre las secretarías distritales de Ambiente y Salud.

Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE)

Este es un sistema de recolección de información que producen las autoridades ambientales del país a través de sus sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Se utiliza para el diseño, la evaluación y el ajuste de políticas y estrategias nacionales y regionales de prevención y control de la calidad del aire. Este subsistema es administrado por el IDEAM y su ámbito es nacional.

3. MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE: SENSORES DE BAJO COSTO Y CIENCIA CIUDADANA

La mala calidad del aire en Bogotá D.C. es históricamente producto de los problemas relacionados con el clima, la geografía y la disposición socioespacial de la ciudad, así como de las estructuras normativas e institucionales arriba descritas. En general, la gestión ambiental en materia de polución se ha concentrado en el reto técnico de identificar una determinada fuente contaminante para desarrollar soluciones, un proceso que es complejo y costoso¹. Lo mismo sucede en casi todos los países que hacen monitoreo de fuentes contaminantes. Sirven como ejemplo los estándares y métodos referenciados por la Environmental Protection Agency (EPA), “que permiten asegurar [que] la exactitud y precisión de los sistemas de monitoreo ... tiene costos iniciales muy elevados y requiere de una cantidad significativa de recursos adicionales para el mantenimiento y la calibración” (Cremades, 2013, p. 1).

Pese a las virtudes científicas y técnicas, los métodos y el lenguaje con el que se narran los problemas atmosféricos impiden una vinculación más cercana de la ciudadanía. Entre otras cosas, las encuestas de calidad del aire realizadas en Bogotá y Medellín² muestran que hay una distancia importante de la ciudadanía con los conceptos clave que permiten comprender los desafíos públicos e individuales que trae la contaminación atmosférica. En consecuencia, la ciudadanía no solo tiene limitado el acceso

-
- 1 Según Aclima, en relación con el monitoreo oficial, el “alto coste de estos aparatos impide cubrir la totalidad de la superficie urbana”. Ver: Aclima. (2017). Sensores low-cost vs estaciones de calidad del aire fijas: ¿con cuáles te quedas? <https://aclima.eus/sensores-low-cost-vs-estaciones-de-calidad-del-aire-fijas-con-cuales-te-quedas/>
 - 2 Estas pueden ser consultadas en el enlace <http://respiraprofundo.com.co/>

a la información, sino que, además, no puede participar directamente en su generación.

Justamente, la medición con sensores de bajo costo, como una opción de ciencia ciudadana, permite acercar estos dos mundos lejanos: el de lo técnico-científico y el de la gente que se siente afectada por la mala calidad del aire. Sin embargo, algunas de las preguntas que se generan con el uso de estas tecnologías son: ¿cuál es la precisión de estos sensores?, ¿son datos confiables?, ¿cómo garantizar su validez? Así, resultaba fundamental establecer si existe o no confianza en los datos arrojados por estas redes ciudadanas de monitoreo.

En este sentido, la alianza entre Dejusticia y Trébola Ecológica, además de contextualizar el problema de calidad del aire en Bogotá D.C., busca documentar la medición de material particulado desde una perspectiva técnico social, de manera que sirva como evidencia de la importancia que tiene involucrar a la ciudadanía en la producción del conocimiento. Tal vinculación con la ciudadanía sirve para fortalecer el acceso a la información pública y motivar la participación activa; para identificar nuevos fenómenos y perspectivas de análisis sociales, ecológicas y jurídicas que permitan robustecer la gestión ambiental y de salud pública; así como para fortalecer la democratización de la ciencia como un derecho humano y garantizar un ambiente seguro, limpio y saludable para las personas.

Actualmente, a nivel global cada vez es más fuerte la tendencia de avanzar hacia la complementariedad entre las redes de monitoreo de bajo costo y las estaciones oficiales. Con esto se busca perfeccionar los datos, pero también propiciar la participación ciudadana en la producción y valoración de conocimiento sobre el problema de la calidad del aire. Así, desde el año 2015 las mediciones ciudadanas con sensores de bajo costo (es decir, aquellos con valor inferior a 500 USD) comenzaron a realizarse en Europa y Estados Unidos; desde entonces ha habido varios ejemplos que ilustran ejercicios de complementariedad. Una muestra es el proyecto AirNow (EE. UU.), que utiliza una red de sensores Purple Air. En grandes eventos de mala calidad del aire, como los incendios forestales en California³, esta red ha demostrado su complementariedad con la oficial de monitoreo⁴.

3 Ver Mataka, 2020 y <https://fire.airnow.gov/>

4 Otro ejemplo es la red de monitoreo de Lima (Perú), que busca avanzar en la utilización de sensores de bajo costo. En: <https://smia.munlima.gob.pe/novedades/monitoreo-de-la-calidad-del-aire-sensores-de-bajo-costo->

En esta sección se explica el desarrollo de tres experimentos de medición diferentes que intentaron acercarse a algunos ciudadanos al problema de la calidad del aire, y que estuvieron dirigidos específicamente a analizar las concentraciones de PM2.5. Estos se basaron en la instalación de sensores *de bajo costo* de diferentes marcas⁵, con el objetivo de intercomparar su funcionamiento y confiabilidad.

El *primer* experimento tuvo como objeto, por medio de la instalación de sensores alrededor de una estación oficial en forma de círculos concéntricos, analizar la relación de las mediciones de estos sensores cuando se alejan de la estación. Se esperaba que en la medida en que se ampliara la distancia desde la estación oficial de monitoreo, menor fuera la correlación o las tendencias entre los datos del sensor de bajo costo colocado y aquellos arrojados por los sensores a diferentes distancias. Esto implicaría que a mayor distancia de la estación, menor es la confiabilidad de sus datos.

El *segundo* consistió en establecer la correlación entre los datos que arroja el monitoreo oficial de la ciudad y los que resultan de las mediciones hechas con sensores ciudadanos instalados en algunas estaciones públicas de calidad del aire. Esto se hizo considerando que la validez de los datos obtenidos con esos sensores de bajo costo es el mayor obstáculo de este tipo de monitoreo de calidad del aire.

El *tercero* buscó poner en marcha un piloto de una red barrial de calidad del aire con sensores de bajo costo, específicamente en un área afectada por una avenida de alto tráfico y por la actividad de canteras vecinas. La intención era identificar los datos de contaminación registrados por los sensores y, así, poder verificar la mala calidad del aire producida por el transporte en volquetas de materiales de construcción que salen de las adecuaciones de las canteras así como de escombros para su relleno.

Para todos los sensores de bajo costo utilizados era indispensable permanecer conectados a wifi las 24 horas, estar instalados a una altura mínima de dos pisos (aproximadamente cuatro metros) y estar protegidos de la lluvia. Su instalación estuvo acompañada, además, de sensores de humedad y temperatura para validar los datos, ya que los sensores de bajo

[pasaran-evaluaciones-gratuitas-de-desempeno#:~:text=Lima%2C%2025%20de%20octubre%20del,de%20la%20calidad%20del%20aire](#)

5 Los dispositivos seleccionados fueron: Plantower PMS7003 y Plantower PMSA003, Sensirion SPS30, Panasonic SN-GCJA5, Honeywell HP-MA115S0, Nova SDS011.

costo con datos de humedad relativa superiores al 95 % pueden generar valores inválidos⁶.

Estas pruebas se llevaron a cabo en el período comprendido entre octubre de 2020 y febrero de 2021, durante uno de los más desafortunados picos de la pandemia por COVID-19. Los confinamientos y las restricciones, así como la desconfianza de la ciudadanía en lo público, resultaron ser unos de los principales obstáculos para alcanzar los objetivos propuestos inicialmente. Sin embargo, las condiciones atmosféricas de clima seco en esta época del año eran ideales para realizar las mediciones.

Experimento 1:

Dinámica de los datos de las estaciones de monitoreo

El objetivo pretendido de este experimento era diseñar el piloto de una red de sensores de bajo costo para mostrar si existe variabilidad en los datos recopilados en los alrededores de las estaciones oficiales. Dicha variabilidad estaría relacionada con diferentes microambientes que son ignorados por el modelo actual de medición. Para esto se hizo un ejercicio de monitoreo con cuatro sensores de bajo costo de anillos concéntricos alrededor de la estación oficial de calidad del aire Las Ferias.

Este piloto tuvo como fin establecer qué correlaciones existen entre el sensor que está ubicado en la estación oficial de Las Ferias, denominado *sensor central*, y aquellos instalados en los tres círculos concéntricos. Esto permitiría observar aproximadamente cuál es el rango de alcance de medición de una estación o sensor.

El experimento se desarrolló en los siguientes pasos⁷:

1. Instalación de cuatro sensores; uno central y tres en círculos concéntricos.
2. Recopilación de los datos de los cuatro (4) sensores de bajo costo.
3. Análisis de resultados.

Este ejercicio pretendía construir, a pequeña escala, una red de sensores⁸ para demostrar que el sistema de medición oficial debe ser complementado, de manera que puedan realizarse mediciones distribuidas por toda la ciudad para obtener datos más precisos y sectorizados. Así, a

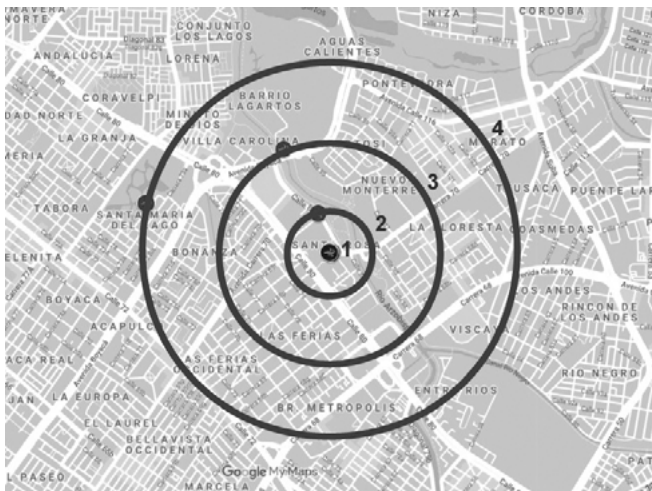
⁶ Este dato aparece en los manuales de los sensores.

⁷ Los sensores a los que se refiere este experimento son adicionales a los cinco sensores del segundo experimento.

⁸ Lo ideal en este ejercicio sería tener una nube grande de sensores (más de 50) para demostrar la variabilidad de los datos de forma precisa.

FIGURA 2.

Mapa diagramado de los sensores y los círculos concéntricos



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

mayor cantidad de sensores de bajo costo monitoreando microambientes, mayor confiabilidad del análisis de los datos en toda la ciudad, especialmente en aquellos lugares donde las mediciones oficiales no llegan o lo hacen parcialmente.

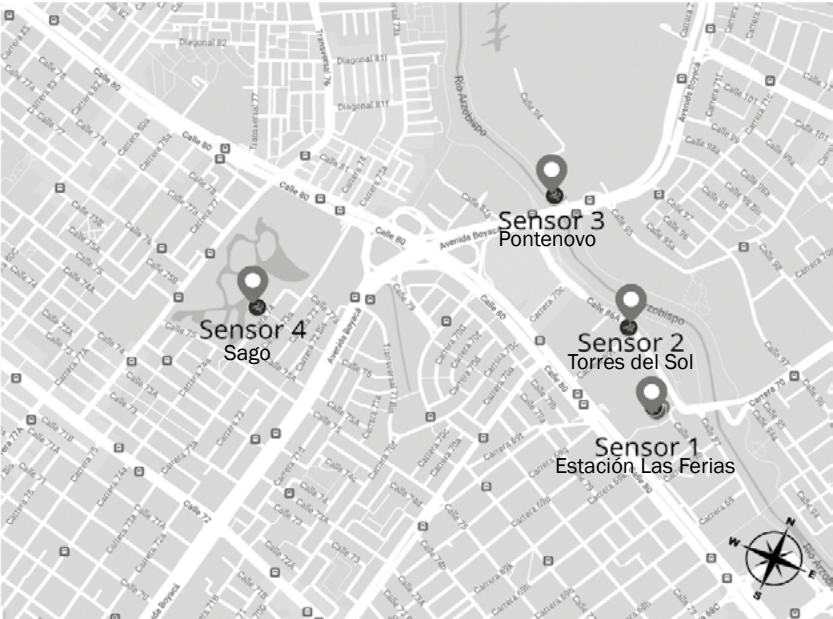
Con este piloto se pretende mostrar la importancia de establecer en qué lugares de la ciudad la medición oficial empieza a tener problemas de confiabilidad debido a la distancia de las estaciones oficiales de monitoreo. De esta manera, las autoridades públicas y la academia podrían identificar lugares y problemas que, consecuentemente, permitan fortalecer su investigación en materia de la calidad del aire y avanzar hacia experimentos más detallados que contribuyan a una política pública más ambiciosa.

El piloto inicial aquí planteado se basa en las mediciones de cuatro sensores de bajo costo marca Sensirion SPS30:

1. Sensor en la estación oficial de Las Férias.
2. Sensor en urbanización Torres del Sol a 280 metros en un quinto piso.
3. Sensor en urbanización Pontenovo a 770 metros en un sexto piso.
4. Sensor en urbanización Sago (Santa María del Lago) a 1300 metros en un quinto piso.

Inicialmente se buscó un lugar sobre la Avenida Calle 80, para mostrar el efecto contaminante que tiene la vía, pero no fue posible, ya que

FIGURA 3.
Mapa de las ubicaciones del piloto de círculos concéntricos



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

no se lograron contactos directos y la situación de la pandemia COVID-19 dificultó las visitas de campo. Al final todos los sensores fueron ubicados en alturas de quintos y sextos pisos, lo que impide que las mediciones sean altamente afectadas por el tráfico vehicular u otras interferencias externas. La ubicación y altura de los sensores trataron de emular las condiciones de la estación oficial de Las Ferias, para, así, medir la correlación de los datos arrojados por los sensores entre más se alejaban del sensor central.

TABLA 3.
Valores de medición de material particulado PM2.5 entre la estación oficial de Las ferias y los 3 sensores de bajo costo ubicados bajo la metodología de círculos concéntricos

Estación	Mínimo PM2.5	Máximo PM2.5	Promedio PM2.5
Estación Las Ferias (sensor central)	0.416	22.6	8.02
Torres del Sol (sensor 2)	0.296	25.2	8.83
Pontenovo (sensor 3)	0.400	25.2	8.74
Sago (sensor 4)	1.52	23.5	9.01

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

FIGURA 4.
Valores de medición de material particulado PM2.5 entre la estación oficial de Las Ferias
y los tres sensores de bajo costo ubicados bajo la metodología de círculos concéntricos

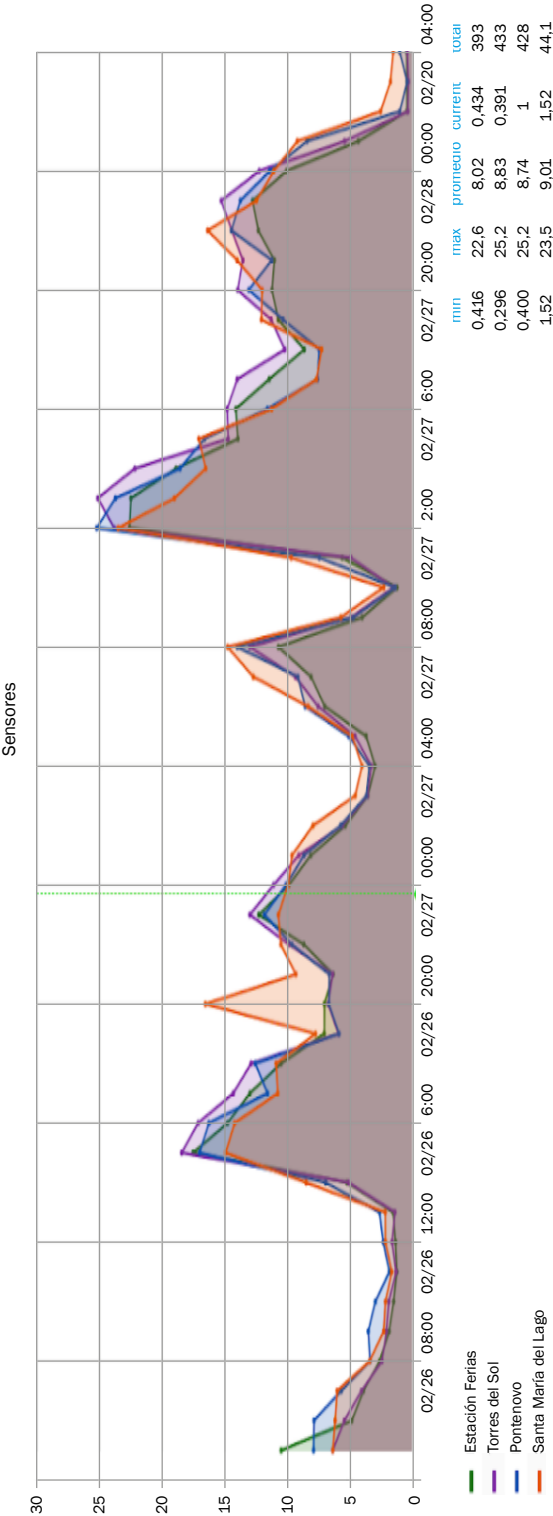


TABLA 4.
Ubicación de los sensores

ID	Marca	Sensor
1	Sensirion SPS30	Central (estación de monitoreo oficial)
2	Sensirion SPS30	Conjunto residencial Pontenovo, sexto piso (770 m desde la estación oficial)
3	Sensirion SPS30	Conjunto residencial Torres Del Sol, quinto piso (280 m desde la estación oficial)
4	Sensirion SPS30	Conjunto residencial Sago, quinto piso (1300 m desde la estación oficial)

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Comparación de los cuatro sensores

Una vez instalados los sensores con las mejores condiciones técnicas posibles, se obtuvieron y analizaron los datos para calcular los coeficientes de *correlación Pearson*. Esta correlación es una medida que se utiliza para saber qué tanta cercanía hay entre dos variables. Entre más cercana a 1, mayor correlación existe a fin de comparar variables. De este modo, si una variable sube y la otra también, la correlación es alta; si son diferentes, la correlación es baja. La siguiente tabla explica cómo leer las correlaciones de Pearson.

TABLA 5.
Resumen de correlaciones de Pearson

Sensores	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Oficial	Oficial (+1 hora)	Oficial (+2 hora)
Sensor 1	1	0,5>x	0,6>x			x>0,7	x>0,8
Sensor 2		1					
Sensor 3			1				
Sensor 4				1			
Oficial					1		
Oficial (+1 hora)						1	
Oficial (+2 hora)							1

Los valores menores a 0,5 significan una muy baja correlación

La tabla muestra el cruce de los sensores de bajo costo (sensor 1,2,3,4) con los datos de los sensores oficiales

La correlación 1=1 significa que los valores obtenidos son iguales

Los valores mayores a 0,8 significan una muy alta correlación

FUENTE: Daniela Cardona, 2022.

Dentro del análisis de los círculos concéntricos, los resultados fueron los siguientes:

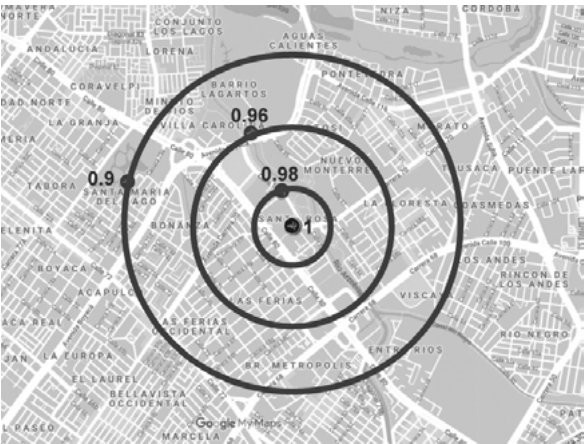
TABLA 6.
Resumen de las correlaciones de Pearson obtenidas en el análisis estadístico del ejercicio de círculos concéntricos

Comparación de puntos de medición			Valor Correlación	Análisis
Ferias	vs	Torres del Sol	0,982	Altísima correlación
Ferias	vs	Pontenovo	0,964	Altísima correlación pero menor que Torres del Sol
Ferias	vs	Sago	0,895	Alta correlación pero menor que Torres del Sol y que Pontenovo
Torres	vs	Pontenovo	0,968	Altísima correlación
Torres	vs	Sago	0,89	Alta correlación parecida a los resultados entre Ferias y Sago
Pontenovo	vs	Sago	0,924	Alta correlación superior a Ferias Sago

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Los datos del estudio entre estaciones muestran que pese al progresivo distanciamiento, los datos mantienen una alta correlación entre sí. Esto quiere decir que los rangos de medición son confiables, por lo menos en las condiciones del experimento. No obstante, lógicamente, entre más nos alejamos del primer círculo (sensor 1), menor es la correlación.

FIGURA 5.
Mapa diagramado de las correlaciones



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Es importante mencionar que no se observan grandes diferencias en los datos porque los sensores están a gran altura y las interferencias locales de tráfico son menos perceptibles; por tanto, hay condiciones semejantes a las que tiene el sensor ubicado en la estación oficial de Las Ferias. Esto muestra que las estaciones no reciben la misma cantidad de material particulado que puede recibir la ciudadanía, por la altura a la que están dispuestas. Esto no invalida la información pública, pues el sistema de monitoreo oficial tiene una finalidad diferente, más global.

Experimento 2:

Validación de datos de los sensores de bajo costo

Esta prueba tiene como finalidad validar los datos arrojados por los sensores de bajo costo frente a los de las estaciones de monitoreo oficiales de calidad del aire. En otras palabras, se busca comparar los datos de los dos sistemas (ciudadano y oficial) a fin de establecer si se parecen o no y qué tanto (correlación). De esta manera se podría confirmar o negar la confiabilidad de los sensores de bajo costo frente a las mediciones de los equipos utilizados por las autoridades para la toma de decisiones.

Las mediciones se llevaron a cabo en el período comprendido entre el 7 de noviembre de 2020 y el 16 de enero de 2021. Las estaciones oficiales de calidad del aire recomendadas por la SDA para la instalación de los sensores fueron Las Ferias, Kennedy y Tunal. Además, se instaló otro sensor en una estación propiedad de la Universidad Distrital (la cual no hace parte del sistema oficial de monitoreo), que es de la misma naturaleza óptica que los sensores de bajo costo.

Dentro de los instrumentos tecnológicos utilizados para medir el material particulado por la administración pública bogotana resaltan dos métodos. El primero, el *gravimétrico*, recolecta las partículas resuspendidas y luego las pesa; este es el tipo de tecnología más ampliamente utilizada en el mundo. En Bogotá, todas las estaciones oficiales se basan en este método, mediante el uso de sensor BAM. El segundo método es el óptico, que funciona con un láser que apunta al aire y, dependiendo de la calidad de luz que rebote (refracción), calcula la cantidad de material particulado. Esta tecnología, más moderna, es igualmente aceptada por la ciencia a nivel global para realizar las mediciones. Los sensores de bajo costo son también ópticos.

Los pasos del experimento fueron los siguientes:

1. Instalación de cinco sensores de diferentes marcas y modelos⁹ por cada estación de monitoreo (20 en total).
2. Lectura de datos de los sensores de bajo costo para comprobar su buen funcionamiento y comparar los datos. Esto se hizo en aras de establecer el funcionamiento uniforme de dichos sensores.
3. Lectura de datos de las estaciones de monitoreo para comprobar su buen funcionamiento.
4. Comparación de los datos obtenidos por los sensores y las estaciones, para obtener las correlaciones entre los datos de ambos. Siguiendo la recomendación del profesor Néstor Rojas, se realizó la comparación atrasando una y dos horas los datos de la estación oficial. Este ejercicio mostró una correlación más alta en algunas estaciones.

FIGURA 6.
Plan de instalación de sensores



FUENTE: Daniela Cardona, 2022.

⁹ Plantower PMS7003 y Plantower PMSA003, Sensirion SPS30, Panasonic SN-GCJA5, Honeywell HPM115S0.

Análisis en la estación de monitoreo Las Ferias

Durante el experimento se presentaron algunos problemas de conectividad propios de la estación y su mantenimiento. Sin embargo, su desempeño general fue relativamente estable. Además, la estación oficial no tenía acceso a wifi propio, por lo cual se instaló un *router* que se conectó al *switch* de la misma estación, con buenos resultados.

Los sensores en Las Ferias, instalados el 11 de noviembre de 2020, tuvieron frecuentes caídas en el reporte de datos debido a la mala cobertura de señal wifi. Esto se debió a que movían el *router* (o enrutador, que es dispositivo utilizado para interconectar redes wifi) y, consecuentemente, se afectaba la cobertura. De hecho, desde el 29 de diciembre hasta el 5 de enero la estación estuvo continuamente fuera justamente por esa razón.

FIGURA 7.

Instalación de sensores en la estación oficial de calidad del aire Las Ferias



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.



Desde su instalación, el sensor Honeywell HPMa115C0 tuvo un comportamiento defectuoso, aunque su correlación fue alta con los demás sensores. Este midió de 22 a 25 ug/m3 más que los demás, por lo cual se marcó como producto defectuoso. El sensor fue reemplazado por un sensor Nova SDS011 el 5 de febrero de 2021. En la figura 8 se observa en azul el sensor Honeywell.

El día 12 de enero de 2021, el sensor Panasonic SNGHCAJ5 comenzó a funcionar de manera irregular; marcaba valores muy altos mientras el resto de los sensores se mantenían en una medición normal. Por este motivo los datos usados en el análisis van hasta esa fecha. (figura 9)

El resto de los sensores funcionaron correctamente, mostrando altas correlaciones entre ellos, cercanas a 1, y prometedoras correlaciones con la estación oficial. El análisis de correlación entre la estación oficial y los sensores de bajo costo mostró valores cercanos a 0.55.

TABLA 7.
Resumen de las correlaciones de Pearson obtenidas en el análisis estadístico de la Estación Las Ferias

	SCN5	SPS30	HPMA	PMA	PMS	Oficial	Oficial -1h	Oficial -2h
SCN5	1	0.496	0.500	0.503	0.496	0.275	0.347	0.405
SPS30		1	0.983	0.996	0.996	0.565	0.712	0.807
HPMA			1	0.984	0.978	0.557	0.711	0.809
PMA				1	0.996	0.560	0.711	0.806
PMS					1	0.563	0.713	0.811

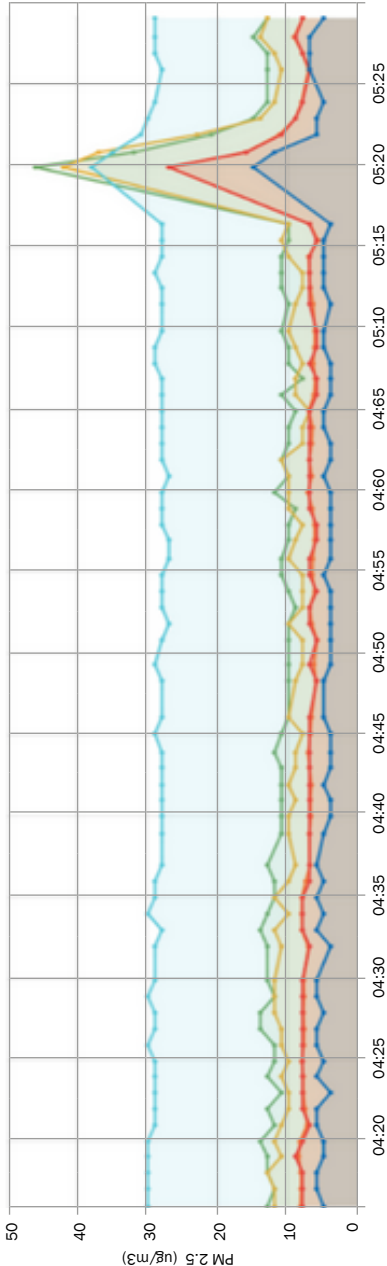
FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Comparación con estación de monitoreo Kennedy

La estación oficial de Kennedy tiene un enlace de wifi propio; no obstante, cambió su sistema de comunicaciones ETB y eliminó el *router* que permitía el acceso. Por esta razón, durante 20 días los sensores no contaron con acceso a wifi. Posteriormente se logró conseguir el acceso al enlace de la ETB, lo que permitió avanzar con el estudio. Algunas de las dificultades del experimento surgieron por dos razones. Por un lado el acceso a wifi previsto inicialmente no funcionó y se perdieron varios días de medición mientras se solucionó el problema. Por el otro, el funcionamiento del sensor era inestable y este se reiniciaba frecuentemente.

Los sensores en Kennedy estuvieron transmitiendo hasta el 15 de diciembre, cuando cambiaron los enlaces de datos de la estación por unos

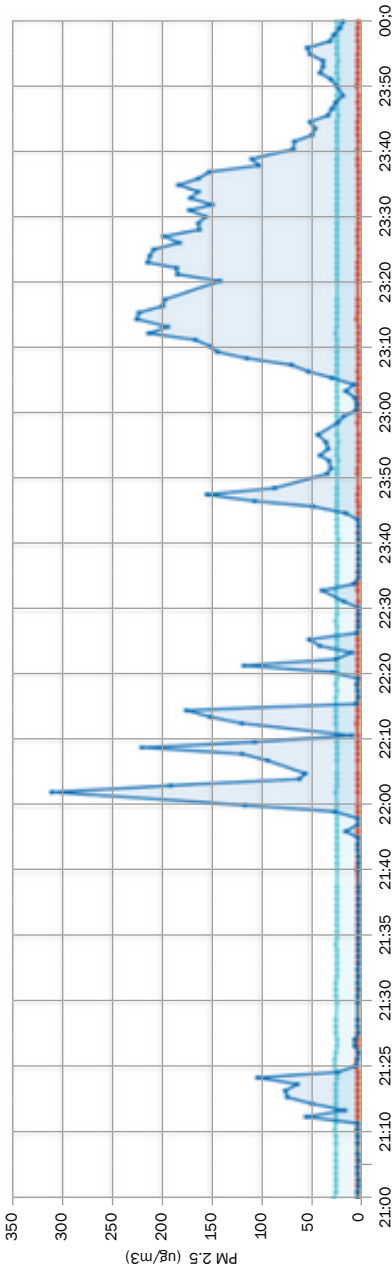
FIGURA 8.
Comparativo de sensores de bajo costo y daño de la referencia Honeywell en la estación Las Ferias



Nombre de sensor	Marca	Mínimo	Máximo	Promedio
PM 2.5 PMS7003 (ug/m3)	Plantower	8	46	12.5
PM 2.5 PMSA003 (ug/m3)	Plantower	7	42	11.2
PM 2.5 HPMA115SO (ug/m3)	Honeywell	27	38	28.8
PM 2.5 SPS30 (ug/m3)	Sensirion	5.79	27.0	7.71
PM 2.5 SPS30 rounded (ug/m3)	Sensirion	6	27	7.73
PM 2.5 SNGCIA5 (ug/m3)	Panasonic	4	15	5.20

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

FIGURA 9.
Comparativo de sensores de bajo costo y daño evidenciado en la referencia Panasonic en la estación Las Ferias



Nombre sensor	Mínimo	Máximo	Promedio
PM 2.5 PMS7003 (ug/m3)	0	3	0.0526
PM 2.5 PMSA003 (ug/m3)	0	1	0.0175
PM 2.5 HPWA115SO (ug/m3)	21	25	22.2
PM 2.5 SPS30 (ug/m3)	0.294	2.52	0.728
PM 2.5 SPS30 rounded (ug/m3)	0	3	0.784
PM 2.5 SNGCJA5 (funcionamiento irregular)	0	310	54.3

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

FIGURA 10.
Instalación de sensores en la estación oficial Kennedy



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

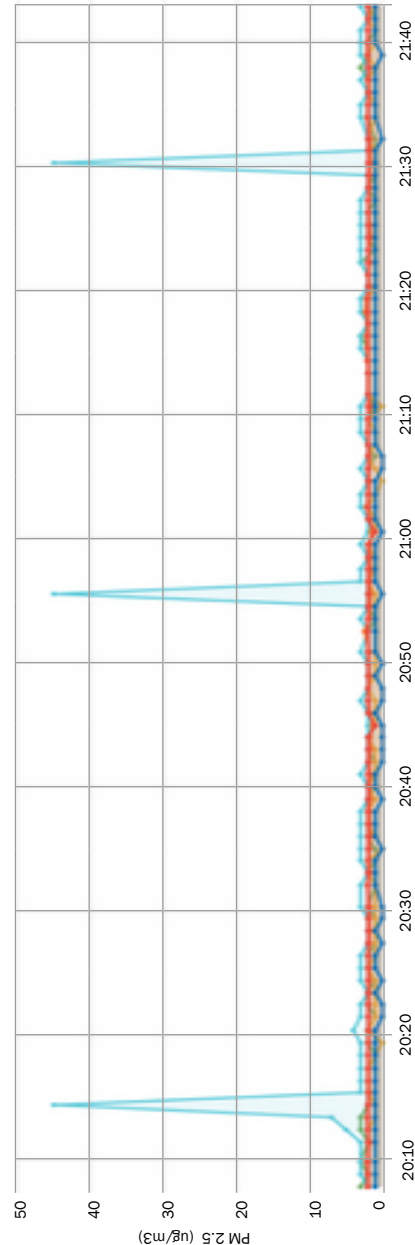
nuevos de mayor seguridad, debido a la época de festividades de fin de año. Se pudo retomar el trabajo hasta el 5 de enero, para instalar un nuevo *router* celular de prueba y reestablecer el enlace. Este proceso se logró hasta el día 15 de ese mes.

El sensor Honeywell HPM115C0 tuvo un comportamiento deficiente desde el 6 de enero de 2021, tal y como pasó en las estaciones Las Ferias y Tunal. Se reemplazó por un Nova SDS011. El resto de los sensores funcionaron correctamente, mostrando altas correlaciones entre ellos (cercanas a 1) y con la estación oficial. A continuación se muestran los picos de valores altos inexplicables.

El análisis estadístico mostró valores aceptables de correlación entre la estación oficial y los sensores de bajo costo, cercanas a 0.51. Siguiendo la recomendación del profesor Rojas, se realizó la comparación atrasando una y dos horas los datos de la estación oficial. Esto se debió a que las estaciones oficiales reportan los datos con una hora de retraso, el tiempo que toma el procesamiento de la información.

El ejercicio mostró una correlación más alta si se retrasaban dos horas los datos de los sensores, obteniendo resultados cercanos a 0.8; este valor demuestra la alta correlación entre los valores de los sensores de bajo

FIGURA 11.
Comparativo de sensores de bajo costo y daño evidenciado en la referencia Honeywell en la estación Kennedy



Nombre sensor	Mínimo	Máximo	Promedio
PM 2.5 PMS7003 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1	3	1.8
PM 2.5 PMSA003 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0	2	1.33
PM 2.5 HPMA1150 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2	45	4.03
PM 2.5 SPS30 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.42	2.48	1.87
PM 2.5 SPS30 rounded ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1	2	1.98

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

costo y la estación oficial. A continuación se presenta la tabla resumen de las correlaciones de Pearson obtenidas en el análisis estadístico.

TABLA 8.
Resumen de las correlaciones de Pearson obtenidas en el análisis estadístico de la estación Kennedy

	SCN5	SPS30	HPMA	PMA	PMS	Oficial	Oficial -1h	Oficial - 2h
SCN5	1	0.998	0.968	0.997	0.995	0.519	0.646	0.786
SPS30		1	0.957	0.996	0.992	0.509	0.629	0.766
HPMA			1	0.957	0.963	0.514	0.654	0.813
PMA				1	0.998	0.520	0.647	0.785
PMS					1	0.525	0.657	0.800

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Comparación con estación de monitoreo Tunal

Esta estación oficial no tiene wifi propio, por lo cual se instaló un *router* de telefonía celular con plan de datos, que proveyó el wifi a los cinco sensores. Esta situación generó un leve aumento en los costos del experimento. Posteriormente se realizó una nueva visita para conectar un *router* de wifi tradicional a la estación oficial, lo que permitió un funcionamiento adecuado.

FIGURA 12.
Instalación de la estación de calidad del aire oficial Tunal



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Los sensores de bajo costo arrojaron una medición muy semejante entre ellos.

El análisis estadístico mostró valores aceptables de correlación entre la estación oficial y los sensores de bajo costo, cercanas a 0.75.

TABLA 9.
Resumen de las correlaciones de Pearson obtenidas en el análisis estadístico de la estación Tunal

	SCN5	SPS30	HPMA	PMA	PMS	Oficial	Oficial -1h	Oficial -2h
SCN5	1	0.995	0.607	0.995	0.996	0.740	0.896	0.704
SPS30		1	0.608	0.995	0.995	0.730	0.873	0.683
HPMA			1	0.602	0.615	0.388	0.460	0.355
PMA				1	0.999	0.743	0.891	0.691
PMS					1	0.743	0.894	0.694

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Comparación con estación de monitoreo U. Distrital (Paiba)¹⁰

Dentro de las dificultades presentadas en este caso destaca la caída de uno de los servidores de la Universidad Distrital. La estación de referencia tuvo largas desconexiones por problemas de conectividad y del sensor Teledyne, que es el propio de la estación. Este fue llevado dos veces a reparación, desde enero estuvo en mantenimiento, y cuando regresó la red wifi de la estación tuvo continuas fallas. Por esa razón, se tomaron los datos de noviembre y diciembre únicamente. Por su parte, los cinco sensores de bajo costo funcionaron adecuadamente durante todo el experimento.

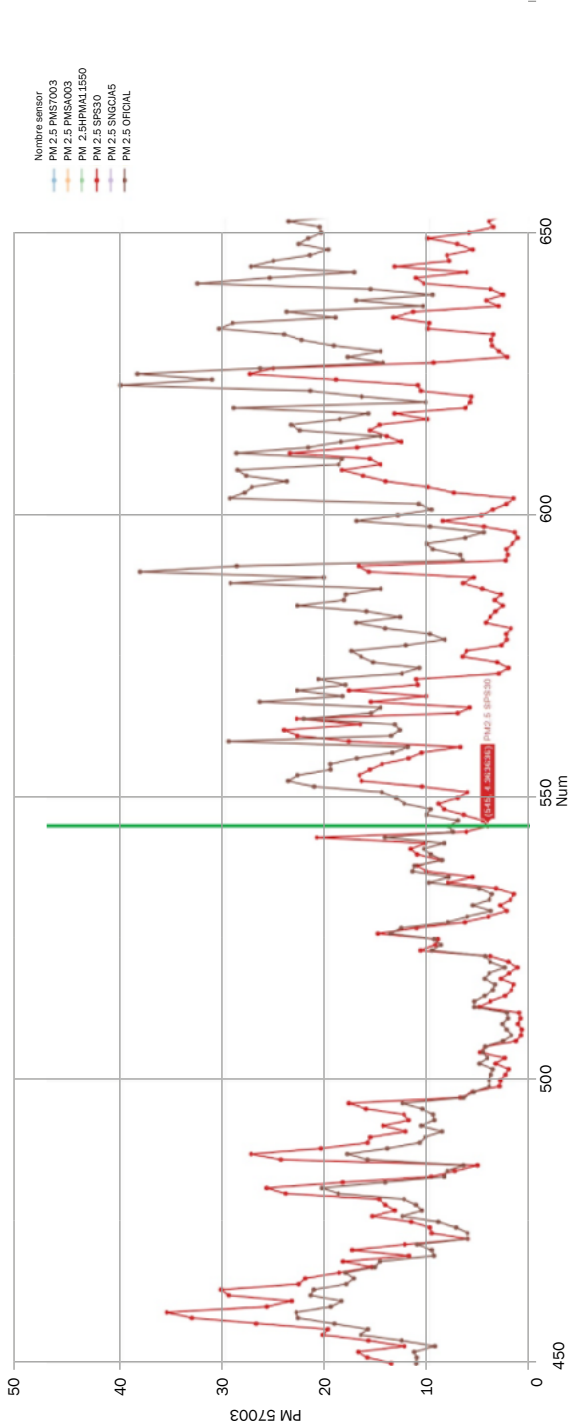
FIGURA 13.
Instalación de sensores en la estación de calidad del aire de la Universidad Distrital



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

10 Esta estación no hace parte de la red oficial de datos, pero sus condiciones técnicas permiten obtener información confiable para contrastar el alcance de las mediciones públicas de la ciudad.

FIGURA 14.
Comparativo de sensores de bajo costo respecto a la estación U. Distrital, con un cambio de comportamiento a partir del 1 de diciembre



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Durante el mes de noviembre los datos fueron muy parecidos, y hubo una correlación muy alta (0.95) entre los datos arrojados por la estación de la Universidad Distrital y los reportados por los sensores. Sin embargo, en el mes de diciembre la correlación disminuyó a 0.6. Hubo un notorio cambio radical que se observó desde las 0:00 del 1 de diciembre del 2020, como si la sincronización de los datos hubiera fallado. Probablemente esto haya sido producto de un error del servidor del sensor de la universidad, que días después fue enviado a reparación.

En la figura 14 es evidente el cambio entre noviembre y diciembre, meses separados por la línea verde, que indica el cambio de fecha. Al costado izquierdo de la figura 14 la correlación era de aproximadamente 0.95; al costado derecho empieza a notarse la brecha que marca el cambio de esta correlación y la conduce a ser de 0.6.

Aun con esto, los sensores de bajo costo tienen una medición semejante entre ellos. El cambio experimentado en diciembre es visible en la tabla de resumen de correlaciones de Pearson que se presenta a continuación.

TABLA 10.
Resumen de las correlaciones de Pearson obtenidas en el análisis estadístico de la estación de la U. Distrital

	SCN5	SPS30	HPMA	PMA	PMS	Oficial	Nov.	Dic.
SCN5	1	0.995	0.990	0.996	0.987	0.564	0.962	0.606
SPS30		1	0.994	0.993	0.991	0.559	0.955	0.573
HPMA			1	0.984	0.990	0.577	0.959	0.616
PMA				1	0.996	0.580	0.954	0.607
PMS					1	0.574	0.952	0.614

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Resultados del experimento

La principal conclusión de este experimento es que todos los sensores de bajo costo tienen entre sí correlaciones muy altas, de 0.95 y más. Esto es definitivo para corroborar la confiabilidad de las mediciones ciudadanas en espacios determinados. Sin embargo, deben tenerse en cuenta algunos hallazgos que buscan cualificar este ejercicio.

Siguiendo la recomendación del profesor Néstor Rojas —hacer la comparación atrasando una o dos horas los datos de las estaciones oficiales (Kennedy y Las Ferias)— el experimento mostró una correlación

más alta al atrasar los datos dos horas¹¹. Al final, los resultados obtenidos en promedio fueron cercanos a 0.8. Este valor demuestra una correlación alta entre los valores de los sensores de bajo costo y las estaciones oficiales.

De todas formas, no fue clara la razón técnica para obtener una mayor correlación en algunas estaciones al retrasar dos horas los valores de la estación oficial respecto a los sensores de bajo costo. Este fenómeno no se presenta con la estación Paiba, que usa un sensor óptico semejante a los de bajo costo —guardadas las proporciones— y toma los datos en tiempo real. En ese sentido, la naturaleza similar de la tecnología podría ser un factor que brinde mayor correlación a la intercomparación de datos.

Por otro lado, en relación con las características técnicas de los sensores de bajo costo, es importante tener claras variables como tiempo de vida útil, confiabilidad de la medición a lo largo de dicho tiempo, precio y accesibilidad. Por ejemplo, las pruebas descritas mostraron que los sensores Honeywell fallaron en tres de cuatro casos, mientras que los Panasonic fallaron en uno de cuatro y los Plantower y Sensirion funcionaron en perfectas condiciones. Además, los sensores Sensirion tuvieron los valores más cercanos a las estaciones oficiales, especialmente Paiba. Mientras que los Plantower sobreestiman los valores, los Panasonic los subestiman. Se evidenció igualmente la necesidad de tener claros los protocolos para el acceso y uso estable del wifi, lo que garantiza la recopilación homogénea de datos en los tiempos previstos. Debe tenerse en cuenta, por último, que entre mayor sea el tiempo de medición, más datos se obtienen, y así las correlaciones son más realistas.

En conclusión, las correlaciones entre los sensores de bajo costo y las estaciones oficiales y la de Universidad Distrital son aceptables y, por lo tanto, confiables. Esto indica que los sensores de bajo costo son un método de medición que puede complementar el sistema oficial de monitoreo.

Experimento 3:

Medición ciudadana de la calidad del aire en Ciudad Bolívar

Este experimento tuvo como fin realizar un ejercicio aplicado de ciencia ciudadana con sensores de bajo costo sobre la avenida Boyacá, en los barrios México y Lucero de la localidad de Ciudad Bolívar, entre las calles 66

11 Este método no se aplica al sensor de la Universidad Distrital porque es óptico, no gravimétrico. Se colige que esto ocurre porque en el primero la información se genera en tiempo real, a diferencia de lo que ocurre en las estaciones basadas en gravimetría.

y 65a sur. Su objetivo era hacer la modelación (o representación) de cómo se afecta la calidad del aire gracias al material particulado emitido por el tráfico vehicular¹².

Se eligió dicho sector por las difíciles condiciones ambientales que soportan sus residentes y transeúntes, que son consecuencia del alto tráfico, así como por la entrada y salida de volquetas transportadoras de residuos de construcción. Estos vehículos ingresan a las cuatro canteras como parte de las actividades de reconfiguración y estabilización geomorfológica y ambiental de las minas ubicadas en la zona que fueron explotadas por décadas, y que actualmente se encuentran en etapa de cierre y abandono.

FIGURA 15.

Evidencia de la excesiva contaminación del aire en la avenida Boyacá (barrio México)



FUENTE: Daniel Bernal, 2020.

En los barrios México y Lucero habita una comunidad que por años ha pedido el traslado o la clausura de las canteras de materiales de construcción, por razones asociadas a su calidad de vida y al impacto ambiental. Actualmente, las cuatro minas (Cemex, Fundación San Antonio, Concremovil y Máquinas Amarillas) se encuentran en etapa de cierre y

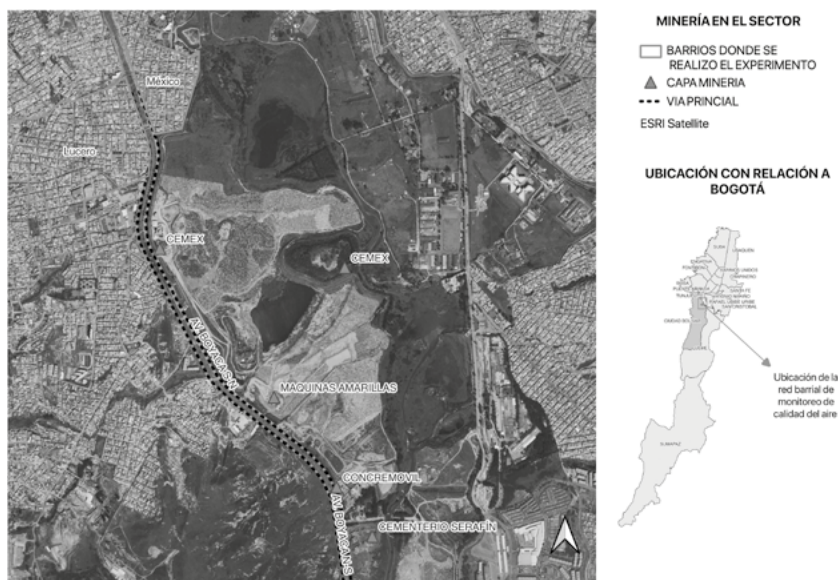
12 Este estudio se basa en la investigación realizada por el ingeniero José Agustín Zamudio (2016) llamada *Estrategias para mitigar la contaminación del aire en zonas aledañas a grandes avenidas de Bogotá*. Esta fue dirigida por el profesor Luis Belalcázar, quien es, a su vez, apoyo académico para este proyecto.

abandono, pero el continuo traslado de volquetas de escombros para rellenar los socavones deja desperdicios en el aire y en la vía, a lo que hay que sumar un alto tráfico vehicular.

Por las condiciones del problema, sobre él confluyen las competencias de distintas autoridades públicas, particularmente de las secretarías distritales de Ambiente, Movilidad y Salud, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y la CAR. No obstante, hay un bloqueo institucional para resolver el problema de contaminación atmosférica en la zona, mientras las negativas condiciones ambientales permanecen y amenazan los derechos de sus habitantes.

FIGURA 16.

Minas y su cercanía con la avenida Boyacá (sector Mochuelo)



FUENTE: Daniela Cardona, 2022.

La alta contaminación en la zona —que se puede percibir con una simple exposición de los sentidos— fue clave para definir este lugar como el más adecuado para establecer un piloto de *red barrial de calidad del aire*. Dicho proyecto consistió en instalar cuatro sensores Sensirion SPS30 y una estación meteorológica, todos de bajo costo, junto con la elaboración de un estudio de tráfico (conteo de vehículos que transitan la avenida), que se realizó con el apoyo y trabajo de vecinos del sector. Con esa

información, luego se modelaron los datos, con el fin de establecer qué tan alta es la contaminación del aire en la zona¹³.

Instalación y medición con los sensores de bajo costo

Para hacer la modelación, fue prevista la instalación de dos sensores de PM2.5 a cada costado de la avenida Boyacá —es decir, *sensores de vía*— y dos sensores de control a una distancia máxima de 150 metros. Estos últimos se denominan *background* o *de fondo*, ya que miden las condiciones del aire sin la influencia directa de una fuente de contaminación (en este caso la avenida Boyacá). Los sensores del barrio México se identifican como los de vía y fondo 1, mientras que los del lado de Lucero, como los de vía y fondo 2. Con esto se esperaba modelar el comportamiento de la calidad del aire en la zona identificada.

FIGURA 17.
Mapa de la ubicación de los sensores vía y fondo
en los barrios México y Lucero



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Para la realización de este análisis, era necesario garantizar que se mantuvieran en línea y funcionando al mismo tiempo los siguientes elementos:

1. Sensor de vía 1 (barrio México)

13 Este método de trabajo se definió a la luz de los modelos de medición de calidad del aire ya identificados por el profesor y experto Luis Belalcázar: Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), Winmiskam (comercial) y Envi-met (de uso libre) (Zamudio, 2016).

2. Sensor de vía 2 (barrio Lucero)
3. Sensor de fondo 1 (barrio México)
4. Sensor de fondo 2 (barrio Lucero)
5. Estación meteorológica
6. Cámara de video grabando el tráfico de la avenida Boyacá en el sentido sur-norte
7. Cámara de video grabando el tráfico de la avenida Boyacá en el sentido norte-sur

Al tratarse de un proyecto estrictamente ciudadano, se requería la voluntad y participación de la comunidad. Uno de los grandes aprendizajes iniciales es que hay un profundo problema de acceso a la información pública en materia de calidad del aire, así como cierta desconfianza ante cualquier figura que parezca provenir del sector público. Estas condiciones interfirieron con el plan inicialmente establecido.

A diciembre de 2020, de los cuatro sensores se habían instalado tres, los de vía y fondo del barrio México y el de vía del barrio Lucero. Solo hasta enero de 2021 se logró instalar el sensor de fondo en Lucero, cumpliendo así el requisito para poder hacer la comparación entre los cuatro puntos y llevar a cabo el estudio de tráfico previsto. En total se realizaron 15 visitas para verificar el funcionamiento de la red barrial de calidad del aire, incluyendo sus conexiones eléctrica, wifi y *bluetooth*.

Instalación de sensores en el barrio México (sentido sur-norte de la avenida Boyacá)

El *sensor de vía 1* fue instalado en la casa del ciudadano Luis Calderón, líder comunal. Allí la cobertura y el funcionamiento avanzaron según lo previsto.

El *sensor de fondo 1* fue instalado en una casa ubicada frente al parque del barrio México. Su instalación se hizo a una altura similar a la del sensor de vía 1. En principio la toma de datos funcionó de acuerdo a lo previsto. Sin embargo, se perdieron los datos del sensor, porque fue desconectado mientras duró el confinamiento estricto. Pese al inconveniente, los datos obtenidos hasta ese momento pudieron ser utilizados adecuadamente para el análisis.

Instalación de sensores en el barrio Lucero (sentido sur-norte de la avenida Boyacá)

Para la instalación del *sensor de vía 2* (barrio Lucero) no fue posible acceder a una red wifi. Por ejemplo, uno de los vecinos interesados no tenía

señal; otra vecina sintió desconfianza sobre el consumo de energía eléctrica y de datos, por lo que no participó. Estas situaciones se repitieron en las demás casas donde se intentó la instalación. Posteriormente el sensor fue instalado con éxito en un jardín infantil ubicado en el segundo piso de una casa del barrio, a través de un *router* celular 3G. Esta instalación resultó particularmente interesante, pues podría identificar la calidad del aire respirado por los estudiantes, quienes por su corta edad son población vulnerable.

Debido a la pandemia por COVID-19, este lugar estuvo cerrado desde el mes de marzo de 2020 y durante todo el experimento. Al principio el sensor funcionó bien, pero luego falló intempestivamente por un daño en el *router* celular. El funcionamiento del sensor fue inestable y se buscaron diversas alternativas; al final, sin embargo, solo se lograron ocho días de medición en ese punto. Estos datos no fueron incorporados al estudio porque la distancia respecto del sensor de vía del barrio México no cumplía con el rango de máximo 150 m de distancia.

Infelizmente, fue muy difícil encontrar casas que cumplieran con este requisito para la comparación de datos, lo que retrasó las mediciones en este punto. Sumado a esto, la ausencia de información sobre la medición de la calidad del aire con sensores de bajo costo generó grandes obstáculos. Por ejemplo, en una de las casas no fue posible hacer la instalación porque aseguraban que iba a aumentar su recibo de energía eléctrica.

FIGURA 18.

Instalación de sensor de vía 2



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Sin duda, contar con la colaboración ciudadana es esencial para el éxito de este tipo de iniciativas. Justamente uno de los aprendizajes es la importancia de establecer redes ciudadanas para difundir la información y lograr lazos más estrechos entre la ciudadanía y este tipo de proyectos.

Como último recurso, gracias a una extensiva labor en redes sociales (Twitter, Facebook, Instagram y WhatsApp) y búsqueda por voz a voz en Ciudad Bolívar, se logró encontrar una persona interesada y disponible que permitió instalar un sensor en el área de interés, con una solicitud de contraprestación económica. Este sensor funcionó bien y de forma estable.

Así, se procedió a la instalación del *sensor de fondo 2*, ubicado en el barrio Lucero. El lugar más apropiado fue la ventana de un segundo piso, debido a que allí quedaba protegido de la lluvia y la cobertura de señal wifi era aceptable. El sensor funcionó bien y fue estable.

FIGURA 19.
Instalación de sensor de fondo 2

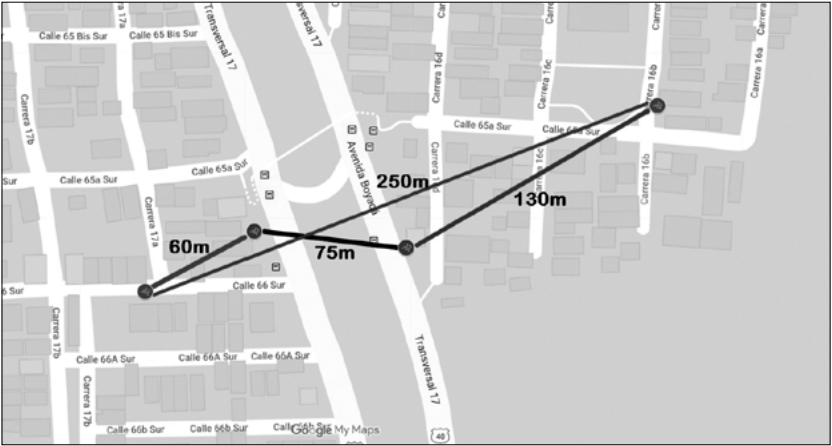


FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Para lograr la instalación del sensor de vía 2 tomó dos meses encontrar el lugar adecuado. Fue un trabajo dispendioso porque el sector tiene una dinámica de inseguridad alta y hay poco interés en el tema. Esto, sumado a las limitaciones que trajo la emergencia sanitaria por pandemia, agravó los problemas para cumplir con los cronogramas y objetivos inicialmente establecidos. En total, teniendo en cuenta aquellos días en los

que el funcionamiento de todos los dispositivos que conforman la red barrial fue satisfactorio y continuo, los cuatro sensores dieron un rango de días de medición de casi un mes, entre el 13 de enero y el 11 de febrero. Luego del proceso comunitario de instalación, las distancias entre los sensores resultaron de la siguiente manera¹⁴:

FIGURA 20.
Mapa de las cuatro estaciones instaladas con sus distancias



FUENTE: Daniel Bernal, 2021

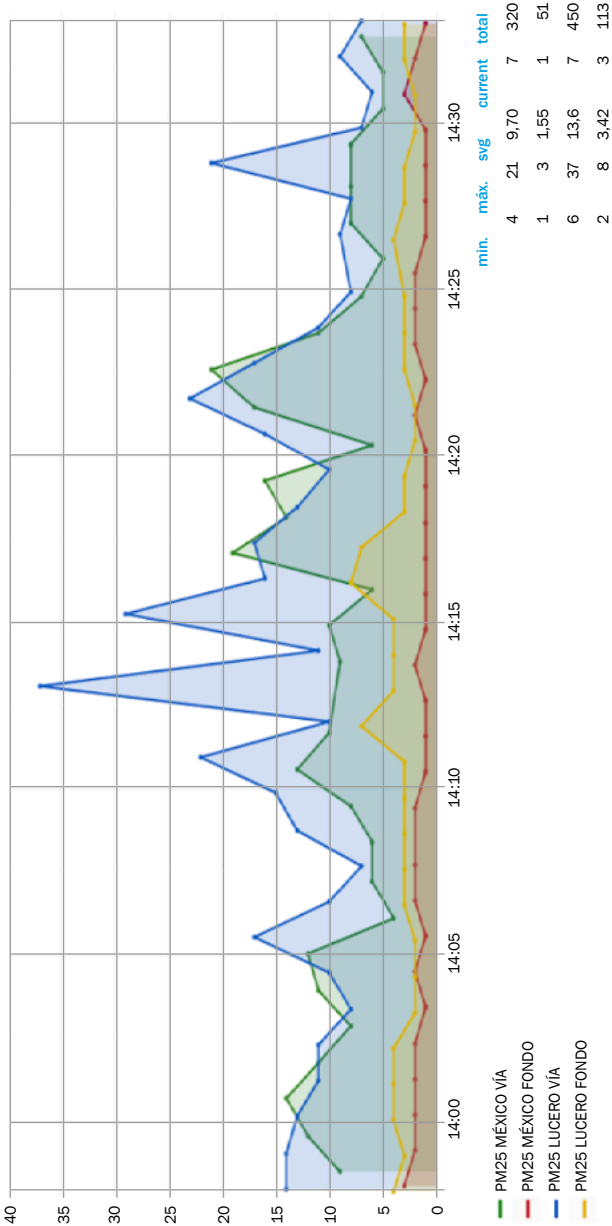
La figura 21 muestra las concentraciones de PM2.5 mínimas, máximas, actuales (de ese momento exacto) y totales (promedio), según las mediciones realizadas por los sensores de vía y fondo 1 y 2 entre el 13 de enero y 12 de febrero. Los resultados arrojados por los cuatro sensores instalados mostraron que, como era de esperarse, los sensores de fondo (1 y 2) reportan menos contaminación que los sensores de vía (1 y 2). Sin embargo, los picos de contaminación en el barrio Lucero (2) son peores, por lo general, que en el barrio México (1).

Medición meteorológica

Para controlar y medir los parámetros de velocidad y dirección del viento, que pueden alterar los resultados arrojados por los sensores, se instaló una estación meteorológica de bajo costo. Esta fue ubicada en la casa vecina al sensor de vía 1 (barrio México). Otro de los aprendizajes del proceso de

14 Ubicación de los sensores que conforman la red barrial en Google Maps: <https://www.google.com/maps/@4.5529874,-74.1362619,17.77z>

FIGURA 21.
Comportamiento de los sensores de bajo costo instalados en los barrios México y Lucero (PM2.5 en ug/ m3)



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

contaminación producidas por el efecto del viento; hacia dónde arrastra la contaminación si es un viento fuerte, si hay poco viento, etc. En general, el comportamiento de la estación meteorológica, instalada el 21 de enero, fue satisfactorio y no hubo percances. Antes de esa fecha fueron utilizados los datos de dirección y velocidad del viento de la estación oficial del Tunal, que se encuentra a 2.7 kilómetros del lugar donde se estableció la de bajo costo.

La avenida Boyacá coincide con la dirección sur-norte del viento de 161° , como se observa en el mapa. Los vientos cercanos a 0° o 180° arrastran la contaminación de la vía en paralelo; es decir, dispersan la contaminación por la avenida y no dentro del barrio. Por esta razón, tendrían poco efecto en la contaminación reportada en los sensores de fondo. Por el contrario, los vientos cercanos a los 90° o 270° llevarían la contaminación dentro de los dos barrios.

El efecto del viento en el arrastre de material particulado es fácilmente visible cuando el viento arrastra la contaminación de oriente a occidente, esto es, del barrio Lucero al barrio México. Lo contrario no ocurrió en los días analizados. Los días 16 y 18 de enero se presentaron vientos fuertes, de 3 m/s (10 km/h), lo cual generó que el material particulado arrastrado llegara hasta la estación de fondo 1, la del barrio México, a una distancia de 130 metros desde la avenida.

En la tabla 10 se puede apreciar que la diferencia de PM_{2.5} entre las estaciones de vía (17.6) y fondo es mínima (16.5), lo que demuestra el efecto de barrido de la contaminación hacia este barrio. Allí se incluyen las fechas de medición, los valores de la suma de todas las emisiones EmiNor-mLuc¹⁵, las emisiones medidas por los sensores instalados y la dirección del viento, con el fin de analizar la relación.

En condiciones de bajo tráfico (domingo) y con medidas de confinamiento para contener la pandemia se tienen —lógicamente— bajas emisiones en la vía. En consecuencia, hay vientos fuertes paralelos a la vía y los valores reportados por el sensor de fondo son muy bajos (tabla 12).

Mientras el viento sea paralelo a la vía (180°), el aumento de la contaminación no llega a los sensores de fondo (tabla 13):

15 Emisiones Normalizadas Lucero: son las emisiones calculadas con el conteo de carros que pasan por el sector Lucero. Se denominan normalizadas porque se multiplican por un factor de 1000.

TABLA 11.
Efecto de barrido de la contaminación según la dirección del viento en el barrio México en horas pico PM

Fecha	EmiNormLuc	PM2.5 Lucero fondo	PM2.5 Lucero vía	Vector viento	PM2.5 México vía	PM2.5 México fondo	EmiNormMex
18/1/2021 17:00:00	60.2	20.1	20.0	→→→→→→→→	17.6	16.5	59.2
16/1/2021 18:00:00	102.0	16.1	16.9	→→→→→→→→	14.7	12.0	57.2
18/1/2021 17:00:00	150.1	27.6	29.9	→→→→→→→→	30.5	26.3	98.0
18/1/2021 18:00:00	128.0	27.5	30.6	→→→→→→→→	30.1	25.7	91.1

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

TABLA 12.
Efecto de tráfico teniendo en cuenta la dirección del viento en el barrio México en el día domingo

Fecha	EmiNormLuc	PM2.5 Lucero fondo	PM2.5 Lucero vía	Vector viento	PM2.5 México vía	PM2.5 México fondo	EmiNormMex
31/1/2021 7:00:00	41.4	4.0	7.2	↑↑↑↑↑↑↑↑	4.3	3.3	45.1
31/1/2021 8:00:00	54.4	55.5	4.5	↑↑↑↑↑↑↑↑	4.8	2.5	45.1
31/1/2021 11:00:00	65.7	3.2	6.2	↑↑↑↑↑↑↑↑	4.5	2.1	52.9
31/1/2021 12:00:00	57.5	5.3	9.2	↑↑↑↑↑↑↑↑	6.1	2.3	41.3
31/1/2021 17:00:00	58.2	9.6	4.7	↑↑↑↑↑↑↑↑	7.1	3.0	39.0
31/1/2021 18:00:00	68.5	18.1	6.0	↑↑↑↑↑↑	6.4	3.7	50.6

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

TABLA 13.
Efecto de tráfico teniendo en cuenta la dirección en 180° del viento en los barrios México y Lucero

Fecha	EmiNormLuc	PM2.5 Lucero fondo	PM2.5 Lucero vía	Vector viento	PM2.5 México vía	PM2.5 México fondo	EmiNormMex	Viento
1/2/2021 7:00:00	117.0	10.8	30.3	↰	13.0	2.5	128.7	0.8
1/2/2021 8:00:00	92.4	10.2	16.8	↰↰	13.8	4.5	124.4	1.1
2/2/2021 7:00:00	118.1	14.7	24.9	↗↗				1.1
2/2/2021 8:00:00	112.3	12.0	23.4	↰	20.3	8.9	113.7	0.4
3/2/2021 7:00:00	128.9	12.7	27.2	↰↗	17.3	5.5	113.6	
3/2/2021 8:00:00	104.7	7.0	13.8	↰↰↗	12.1	3.2	111.1	
1/2/2021 11:00:00	89.4	5.6	24.0	↰↰↗↗↗↗	35.0	2.1	113.1	3.2
1/2/2021 12:00:00	83.3	11.3	23.0	↰↰↰↰↰↰	46.2	1.9	110.9	2.9
1/2/2021 18:00:00	86.4	4.7	14.4	↗↗↗↗↗↗	14.5	4.3	86.3	3.4
2/2/2021 11:00:00	100.0	6.2	12.1	↗↗↗↗↗↗	16.0	4.2	102.9	3.5
2/2/2021 12:00:00	99.5	5.0	8.2	↰↰↰↗↗↗	12.8	2.8	103.4	3.5
2/2/2021 17:00:00	100.7	6.8	18.2	↗↗↗↗↗↗	15.5	4.7	89.8	3.2
2/2/2021 18:00:00	92.0	6.3	19.0	↗↗↗↗↗↗	15.8	3.6	90.0	3.4
3/2/2021 11:00:00	109.9	4.7	13.0	↗↗↗↗↗↗	12.2	5.6	114.1	4.2
3/2/2021 12:00:00	109.2	5.1	10.9	↗↗↗↗↗↗	13.6	4.0	111.0	5.2
3/2/2021 17:00:00	125.6	6.8	12.7	↗↗↗↗↗↗	14.0	3.6	122.7	3.2

FUENTE: Daniel Bernal, 2021

Las tablas anteriores muestran el alto efecto que tiene el tráfico de la vía en la calidad del aire del sector. Particularmente, evidencian que la dirección del viento lleva una alta carga contaminante barrio adentro.

Estudio de tráfico

Con el fin de determinar el aporte (o cantidad) de emisiones que se reportan en los sensores puestos sobre la vía (1 y 2), era necesario contar los vehículos que transitaban por la avenida Boyacá, así como identificar de qué tipo eran (*caracterización*). Con estos datos se generó un *estudio de tráfico*, que muestra el comportamiento de los diferentes factores que inciden en la problemática de contaminación atmosférica. Dicho estudio, a su vez, se utilizó para diseñar estrategias de mitigación.

Para lograr este objetivo, y dado que el conteo no se podía realizar de manera presencial por la contingencia por COVID-19, se instaló un cámara de video en el costado del barrio México (1). Para el barrio Lucero (2) fue posible acceder a los datos de una cámara de vigilancia, de propiedad de los residentes de la vivienda. Dos ciudadanos voluntarios fueron capacitados en el manejo de las cámaras y la recolección de los datos. No obstante, en el punto del barrio Lucero se perdió mucha información porque la recopilación tuvo problemas de consistencia y permanencia. Con todo, de los datos obtenidos del cruce de sensores y conteo vehicular, se seleccionaron los mejores siete días para el análisis, los cuales aparecen en la tabla 14. Se logró

TABLA 14.
Relación de datos obtenidos en los barrios México y Lucero para realizar el aforo vehicular

Día	Estado de la localidad Ciudad Bolívar	Hora pico a.m.	Hora valle a.m.	Hora pico p.m.
Sábado 16 de enero	Cuarentena estricta	8:00 y 9:00	11:00 y 12:00	17:00 y 18:00
Lunes 18 enero	Cuarentena estricta	7:00 y 8:00	11:00 y 12:00	17:00 y 18:00
Lunes 25 enero	Cuarentena estricta	7:00 y 8:00	11:00 y 12:00	17:00 y 18:00
Domingo 31 enero	Normalidad	7:00 y 8:00	11:00 y 12:00	17:00 y 18:00
Lunes 1 febrero	Normalidad	7:00 y 8:00	11:00 y 12:00	17:00 y 18:00
Martes 2 febrero	Normalidad	7:00 y 8:00	11:00 y 12:00	17:00 y 18:00
Miércoles 3 febrero	Normalidad	7:00 y 8:00	11:00 y 12:00	17:00 y 18:00

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

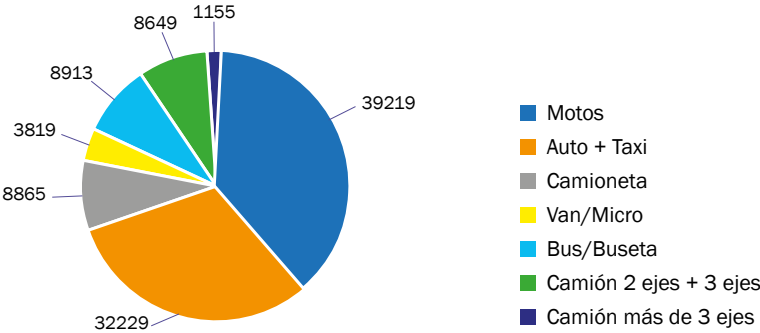
conseguir datos de tres lunes, los días de mayor tráfico, dos de ellos en cuarentena estricta, lo cual permitió observar el cambio entre cuarentena y normalidad. También se obtuvieron cuatro días seguidos de monitoreo.

La división de las categorías y el cálculo de los resultados del aforo vehicular se realizó según la propuesta de Zamudio, 2016:

La metodología utilizada para la determinación de los factores de emisión corresponde al protocolo definido en el proyecto IVE (ISSRC, 2004), el modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE) es usado como herramienta de cálculo para la estimación de inventarios de emisiones de fuentes vehiculares ... Los factores de emisión obtenidos con cálculos y promedios ponderados se resumen en la tabla 3-3 (Zamudio, 2016, p. 59).

Para el experimento, se identificaron las siguientes siete categorías:

FIGURA 23.
Cantidad total de vehículos contados en los barrios Lucero y México



FUENTE: Alba Sandoval, 2021.

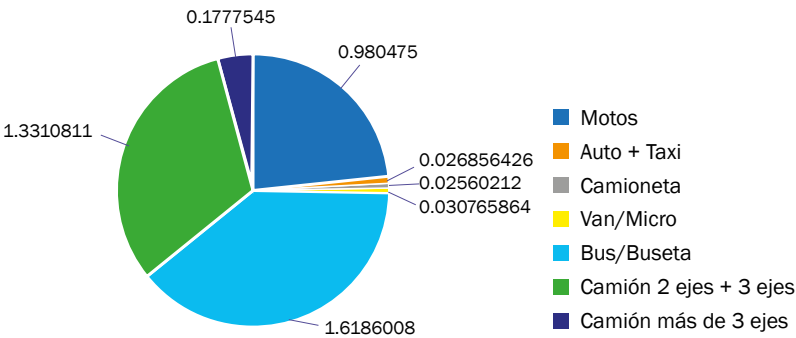
Los resultados del conteo vehicular se multiplican por el factor de emisión (tabla 15), con lo cual se obtuvieron las emisiones totales según las horas del cruce de datos o *emisiones totales horarias*.

TABLA 15.
Factores de emisión obtenidos con cálculos
y promedios ponderados

Factores de emisión	
Categoría	PM2.5 (mg.m-1s-1)
Moto	0,000025
Vehículo particular pequeño	8,333E-07
Taxi	8,333E-07
Camioneta	2,888E-06
Microbus	8,056E-06
Bus + Buseta	0,0001816
Camión pequeño 2C P	0,0001569
Camión pequeño 2C G	0,0001539
Camión mediano C3 y C4	0,0001539
Camión grande >= C5	0,0001539
Transmilenio = TM	8.167E-05
	8,167E-05

FUENTE: Zamudio, 2016.

FIGURA 24.
Cantidad total de emisiones de vehículos aforados
en los barrios México y Lucero



FUENTE: Alba Sandoval, 2021.

TABLA 16.
Factores de emisión obtenidos diariamente del aforo en los barrios México y Lucero

N°	Fecha	Horas de aforo											
		7:00		8:00		11:00		12:00		17:00		18:00	
		Emisiones MEX	Emisiones LUC	Emisiones MEX	Emisiones LUC	Emisiones MEX	Emisiones LUC	Emisiones MEX	Emisiones LUC	Emisiones MEX	Emisiones LUC	Emisiones MEX	Emisiones LUC
1	31/01/2021	0.0451	0.0414	0.0451	0.0544	0.0529	0.0657	0.0413	0.0575	0.039	0.0582	0.0506	0.0685
2	1/02/2021	0.1287	0.117	0.1244	0.0924	0.1131	0.0894	0.1109	0.0833	0.1145	0.0849	0.0863	0.0864
3	2/02/2021	0.1387	0.1181	0.1137	0.1123	0.1029	0.	0.1034	0.0995	0.0898	0.1007	0.09	0.092
4	3/02/2021	0.1136	0.1289	0.1111	0.1047	0.1141	0.1099	0.111	0.1092	0.1227	0.1256	0.1217	0.1215
5	16/01/2021	0	0	0.0865	0.1017	0.073	0.099	0.0744	0.095	0.0592	0.0602	0.0572	0.102
6	18/01/2021	0.141	0.1058	0.0907	0.1009	0.1022	0.1226	0.0932	0.1465	0.098	0.1501	0.0911	0.128
7	25/01/2021	0.1171	0.1171	0.0108	0.108	0.0971	0.0971	0.1135	0.0957	0.1294	0.1191	0.1213	0.1193

FUENTE: Alba Sandoval, 2021.

Los mayores inconvenientes, de todas formas, se presentaron con la grabación del tráfico. Para llevarla a cabo, un ciudadano debía iniciar la grabación manualmente a las 6 a.m., apagarla a las 6 p.m. y cambiar la tarjeta SD de la cámara. Sin embargo, este proceso no tuvo la regularidad esperada. Por su parte, para el caso del sensor de fondo 2 el problema fue la grabación en el DVR y el manejo del recurso tecnológico. El ciudadano afirmó que la cámara grababa un mes; sin embargo, en realidad solo grababa siete días y sobrescribía sobre el material anterior. Por esto, cuando se recogió la información se habían perdido los datos de 15 días. También resultó ser un inconveniente la transferencia de los videos a las memorias USB proporcionadas a los voluntarios, porque en múltiples ocasiones no grababan los archivos apropiados o no grabaron nada.

Resultado final

En resumen, la ejecución final del experimento fue la siguiente:

1. Sensor de vía 1 (barrio México): instalado y en funcionamiento desde 4 de noviembre de 2020.
2. Sensor de fondo 1 (barrio México): instalado y en funcionamiento desde 4 de noviembre de 2020.
3. Sensor de vía 2 (barrio Lucero): instalado y en funcionamiento desde el 13 de enero de 2021.
4. Sensor de fondo 2 (barrio Lucero): instalado y en funcionamiento desde el 13 de enero de 2021. Sin embargo, el 11 de febrero fue desconectado por decisión unilateral de los habitantes de la casa.
5. Estación meteorológica instalada en el barrio México el 21 de enero de 2020.
6. Cámara instalada para grabar el tráfico desde el barrio México (dirección sur-norte) desde el 13 de enero de 2021 y operada manualmente.
7. Cámara de vigilancia con DVR (grabador de video), con capacidad para grabar durante siete días continuos (dirección nortesur).

Los valores del conteo vehicular, los del material particulado (según los cuatro sensores) y la dirección y velocidad del viento medidas por la estación meteorológica se compararon, según el horario de los datos recopilados, para verificar el efecto de la avenida Boyacá sobre la calidad del aire que respiran los vecinos de los barrios México y Lucero.

TABLA 17.
Factores de emisión obtenidos del aforo en los barrios México y Lucero vs. estación meteorológica con relación al factor del viento

Num	Fecha	EmiNormLuc	PM2.5 Lucero	PM2.5 Lucero	PM2.5 México	Vector Viento	PM2.5 México	PM2.5 México	EmiNormMex	Viento	Dirección Viento (O)
Sábado 16 enero CUARENTENA											
1	16/1/2021 8:00:00	101.7	26.6	32.7	↗↗		31.1	17.6	86.5	1.1	218.0
2	16/1/2021 9:00:00	101.6	25.6	26.4	↘↘		30.5	22.5	64.2	1.0	22.0
3	16/1/2021 11:00:00	99.0	19.6	21.5	↗↘↘		24.1	17.4	73.0	1.4	298.0
4	16/1/2021 12:00:00	95.0	16.0	20.2	↘↘↘		30.0	13.3	74.4	1.4	308.0
5	16/1/2021 17:00:00	60.2	20.1	20.0	↗↗↗↗↗↗↗		17.6	16.5	59.2	3.3	282.0
6	16/1/2021 18:00:00	102.0	16.1	16.9	↗↗↗↗↗↗↗		14.7	12.0	57.2	3.0	268.0
Lunes 18 enero CUARENTENA											
7	18/1/2021 7:00:00	105.8	16.2	26.6	↗		22.1	6.9	141.0	0.7	214.0
8	18/1/2021 8:00:00	100.9	24.5	33.3	↗↗		28.0	15.4	90.7	1.1	202.0
9	18/1/2021 11:00:00	122.6	23.7	25.7	↘↘↘		27.7	20.6	102.2	1.3	322.0
10	18/1/2021 12:00:00	146.5	17.3	18.1	↘↘↘		17.5	10.6	93.2	1.1	18.0
11	18/1/2021 17:00:00	150.1	27.6	29.9	↗↗↗↗↗↗↗		30.5	26.3	98.0	3.1	269.0
12	18/1/2021 18:00:00	128.0	27.5	30.6	↗↗↗↗↗		30.1	25.7	91.1	2.7	290.0
Lunes 25 enero CUARENTENA											
13	25/1/2021 7:00:00	117.1	7.3	25.0	↗↗↗		11.5	2.5	117.1	1.7	196.0
14	25/1/2021 8:00:00	108.0	17.2	21.0	←		9.2	3.3	108.0	0.6	79.7
15	25/1/2021 11:00:00	97.1	12.9	10.2	↗↗↗↗↗↗		9.4	1.3	97.1	2.8	156.0
16	25/1/2021 12:00:00	95.7	5.5	8.9	↗↗↗↗↗↗		13.7	2.1	113.5	2.9	159.8
17	25/1/2021 17:00:00	119.1	4.7	29.0	↗↗↗↗		15.1	4.5	129.4	2.1	217.9
18	25/1/2021 18:00:00	119.3	6.9	28.7	↗↗↗↗↗↗		14.6	4.5	121.3	2.8	209.3

Num	Fecha	EmiNormLuc	PM2.5 Lucero	PM2.5 Lucero	Vector Viento	PM2.5 México	PM2.5 México	EmiNormMex	Viento	Dirección Viento (O)
Domingo 31 enero NORMAL										
19	31/1/2021 7:00:00	41.4	4.0	7.2	↑↑↑↑↑↑	4.3	3.3	45.1	3.0	188.4
20	31/1/2021 8:00:00	54.4	5.5	4.5	↑↑↑↑↑↑↑↑	4.8	2.5	45.1	3.8	182.9
21	31/1/2021 11:00:00	65.7	3.2	6.2	↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑	4.5	2.1	52.9	5.1	185.7
22	31/1/2021 12:00:00	57.5	5.3	9.2	↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑	6.1	2.3	41.3	5.8	171.1
21	31/1/2021 17:00:00	58.2	9.6	4.7	↑↑↑↑↑↑↑↑↑	7.1	3.0	39.0	3.5	162.1
24	31/1/2021 18:00:00	68.5	18.1	6.0	↑↑↑↑↑	6.4	3.7	50.6	2.6	168.0
Lunes 1 febrero NORMAL										
25	1/2/2021 7:00:00	117.0	10.8	30.3	↻	13.0	2.5	128.7	0.8	157.8
26	1/2/2021 8:00:00	92.4	10.2	16.8	↵↻	13.8	4.5	124.4	1.1	110.8
27	1/2/2021 11:00:00	89.4	5.6	24.0	↻↻↑↑↑↑	F35.0	2.1	113.1	3.2	160.8
28	1/2/2021 12:00:00	83.3	11.3	23.0	↻↻↻↻↻	46.2	1.9	110.9	2.9	131.4
29	1/2/2021 17:00:00	84.9	6.4	15.4	↻↻↻↻	25.0	5.7	114.5	2.2	152.6
30	1/2/2021 18:00:00	86.4	4.7	14.4	↻↻↻↻↻↻	14.5	4.3	86.3	3.4	215.7
Martes 2 febrero NORMAL										
31	2/2/2021 7:00:00	118.1	14.7	24.9	↑↑	17.6	5.2	138.7	1.1	184.9
32	2/2/2021 8:00:00	112.3	12.0	23.4	↵	20.3	8.9	113.7	0.4	93.8
33	2/2/2021 11:00:00	100.0	6.2	12.1	↑↑↑↑↑↑↻↻	16.0	4.2	102.9	3.5	195.8
34	2/2/2021 12:00:00	99.5	5.0	8.2	↻↻↻↑↑↑↑	12.8	2.8	103.4	3.5	167.3
35	2/2/2021 17:00:00	100.7	6.8	18.2	↑↑↑↑↑↻	15.5	4.7	89.8	3.2	194.3
36	2/2/2021 18:00:00	92.0	6.3	19.0	↑↑↑↑↑↑↻↻	15.8	3.6	90.0	3.4	193.3

Num	Fecha	EmiNormLuc			PM2.5 Lucero	PM2.5 Lucero	PM2.5 Lucero	PM2.5 México	Vector Viento	PM2.5 México	PM2.5 México	EmiNormMex	Viento	Dirección Viento (O)
Miércoles 3 febrero NORMAL														
37	3/2/2021 7:00:00	128.9			12.7	27.2	κ	17.3			5.5	113.6	1.2	167.9
38	3/2/2021 8:00:00	104.7			7.0	13.8	κκ	12.1			3.2	111.1	1.6	164.9
39	3/2/2021 11:00:00	109.9			4.7	13.0	↑↑↑↑↑↑↑↑	12.2	↑↑↑↑↑↑↑↑		5.6	114.1	4.2	174.0
40	3/2/2021 12:00:00	109.2			5.1	10.9	↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑	13.6	↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑		4.0	111.0	5.2	186.8
41	3/2/2021 17:00:00	125.6			6.8	12.7	↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑	14.0	↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑		3.6	122.7	3.2	170.6
42	3/2/2021 18:00:00	121.5			8.8	15.2	κκκκκκ	16.9			4.9	121.7	2.3	145.8

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

La tabla 17 muestra los resultados del análisis de los factores de emisión y los datos recopilados de los sensores y la estación meteorológica. En la primera columna se presentan las fechas de medición. En la segunda se incluyen los valores de la suma de todas las emisiones (EmiNormLuc); estos fueron multiplicados por un factor de mil (1000), lo que permite obtener datos y gráficas más fácilmente comparables por el tamaño de los números. En las siguientes columnas se incorporan los datos de las mediciones de vía y fondo de México y Lucero, así como la intensidad y dirección de los vientos. Como se puede observar, la contaminación alcanza no solamente a la población que permanece sobre la vía, sino también a la que está dentro del barrio México. Allí se nota cómo el viento que va en la dirección de Lucero a México (oriente-occidente) arrastra las emisiones hacia el interior de este último barrio.

Para facilitar el análisis, se totalizaron los valores de emisiones de ambos lados, calculados a partir del estudio de tráfico vehicular. Igualmente, se calcularon las mediciones de los sensores de vía y fondo para buscar correlaciones (tabla 18).

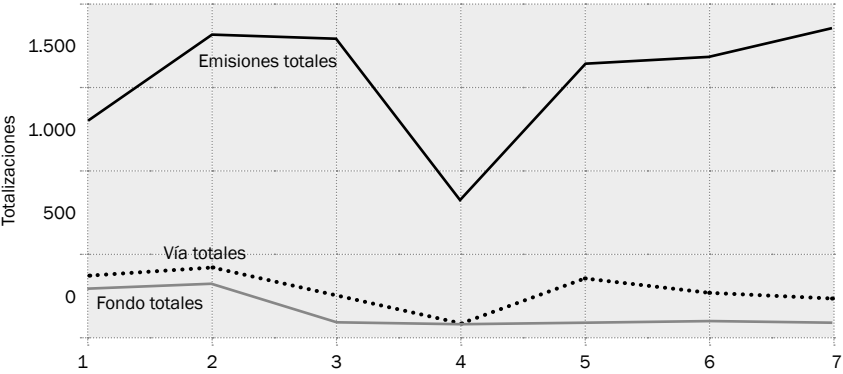
TABLA 18.
Valores totales de factores de emisión y mediciones de PM2.5 con sensores de bajo costo (de fondo y vía) en los barrios México y Lucero

Nº	Fecha	Emisiones totales	Medición total de PM2.5 de sensores de fondo	Medición total de PM2.5 de sensores de vía
1	31/01/2021	974.1	223.4	285.5
2	1/02/2021	1370.2	242.2	320.1
3	2/02/2021	1342.7	72.5	196.5
4	3/02/2021	619.6	62.6	71.0
5	16/01/2021	1231.3	69.8	271.2
6	18/01/2021	1261.1	80.4	203.7
7	25/01/2021	1393.8	71.9	179.9

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Para buscar correlaciones en el análisis, se totalizaron los valores de las emisiones diarias del tráfico reportado en ambos lados de la avenida Boyacá, así como las mediciones diarias de los sensores de vía y fondo (tabla 19).

FIGURA 25.
Número de días vs. valores totales de factores de emisión
y mediciones de PM2.5 con sensores de bajo costo (de fondo y vía)
en los barrios México y Lucero



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

TABLA 19.
Valores totales de factores de emisión de tráfico y mediciones de PM2.5
con sensores de bajo costo (de fondo y vía)

Nº	Fecha	Barrio México			Barrio Lucero		
		Emisiones totales	Total PM2.5 sensor vía	Total PM2.5 sensor fondo	Emisiones totales	Total PM2.5 sensor vía	Total PM2.5 sensor fondo
1	31/01/2021	414.50	147.80	99.30	559.60	137.60	124.00
2	1/02/2021	616.30	155.90	105.40	753.90	164.10	136.80
3	2/02/2021	686.30	73.60	18.10	656.30	122.90	54.50
4	3/02/2021	273.90	33.10	16.90	345.60	37.80	45.70
5	16/01/2021	677.90	147.50	20.80	553.40	123.80	49.00
6	18/01/2021	638.60	97.90	29.40	622.60	105.80	51.00
7	25/01/2021	694.10	86.20	26.90	699.70	92.90	45.00

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

La tabla 20 muestra la comparación entre las emisiones del tráfico y los datos que arrojaron los sensores de vía y de fondo.

En el segundo valor de correlación de la tabla 18 se resalta la relación directa entre las emisiones del tráfico y el sensor de vía (2) del barrio Lucero, al lado occidental de la avenida Boyacá. Esto tiene sentido, pues las emisiones de los vehículos medidas por el sensor son la fuente de material

TABLA 20.
Análisis comparativo entre las emisiones del tráfico
y los valores de PM2.5 con los sensores de vía y fondo
según el factor de correlación de Pearson

Emisiones	vs	Valor PM 2.5	Valor Correlación	Análisis
Emisiones Lucero	vs	Sensor Lucero fondo	0.36	Las emisiones de Lucero poco afectan los valores reportados en el sensor de fondo Lucero
Emisiones Lucero	vs	Sensor Lucero vía	0.75	Las emisiones de Lucero afectan directamente el sensor de vía Lucero
Emisiones Lucero	vs	Sensor México vía	0.51	Las emisiones de México afectan medianamente el sensor de vía México
Emisiones Lucero	vs	Sensor México fondo	0.37	Las emisiones de Lucero poco afectan los valores en el sensor fondo México
Emisiones Lucero	vs	Emisiones México	0.8	Las emisiones de Lucero y México están relacionadas
Emisiones México	vs	Sensor México fondo	-0.17	Las emisiones de México no afectan los valores en el sensor fondo de México
Emisiones México	vs	Sensor México vía	0.33	Las emisiones de México poco afectan los valores en el sensor de México vía
Emisiones México	vs	Sensor Lucero fondo	0.52	Las emisiones de México afectan medianamente los valores en el sensor fondo de Lucero
Emisiones México	vs	Sensor Lucero vía	-0.17	Las emisiones de México no afectan los valores en el sensor fondo de Lucero

FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

particulado que más contribuye. En el extremo contrario, el séptimo valor de esa misma columna muestra una baja correlación entre las emisiones en el barrio México y su sensor de vía (1). En este caso se tuvo que hacer una revisión exhaustiva de los datos, porque los resultados no son los esperados.

Este fenómeno tiene dos posibles explicaciones. Por un lado, por esta vía transitaban las volquetas que salían de las minas cargadas con material de construcción, lo que aumentaba la resuspensión del material en el sentido oriental de la avenida Boyacá (barrio México). Este aporte de material es diferente al que realiza la combustión de los vehículos. Por el otro lado, hay que considerar la proximidad de ambos sensores con un retorno vehicular, a 5 metros de la casa del sensor de vía de Lucero y a aproximadamente 20 metros de la casa del sensor de vía de México. Esto se muestra en las siguientes fotografías:

FIGURA 26.
Retorno sur-norte en la avenida Boyacá
(como posible causa de la poca correlación de los datos)



FUENTE: Daniel Bernal, 2021.

Encerrado en el círculo 3, se puede apreciar el vehículo que está usando dicho retorno. Todos esos vehículos se contaron y sumaron al conteo del barrio Lucero. El círculo1 señala la casa del barrio México donde están

FIGURA 27.
Mapa de la vía que conecta los barrios México y Lucero



FUENTE: Daniela Cardona, 2022.

la otra cámara y el sensor, a unos 20 metros del retorno. Dada la inconsistencia encontrada en los datos, la duda que surgió fue ¿cómo influyen las emisiones vehiculares en el sensor de vía 1 (México), dado que la cámara no permitía incluir esos vehículos en el conteo de ese lado? Esta pregunta no obtuvo respuesta durante el experimento, porque no fue claro si los vehículos que usan el retorno del lado del barrio Lucero deben sumarse con una equivalencia igual que los que pasan por el lado de México. Se recomienda, entonces, que este punto sea objeto de un análisis posterior más detallado.

En general, el experimento demostró que los datos recopilados superan por mucho los niveles máximos de contaminación permitidos en la legislación colombiana, los cuales, como se vio, son mucho más laxos que las recomendaciones de la OMS. Pese a eso, la presencia de las secretarías distritales de Ambiente, Salud y Movilidad en la zona no es tan perceptible en términos de intervenciones visibles o planes de descontaminación específicos para material particulado.

Aunque la aspiración de este experimento era vincular de forma activa a la ciudadanía, el tema de calidad del aire parece no ser un problema relevante para ella, por lo menos no al punto de lograr una amplia convocatoria. Hay que considerar, igualmente, que los aislamientos preventivos por COVID-19 jugaron un papel determinante, y la coyuntura no pudo ser más adversa para el desarrollo de los experimentos en campo. Así, es probable que otras condiciones permitan una mayor participación ciudadana.

De todas formas, estos ejercicios sirvieron para identificar algunas de las variables que deben ser tenidas en cuenta para poner en marcha redes barriales de calidad del aire. Para empezar, es necesario hacer un ejercicio comunitario previo con líderes para identificar y formular el problema. Se requiere trabajo comunitario para mostrar la seriedad del problema y vincular a las personas en la concreción de la(s) metodología(s) de trabajo. En este caso se contó con la colaboración de un líder social de Ciudad Bolívar, quien nos abrió las puertas de su comunidad.

También el contexto es determinante para el éxito y la estabilidad de los experimentos. Por ejemplo, la introducción de dispositivos no conocidos fue considerada como una amenaza por algunos ciudadanos. Algunos sugirieron que podían ser elementos para espionaje o que les generarían grandes gastos (por consumo de energía e internet). Así, también, las condiciones de seguridad y de percepción son claves para generar confianza. Incluso el clima es una variable que puede modificar estructuralmente los

TABLA 21.
Excedencias (superación de límites permisibles) en los barrios México y Lucero

Fecha	VALOR MATERIAL PARTICULADO PM2.5 (ug/m³)					
	Lucero Fondo	Lucero Vía	México Vía	México Fondo	Oficial Tunal	
1	2020-11-14 00:00:00	16	14	35	24	19
2	2020-11-15 00:00:00	14	10	25	21	16
3	2020-11-16 00:00:00	12	9	17	13	10
4	2020-11-17 00:00:00	21	10	30	13	9
5	2020-11-18 00:00:00	16	11	33	12	9
6	2020-11-19 00:00:00	7	7	31	16	11
7	2020-11-20 00:00:00		4	38	11	9
8	2020-11-21 00:00:00		8	33	7	6
9	2020-11-24 00:00:00		14	34	15	6
10	2020-11-25 00:00:00		10	31	15	10
11	2020-11-26 00:00:00		15	45	26	19
12	2020-11-27 00:00:00		18	46	27	18
13	2020-11-28 00:00:00		14	29	14	13
14	2020-11-29 00:00:00		5	10	8	3
15	2020-11-30 00:00:00		9	32	3	3
16	2020-12-01 00:00:00		9	30	9	8
17	2020-12-02 00:00:00		14	39	4	3
18	2020-12-03 00:00:00		12	37	17	14
19	2020-12-04 00:00:00		13	38	6	6

EXCEDENCIA DEL LIMITE DIARIO OMS 2021: 15µg/m³					
Lucero Fondo	Lucero Vía	México Vía	México Fondo	Oficial	
SI	NO	SI	SI	SI	
NO	NO	SI	SI	SI	
NO	NO	SI	NO	NO	
SI	NO	SI	NO	NO	
SI	NO	SI	NO	NO	
NO	NO	SI	SI	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	SI	SI	NO	
	NO	SI	SI	NO	
	SI	SI	SI	SI	
	SI	SI	SI	SI	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	NO	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	SI	SI	NO	
	NO	SI	SI	NO	
	NO	SI	SI	NO	
	NO	SI	SI	NO	
	NO	SI	SI	NO	

Fecha	VALOR MATERIAL PARTICULADO PM2.5 (ug/m³)				
	Lucero Fondo	Lucero Vía	México Vía	México Fondo	Oficial Tunal
20	2020-12-05 00:00:00	8	37	5	4
21	2020-12-06 00:00:00	3	11	3	3
22	2020-12-07 00:00:00	17	32	11	9
23	2020-12-08 00:00:00	19	18	13	13
24	2020-12-09 00:00:00	13	37	12	9
25	2020-12-10 00:00:00	19	47	25	20
26	2020-12-11 00:00:00	19	37	18	15
27	2020-12-12 00:00:00	14	24	8	7
28	2020-12-13 00:00:00	5	9	6	4
29	2020-12-14 00:00:00	10	23	6	6
30	2020-12-15 00:00:00	17	39	9	10
31	2020-12-16 00:00:00	10	25	6	5
32	2020-12-17 00:00:00	8	23	4	3
33	2020-12-18 00:00:00	9	24	5	5
34	2020-12-19 00:00:00	13	24	8	11
35	2020-12-20 00:00:00	4	8	3	2
36	2020-12-21 00:00:00	13	26	8	9
37	2020-12-22 00:00:00	14	26	5	6
38	2020-12-23 00:00:00	16	26	10	13
39	2020-12-24 00:00:00	8	14	7	7

EXCEDENCIA DEL LIMITE DIARIO OMS 2021: 15µg/m³					
Lucero Fondo	Lucero Vía	México Vía	México Fondo	Oficial	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	NO	NO	NO	
	SI	SI	NO	NO	
	SI	SI	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	SI	SI	SI	SI	
	SI	SI	SI	SI	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	NO	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	SI	SI	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	NO	NO	NO	
	SI	SI	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	NO	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	NO	SI	NO	NO	
	SI	SI	NO	NO	
	NO	NO	NO	NO	

Fecha		VALOR MATERIAL PARTICULADO PM2.5 (ug/m³)				
		Lucero Fondo	Lucero Vía	México Vía	México Fondo	Oficial Tunal
40	2020-12-25 00:00:00		7	19	18	13
41	2020-12-26 00:00:00		5	13	7	6
42	2020-12-27 00:00:00		5	11	6	5
43	2020-12-28 00:00:00		8	19	11	8
44	2020-12-29 00:00:00		4	24	18	16
45	2021-01-14 00:00:00	25	28	25		12
46	2021-01-15 00:00:00	26	28	26	22	14
47	2021-01-16 00:00:00	22	24	22	17	12
48	2021-01-17 00:00:00	16	15	13	11	10
49	2021-01-18 00:00:00	18	22	19	13	8
50	2021-01-19 00:00:00	14	21	17	11	10
51	2021-01-20 00:00:00	17	23	19	10	8
52	2021-01-21 00:00:00	13	17	15	8	7
53	2021-01-22 00:00:00	11	20	16	15	7
54	2021-01-23 00:00:00	8		12	5	3
55	2021-01-24 00:00:00	6		6	4	3
56	2021-01-25 00:00:00	8	17	11	4	4
57	2021-01-26 00:00:00	14	21	18	11	7
58	2021-01-27 00:00:00	11	16	15	6	5
59	2021-01-28 00:00:00	26	28	25	17	14
60	2021-01-29 00:00:00	19	24	22	15	16

EXCEDENCIA DEL LIMITE DIARIO OMS 2021: 15ug/m³						
Lucero Fondo	Lucero Vía	México Vía	México Fondo	Oficial		
	NO	SI	SI	NO		
	NO	NO	NO	NO		
	NO	NO	NO	NO		
	NO	SI	NO	NO		
	NO	SI	SI	SI		
SI	SI	SI	NO	NO		
SI	SI	SI	SI	NO		
SI	SI	SI	SI	NO		
SI	SI	NO	NO	NO		
SI	SI	SI	NO	NO		
NO	SI	SI	NO	NO		
SI	SI	SI	NO	NO		
NO	SI	SI	SI	NO		
NO	SI	SI	SI	NO		
NO	NO	NO	NO	NO		
NO	SI	NO	NO	NO		
NO	SI	SI	SI	NO		
SI	SI	SI	SI	SI		
SI	SI	SI	SI	SI		

Fecha	VALOR MATERIAL PARTICULADO PM2.5 (ug/m³)					
	Lucero Fondo	Lucero Via	México Via	México Fondo	Oficial Tunal	
61	2021-01-30 00:00:00	9	13	12	15	6
62	2021-01-31 00:00:00	7	8	6	4	4
63	2021-02-01 00:00:00	8	16	14	4	3
64	2021-02-02 00:00:00	9	17	14	6	5
65	2021-02-03 00:00:00	9	15	14	6	4
66	2021-02-04 00:00:00	12	18	16	7	6
67	2021-02-05 00:00:00	7	13	13	5	4
68	2021-02-06 00:00:00	11	16	13	7	7
69	2021-02-07 00:00:00	8	11	8	6	5
70	2021-02-08 00:00:00	12	17	15	7	6
71	2021-02-09 00:00:00	25	33	30	18	14
72	2021-02-10 00:00:00	15	20	23	12	10
73	2021-02-11 00:00:00	24	27	26	20	14
74	2021-02-12 00:00:00		24	23	12	12
75	2021-02-13 00:00:00		17	15	8	7
76	2021-02-14 00:00:00		21	21	17	15
77	2021-02-15 00:00:00		25	22	11	10
78	2021-02-16 00:00:00		27	29	17	12
PROMEDIO		14.2	14.7	23.1	11.0	8.8

Fuente: Daniel Bernal, 2022.

EXCEDENCIA DEL LIMITE DIARIO OMS 2021: 150g/m³					
Lucero Fondo	Lucero Vía	México Vía	México Fondo	Oficial	
NO	NO	NO	SI	NO	
NO	NO	NO	NO	NO	
NO	SI	NO	NO	NO	
NO	SI	NO	NO	NO	
NO	SI	NO	NO	NO	
NO	SI	SI	NO	NO	
NO	NO	NO	NO	NO	
NO	SI	NO	NO	NO	
NO	NO	NO	NO	NO	
NO	SI	SI	NO	NO	
NO	SI	SI	SI	NO	
SI	SI	SI	NO	NO	
	SI	SI	SI	NO	
	SI	SI	NO	NO	
	SI	SI	NO	NO	
	SI	SI	SI	SI	
	SI	SI	NO	NO	
	SI	SI	SI	SI	
	SI	SI	SI	SI	
	SI	SI	SI	SI	
14/35	36/78	59/78	22/78	9/78	

datos. Por esto, el experimento se realizó en las fechas que suele haber clima seco. Por último, es ideal que la comunidad se vincule en la recolección y el análisis de datos. Esto no fue posible en esta ocasión, pero es importante tenerlo en cuenta para futuras experimentaciones.

La anterior tabla muestra el promedio diario de material particulado PM2.5 según los sensores de tráfico y fondo y la estación oficial más cercana (Tunal). Es decir, allí se consideran todos los sensores comparados que son de la misma marca y tienen mismas características, así como los de la estación de monitoreo, como referencia de los datos públicos. Los promedios de medición totales y el número de veces que fue superado el límite diario máximo recomendado por la OMS (2021) de PM2.5 (15 ug/m3) son:

TABLA 22.
Promedios de medición totales y excedencias diarias/días

Sensores	Promedios de medición totales	Excedencias diarias/días monitoreados
Sensor fondo Lucero	14.2	14/35
Sensor vía Lucero	14.7	36/78
Sensor vía México	23.1	59/78
Sensor fondo México	11.0	22/78
Sensor oficial Tunal	8.8	9/78

FUENTE: Daniel Bernal, 2022.

FIGURA 28.
Salida de volquetas de canteras y cementeras por la avenida Boyacá (sentido sur-norte)



FUENTE: Google Maps, 2018.

Como se observa, las mediciones del sensor de vía México son 64% mayores que las del sensor de vía Lucero; se evidencian casi tres veces más excedencias. ¿Cuál es la razón más probable? La causa de una diferencia tan alta no puede ser una diferencia del tráfico, porque el conteo de tráfico de ambos lados es similar. Tampoco se le puede atribuir a las condiciones de los sensores, porque están instalados a una altura similar. La razón más lógica, entonces, es la alta contaminación del aire. Esta es, de hecho, la queja constante de los vecinos del barrio México, y está causada por el mal transporte de la arena y los productos de la cantera vecina que arroja residuos en la avenida.

En todas las visitas realizadas se pudo observar la alta concentración de arena y polvo en el sector México. Además, la resuspensión de material particulado es altísima, permanente y muy peligrosa para la salud de los vecinos de la avenida. En varias de nuestras visitas las medidas fueron alarmantes, con picos de hasta 900 ug/m³, el valor más alto que han registrado los sensores de bajo costo en la ciudad.

Socialización con la comunidad del barrio México sobre el problema de la calidad del aire y el experimento

Uno de los mayores desafíos para el proyecto, cuya esencia era la participación de la ciudadanía, fue la pandemia por COVID-19 y las consecuentes medidas de confinamiento. Por esto, al inicio de este no fue posible generar encuentros presenciales grupales con la comunidad. Fue con el proceso de instalación y cuidado de los sensores para la medición de material particulado, la estación meteorológica y el conteo de vehículos que se hizo el primer acercamiento con la ciudadanía interesada. Sin embargo, la asistencia fue muy limitada para evitar contagios. Más adelante, durante el mes de agosto, se realizaron acciones previas a la socialización; se ubicó una infografía en diferentes establecimientos y puntos estratégicos del barrio para que fuera de lectura pública.

Luego de esto, se convocó a la comunidad de los barrios México y Lucero a un taller de socialización de resultados de la red barrial de la calidad del aire, que estaba programado para el día 1 de septiembre de 2021 y se llevó a cabo en el salón comunal del barrio México. La convocatoria se hizo mediante el voz a voz, así como a través de invitaciones impresas para apoyar la divulgación. Allí asistieron líderes comunitarios de los barrios, contratistas de la alcaldía local y de la Oficina de Participación, Educación y Localidades (OPEL) de la SDA, un edil, docentes y la comunidad interesada.

Durante la sesión, se realizó una fase introductoria para explicar la importancia de la buena calidad del aire, así como cuáles son los contaminantes atmosféricos y sus impactos en la salud y el ambiente. También se explicó cómo funciona el IBOCA y cuál es su relación con los resultados de la red barrial. El proyecto fue explicado en detalle a través de una metodología participativa de cartografía social, en el cual los asistentes ubicaban su lugar de vivienda respecto a los puntos de medición. De esta manera, identificaban qué tan expuestos estaban a la contaminación del aire según los datos recopilados en el experimento. El proyecto generó gran expectativa en la comunidad, que se mostró dispuesta a difundir la información obtenida, así como a trabajar para mejorar las condiciones ambientales de la zona.

Dificultades comunes a los tres experimentos

En el desarrollo del estudio encontramos dificultades comunes asociadas al ejercicio científico ciudadano, unas de carácter técnico y otras desde el ámbito social. A continuación se presentan a detalle.

Dificultades técnicas en las instalaciones de los sensores

Las siguientes fueron las dificultades que se presentaron en el desarrollo de los tres experimentos:

- 1. Conectividad.** A pesar de que las instalaciones se realizaron en zonas urbanas de Bogotá, lograr que en un estrato socioeconómico de la localidad de Ciudad Bolívar haya conectividad wifi no es fácil. Las condiciones socioeconómicas de la población, la desconfianza, la cuarentena y la falta de conciencia frente a la problemática de la calidad del aire no permitieron acceder con facilidad a una conexión a internet. También hay que considerar que en estos momentos de pandemia había empeorado el servicio de internet en muchos sectores de la ciudad, especialmente en el sur. Otra dificultad de conectividad es el acceso a alimentación eléctrica. Por ejemplo, en varias instalaciones la terraza no tiene toma eléctrica y subirla desde los pisos inferiores es complejo, por lo largo del cable y lo peligroso que puede resultar.
- 2. Acceso.** Lograr el acceso a las residencias donde se realizaron las instalaciones de los sensores dependía mucho de los horarios y de la disponibilidad de las personas. El periodo en que se realizaron las instalaciones correspondió a la cuarentena y la cuarentena estricta.

FIGURA 29.
Infografía



3. Capacitación. A pesar de que se realizaron capacitaciones a las personas del sector para que fueran partícipes de la instalación de los sensores, hubo fallas de coordinación por errores humanos que generaron demoras y pérdidas de datos. Estas fallas ocurrieron por la poca familiaridad con los elementos tecnológicos utilizados, y también debido a que el experimento requería vigilancia constante de las grabaciones de video y rotación de memorias en los equipos con los que se hizo el registro del aforo vehicular.

Dificultades sociales en las instalaciones

El principal obstáculo de carácter social a la hora de hacer las instalaciones es superar la desconfianza de los vecinos. Solo en uno de los casos se contaba con un contacto previo establecido, por lo que fue necesarios construir confianza con las personas para que se nos permitieran el acceso a sus viviendas y el préstamo de los recursos de conectividad. En varias oportunidades la desinformación incidió en que la ciudadanía se sintiera cómoda o no al momento de compartir sus claves de acceso a internet o de realizar la instalación.

Varias personas creían que los sensores implicarían costos adicionales en la cuenta de fluido eléctrico y/o el costo del internet, pese a los múltiples intentos de explicar su funcionamiento. Incluso hubo casos de personas que desconectaron los sensores. Con la pandemia, la velocidad de la conexión a internet se volvió fundamental, y la entrada de una conexión nueva era vista como riesgosa para garantizar poder realizar sus actividades. Hay que considerar, además, que en sectores de bajos recursos son muy pocas las personas que tienen acceso a internet por wifi; muchos tienen celulares sin esta función o su acceso a internet es por plan de datos móviles.

Las primeras aproximaciones a los ciudadanos habían permitido establecer unas condiciones sociales menos adversas. Sin embargo, una vez se iniciaron las instalaciones, los contactos directos estaban fuera del rango de distancia máxima del estudio o no tenían internet. Esta situación implicó buscar nuevas personas interesadas en participar de la red barrial, lo que fue un gran reto. Debido a la pandemia y a la desconfianza en personas desconocidas, la gente prefiere evitar a los intrusos en sus residencias.

CONCLUSIONES

Hablar de calidad del aire exige hablar de justicia ambiental. Hay personas que respiran un aire más contaminado que otras y no lo saben, o que no conocen sus consecuencias ni tienen mecanismos para proteger sus derechos que están siendo violentados por la polución de la ciudad. El problema, además, tiene una incidencia determinante en materia de salud, sin que la institucionalidad pública responda a este reto con la decisión que se requiere. Como se pudo observar a lo largo de este documento, además de las presiones asociadas a la pobreza multidimensional, las poblaciones más vulnerables cargan con una mayor contaminación. En las ciudades, la relación entre la calidad del aire y las personas deja ver que a mayor pobreza, mayor exposición y vulnerabilidad; lo que, a su vez, conlleva a una amenaza más severa contra sus derechos.

La calidad del aire debe dejar de verse solo como un problema técnico científico, para centrarse en el impacto que genera en los derechos de las personas. En este camino, la investigación permitió identificar múltiples variables que determinan la gestión ambiental. Dentro de los condicionantes más relevantes se encuentran: las características físicas de la ciudad y su ordenamiento, las normas que regulan las actividades e instituciones que atienden las necesidades de las personas, y los sistemas de monitoreo.

Igualmente, la presencia de industrias, la circulación de cierto tipo de automotores y, en general, el desarrollo físico del territorio responden a múltiples factores socioeconómicos, que determinan la distribución de la polución en la ciudad. A estas variables se suman también los fenómenos naturales (vientos, sequías, microclimas, etc.) que inciden en que los contaminantes se concentren.

El aire afecta las condiciones de vida de quienes lo respiramos; aunque es difícil percibir la problemática de la contaminación cuando parece

invisible. Pese a esto, sus efectos sí son notorios para quienes se exponen al aire contaminado, ya que esta exposición produce serias afectaciones, especialmente de tipo respiratorio. Este asunto ya ha sido señalado con insistencia por organismos de salud y expertos. De todas formas, hasta ahora el principal enfoque de gestión pública desde el que se ha abordado la problemática de la contaminación del aire es el ambiental, particularmente en términos de establecer y controlar los niveles de contaminación permitida. En otras palabras, la política está volcada a contener las fuentes de origen y a actuar frente a la emergencia. Mientras tanto, las consecuencias, que tienen que ver con daños continuos en los derechos, no son objeto de una intervención contundente por parte de la administración pública.

El Estado tiene compromisos nacionales e internacionales sobre el respeto y la garantía de los derechos humanos y fundamentales (vida, salud, vivienda digna, medio ambiente sano, intimidad), los cuales se están viendo afectados por el material particulado, una sustancia tóxica. Conforme a dichas obligaciones, los poderes públicos deben velar por diseñar y ejecutar medidas preventivas, de control y correctivas para asegurar los derechos de sus habitantes.

La institucionalidad bogotana asociada a la gestión de la calidad del aire ha avanzado en la dirección correcta. Dentro de los sectores más importantes se encuentran ambiente, transporte y salud, que desde hace un tiempo trabajan de la mano, principalmente ante las emergencias que se presentan en temporadas muy secas (de diciembre a abril) por concentración de contaminantes. Sin embargo, a lo largo del año el material resuspendido se concentra e incide en la salud de las personas; ya no se trata de una emergencia, sino de una situación permanente y casi normalizada en las ciudades. Este fenómeno requiere una participación más consolidada de los tres sectores.

Particularmente frente a la polución, las normas internacionales sobre DD. HH. y medio ambiente a las que se ha comprometido el Estado colombiano ponen el acento en la prevención del daño por exposición a sustancias tóxicas. La problemática de la contaminación del aire representa una amenaza para los derechos a la salud, la vida, la intimidad y, en general, para vivir en condiciones dignas. No obstante, el enfoque estatal está centrado en establecer un estándar de contaminación atmosférica admisible, lo cual es insuficiente para impedir que se generen graves impactos en la salud de las personas.

Al respecto, la Corte Constitucional ya ha manifestado su preocupación frente a la tendencia de considerar como daños ambientales solo aquellas situaciones en las cuales se supera el límite de concentración de contaminantes. De un lado, porque las mediciones oficiales no son técnicamente suficientes en todo el país y, de otro, porque estas no logran el detalle local suficiente para identificar la relación entre contaminación localizada y afectación a los derechos individuales.

Además, aunque ha habido avances en la reducción de carga contaminante del aire, los límites permisibles colombianos son mucho más flexibles que lo recomendado por la OMS, pese a la insistente recomendación de ajuste que ha hecho el Alto Tribunal Constitucional. En especial, frente a la concentración del contaminante PM_{2.5}, que es el de mayor incidencia negativa en la salud, los datos oficiales señalan que dichas recomendaciones son superadas en todas las estaciones de medición oficiales de Bogotá. Incluso, los datos de estaciones de monitoreo como Carvajal-Sevillana, Kennedy, Puente Aranda y Tunal —zonas de mayor pobreza multidimensional ubicadas en el suroccidente— superan con mucha frecuencia los límites permisibles establecidos por el Estado.

Esto es más grave si se tiene en cuenta que los sistemas de medición aún son insuficientes para identificar problemas localizados que pueden amenazar, incluso, los derechos de grupos reducidos de personas e individuos. El hecho de que solo las grandes ciudades cuenten con sistemas de monitoreo del aire, o que en zonas rurales solo existan como consecuencia de órdenes judiciales, confirma que se requiere más acción estatal en este frente.

Con todo, la línea base de información del aire no tiene el alcance deseable para formular herramientas transversales y localizadas que le permitan al Estado atender a la población más afectada. Se necesita una mejora sustancial en la cantidad y disponibilidad de sistemas de monitoreo en el país, así como en la intervención del sector salud, que debe ser más protagónica. Contar con información suficiente, comprensible, accesible y disponible es esencial para garantizar una ciudadanía activa, pero también lo es para poder adoptar medidas oportunas que eviten poner su salud en riesgo.

Los sistemas de medición de la calidad del aire son una herramienta fundamental para lograr este objetivo. La diversificación y complementariedad de tecnologías no solo estimula la investigación científica, sino que también promueve mejores bases de datos para tomar decisiones

más oportunas y apropiadas. Recientemente los sensores de bajo costo han probado ser una buena opción para complementar los monitoreos públicos de la calidad del aire en diversas partes del mundo. Estos permiten visibilizar las exposiciones locales e individuales en tiempo real, e involucran a la ciudadanía en la producción del conocimiento científico, lo que estimula su participación en las decisiones públicas.

Hay que considerar que el acceso a la información y la participación ambiental son derechos fundamentales, que en cierta medida están condicionados por el lenguaje técnico científico. Esta situación profundiza la distancia entre Estado y ciudadanía y, además, disminuye la posibilidad de la segunda para solicitar la protección de sus derechos frente al sistema judicial, como consecuencia de la ausencia de conocimiento suficiente. Para garantizar el involucramiento ciudadano en la producción y el acceso a la información para la participación se debe articular diversos esfuerzos por parte del Estado, la academia, y los y las ciudadanas, así como de los responsables de la contaminación.

Para este propósito, el presente documento indagó sobre los sensores de bajo costo como una alternativa complementaria al sistema de monitoreo oficial de la calidad del aire. Pese a los cuestionamientos generalizados sobre la confiabilidad de los datos, por ausencia de información científica sobre dicha tecnología, estas herramientas han empezado a utilizarse en algunos países para complementar los sistemas oficiales de datos. Democratizar el conocimiento no es una tarea fácil. Sin embargo, los tres experimentos diseñados y ejecutados nos han permitido concluir que la medición de la calidad del aire con sensores de bajo costo tiene un gran potencial para enriquecer los datos públicos sobre calidad del aire y vincular activamente a la ciudadanía.

El primer experimento —el de los círculos concéntricos— muestra que las estaciones de medición tienen un rango de precisión en los datos. Si bien el ejercicio es un piloto, podría inferirse que donde se necesite obtener o comparar información sobre la calidad del aire, los sensores de bajo costo pueden ser una herramienta útil para obtener datos adicionales; particularmente donde el alcance de la red oficial empieza a reducir su precisión.

El segundo ejercicio, que buscaba intercomparar datos, demostró que hay una alta correlación entre los sensores de bajo costo y las estaciones oficiales de monitoreo, lo que corrobora la confiabilidad de tales sensores. Esto indica que la mencionada tecnología podría ayudar a hacer mediciones en zonas amenazadas por algún contaminante donde no se

cuenta con redes oficiales para el monitoreo de la calidad del aire. Igualmente, podría ser útil en sitios donde no funcionan las estaciones públicas e, inclusive, en aquellos lugares donde el rango de medición oficial no alcanza a medir o mide con menos calidad. Cabe señalar que la anterior correlación parece ser más alta entre sensores de la misma tecnología, que en este caso es de sensores ópticos.

El último experimento, la red de monitoreo ciudadana, demostró la importancia de hacer mediciones localizadas de la calidad del aire. En el caso de los barrios México y Lucero, afectados por una permanente nube visible de contaminación atmosférica, la red mostró que los niveles permitidos por el Estado colombiano de material resuspendido PM_{2.5} —el más dañino— son superados en más del doble de la cantidad admitida. Estos datos no son detectados por la red oficial de monitoreo con el nivel de detalle localizado que sí logran los sensores de bajo costo. Inclusive se pudo mostrar cómo afecta la dirección del viento en el arrastre de material particulado y cómo se ven afectadas varias cuadras barrio adentro por la contaminación del aire en la avenida estudiada (la avenida Boyacá). Además, esta prueba permitió vincular a la ciudadanía en el proceso de instalación y monitoreo de los sensores. Sin embargo, la pandemia y el contexto de seguridad de la zona limitaron el trabajo con la gente, razón por la cual el ejercicio de ciencia ciudadana puede ser fortalecido en futuros experimentos.

Sumado a lo anterior, la ausencia de entidades del Estado en esta zona fue notoria, porque o no se conocía el problema o no existía interés frente a este. Esto muestra que existen evidentes problemas en la difusión de la información y la atención a la problemática por parte de las entidades competentes. Esta situación profundiza la ya existente y notoria desconfianza en cualquier figura que parezca provenir del sector público, lo que interfirió con el plan inicialmente establecido para el experimento. Igualmente, por más simplificado que se intentó diseñar el piloto de la red, el nivel de complejidad fue más alto de lo esperado (sin duda, asuntos como la importación y manejo técnico de una estación meteorológica de bajo costo y el procesamiento de datos con modelos matemáticos requieren de apoyo experto). Por su parte, sumados a los desafíos por el contexto social, la estación meteorológica —aun cuando era de bajo costo— requirió un dispendioso proceso de importación.

Es importante vincular a la ciudadanía en este tipo de ejercicios científicos, pues esto permite fortalecer las causas que los convocan a

participar activamente en las decisiones públicas y ayuda a encontrar espacios de conversación horizontal con el Estado. La ciencia ciudadana reduce la brecha con el conocimiento y lenguaje, la cual, en materia ambiental, determina la incidencia efectiva de las personas en los temas que les afectan.

Con este piloto se pretende mostrar también la importancia de establecer los lugares donde la medición oficial empieza a tener problemas de confiabilidad, debido a la distancia de las estaciones oficiales de monitoreo. De esta manera las autoridades públicas y la academia pueden identificar dichos lugares y problemas, con el fin de fortalecer su investigación en materia de calidad del aire y avanzar en experimentos más detallados que contribuyan a la construcción de una política pública más ambiciosa.

Por las condiciones del problema ciudadano de la contaminación del aire, en la zona de la red barrial confluyen las competencias de distintas autoridades públicas, particularmente las secretarías distritales de Ambiente, Movilidad, Salud, la ANLA y la CAR. Inclusive, los niveles de contaminación de la zona son tan altos que ameritan la puesta en marcha del sistema de gestión del riesgo para adoptar medidas urgentes. No obstante, existe un bloqueo institucional que impide resolver el problema de contaminación atmosférica que hay en la zona, mientras que las negativas condiciones ambientales permanecen y amenazan los derechos de sus habitantes.

Recomendaciones

A modo de cierre —y teniendo en cuenta todo lo dicho en materia de derechos, aire y ciencia ciudadana— hay que resaltar el papel de la ciudadanía como la fuerza que le da sentido al sistema normativo. Garantizar el acceso de las personas a la información y participación, para que se pueda acceder a su vez a la justicia, es esencial para fortalecer las políticas públicas que protegen los derechos fundamentales de los y las colombianas, un fin esencial del Estado Social de Derecho (art. 2 de la Constitución Política).

Se recomienda, entonces, que la ciudadanía continúe trabajando y robustezca sus procesos locales para la defensa del aire limpio. Es importante vincular esta causa con la salud pública, para exigir mayor compromiso del Estado y que, en consecuencia, se establezcan mejores protocolos de prevención y atención para reducir la morbilidad y mortalidad relacionadas con este fenómeno. El control ambiental es determinante, pero también lo es el fortalecimiento de las políticas de salud pública.

El Estado tiene una gran responsabilidad en el hecho de que la contaminación de ciudades como Bogotá aún no logre estándares internacionales en materia de calidad del aire. Se necesita que los sectores ambientales, de movilidad y salud se articulen para ajustar los límites de contaminación permisibles según las recomendaciones de la OMS. Dicha organización ha soportado sus guías en estudios técnicos que demuestran el riesgo para la salud humana que representan los contaminantes usuales del aire.

Las consecuencias negativas en la salud humana por la polución son ciertas, y se necesita intervención estatal urgente, participativa y eficaz para frenarlas. En ese sentido, y en consideración de las múltiples investigaciones epidemiológicas, el Estado debe aplicar el principio de prevención. La atención de emergencias en los períodos de sequía no puede ser la principal intervención, sino que deben existir planes y programas permanentes y robustos. A su vez, estas decisiones deben articularse con otros sectores (planeación, minas y energía, transporte, salud, ambiente, entre otros) para lograr disminuir el traumatismo en la economía. No obstante, los derechos no pueden seguir siendo sacrificados en nombre de la estabilidad de los mercados; el Estado debe intervenir para cambiar esta dinámica.

Por lo anterior, recomendamos el trabajo conjunto por parte de las entidades. Este tiene varios fines: (i) tener una capacidad de acción más extensa y oportuna; (ii) integrar los procedimientos administrativos, para que con una sola política se controle a los contaminadores y se focalice la atención a la población vulnerada; (iii) facilitar las vías de exigencia y participación para la ciudadanía; (iv) divulgar la información de manera integral; y (v) mejorar los estándares sobre calidad del aire y adoptar medidas preventivas y diferenciadas según la incidencia de la contaminación en la ciudad.

Para consolidar y ampliar los espacios ciudadanos de información y participación, para que estos garanticen incidencia efectiva, se requiere la integración de factores como: mayor difusión en la información; simplificación del lenguaje; y creación mecanismos, herramientas, procedimientos y demás formas que consoliden procesos decisorios en los que la comunidad sea activamente escuchada. A su vez, el fortalecimiento de la ciencia ciudadana puede mejorar la relación entre Estado y ciudadanía, al igual que puede lograr mejores condiciones de habitabilidad para todos y todas.

Adicionalmente, es necesario que las redes de monitoreo del país sean suficientes para garantizar que información utilizada en la toma de

decisiones sea confiable y oportuna. Los sensores de bajo costo son una opción que puede complementar los sistemas de información en aquellas regiones donde las condiciones ambientales, físicas o económicas impiden —o no requieren— una tecnología tan especializada —y costosa— como la utilizada en las estaciones oficiales de monitoreo.

A diferencia de los sistemas de monitoreo, estos sensores también permiten analizar en tiempo real las condiciones de las personas en un determinado espacio. Esta puede ser una herramienta para el diseño y la ejecución de planes y programas de prevención, control y atención propuestos desde políticas ambientales y de salud pública. La diferencia en la calidad del aire en diferentes lugares de la ciudad debe ser abordada según su concentración y consecuencias. Focalizar este problema puede ayudar a identificar dónde se requiere mayor atención para prevenir enfermedades respiratorias.

De manera muy puntual, en Bogotá la SDS debe hacer mayores esfuerzos para mejorar su enfoque de prevención, manejo y atención a las consecuencias de la polución, especialmente en las zonas más contaminadas. Es posible que para ello sea necesaria una modificación de sus funciones legales; se sugiere impulsarla desde la ciudadanía y sus representantes. Para el caso analizado de Ciudad Bolívar, es imprescindible la articulación entre las secretarías de Movilidad, Salud y Ambiente. Todas ellas tienen incidencia y capacidades para lograr reducir la enorme contaminación del aire y mejorar la calidad de vida de los habitantes de esa zona, quienes llevan décadas padeciendo este problema.

Finalmente, se espera que la academia profundice sobre los hallazgos aquí presentados respecto a los sistemas de monitoreo oficiales y complementarios. Además, que esta mantenga su ardua labor para impulsar la protección de los derechos fundamentales de las personas; en este caso, aquellos que se ven afectados por la polución de las ciudades.

Aun con estos aprendizajes, las inquietudes que se desprenden de este ejercicio son mayores. ¿Qué sucede con las ciudades y zonas rurales donde no existe una red oficial de medición? ¿Cómo lograr la participación activa de sectores como salud, movilidad, minas y energía en los problemas de calidad del aire? ¿Cómo mejorar los límites permisibles en un corto tiempo sin afectar la economía del país? Estas, entre muchas otras interrogantes, son principalmente una invitación a continuar haciendo experimentos que le permitan a la ciudadanía tener información y posibilidad de participación para actuar ante la puesta en riesgo de sus derechos.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET]. (s. f.). Contaminación de fondo. *MeteoGlosario Visual*. https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/366_contaminacion-de-fondo
- Alarma por humareda de un horno crematorio en Bogotá (2020, 22 de julio). *Semana*. <https://www.semana.com/impacto/articulo/humareda-de-un-horno-crematorio-prende-las-alarmas-en-bogota/53187/#:~:text=Una%20bocanada%20de%20humo%20denso,por%20la%20operaci%C3%B3n%20del%20establecimiento>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2020). *Plan de desarrollo distrital 2020-2024. Diagnóstico*. https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/diagnostico_pdd_2020-2024_0.pdf
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2021). *Plan Aire 2030*. <https://ambientebogota.gov.co/plan-aire-2030>
- Alcaldía de Medellín. (2020). *Índice de desempeño en salud ambiental. Construcción y medición para el periodo 2016-2019*. Secretaría de Salud de Medellín. <https://www.medellin.gov.co/es/wp-content/uploads/2021/09/5.1.10-Indice-de-salud-ambiental-Resultados-2020.pdf>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2018). *Contaminación atmosférica y sus efectos sobre la salud de los habitantes del Valle de Aburrá 2008-2015*. https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Re-analisis/ContaminacionAtmosferica_y_sus_Efectos_en_la_Salud-AMVA_2019.pdf
- Ángel Macías, M. A. (2020). *Contaminación del aire en Bogotá en el siglo XX. Análisis histórico de la construcción socio ambiental de un problema sanitario* [tesis de doctorado inédita]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79354>
- Boyd, D. R. (Relator Especial sobre la cuestión de las obligaciones de derechos humanos relacionadas con el disfrute de un medio ambiente sin riesgos, limpio, saludable y sostenible), *Derecho a un medio ambiente limpio, saludable y sostenible: el medio ambiente no tóxico*, doc. ONU A/HRC/49/53 (12 de enero de 2022).
- Bravo Álvarez, H., Sosa Echeverría, R., Sánchez Álvarez, P. & Krupa, S. (2013). Air Quality Standards for Particulate Matter (PM) at high altitude cities. *Environmental Pollution*, 173, 255–256. <https://doi.org/10/f4mk9b>

- Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES]. CONPES 3550 de 2008. Lineamientos para la formulación de la política integral de salud ambiental con énfasis en los componentes de calidad de aire, calidad de agua y seguridad química. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3550.pdf>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES]. CONPES 3943 de 2018. Política para el mejoramiento de la calidad del aire. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3943.pdf>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES]. CONPES 3963 de 2018. Política para la modernización del sector transporte automotor de carga. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3963.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR]. (2019). *Diagnóstico - Plan de Acción Local para mejorar la calidad del aire en Ciudad Bolívar*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/Se47068c33dc8.pdf>
- Corte Constitucional de Colombia. Sala Primera de Revisión. Sentencia T-406/92 (M.P. Ciro Angarita Barón; 5 de junio de 1992).
- Corte Constitucional de Colombia. Sala Sexta de Revisión. Sentencia T-154/13 (M.P. Nilson Pinilla Pinilla; 21 de marzo de 2013).
- Corte Constitucional de Colombia. Sala Primera de Revisión. Sentencia T-294/14 (M.P. María Victoria Calle Correa; 22 de mayo de 2014).
- Corte Constitucional de Colombia. Sala Cuarta de Revisión. Sentencia T-341/16 (M.P. Gabriel Eduardo Mendoza Martelo; 29 de junio de 2016).
- Corte Constitucional de Colombia. Sala Plena. Sentencia SU-217/17 (M.P. María Victoria Calle Correa; 18 de abril de 2017).
- Corte Constitucional de Colombia. Sala Octava de Revisión. Sentencia T-361/17 (M.P. Alberto Rojas Ríos; 30 de mayo de 2017).
- Corte Constitucional de Colombia. Sala Séptima de Revisión. Sentencia T-733/17 (M.P. Alberto Rojas Ríos; 15 de diciembre de 2017).
- Comisión Interamericana de Derechos Humanos [CIDH]. (2021, 14 de octubre). CIDH presenta caso ante la Corte IDH sobre responsabilidad por efectos de la contaminación en la Comunidad de La Oroya. OEA. <http://www.oas.org/es/CIDH/jsForm/?File=/es/cidh/prensa/comunicados/2021/274.asp>
- Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales [DESC], *Observación general n.º 14: El derecho al disfrute del más alto nivel posible de salud*, doc. ONU E/C.12/2000/4 (11 de agosto de 2000). <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2001/1451.pdf>

- Convención Americana de Derechos Humanos (Pacto de San José), 22 de noviembre de 1969, U.N.T.S.123.
- Cremades, P., Castro, F., Fernandez, R., Clausen, R. & Puliafito, E. (2013). Desarrollo de un monitor acuerdo de calidad del aire (MACA). *Séptimo encuentro de investigadores y docentes de ingeniería*.
- Daza Castillo, V., León Torres, D. C. & Rubiano Galvis, S. (2021). *La desigualdad que respiramos. Políticas de calidad del aire, pobreza y desigualdad en Bogotá, 2010-2020*. Dejusticia. https://www.dejusticia.org/wp-content/uploads/2021/08/La-desigualdad-que-respiramos-web-2_compressed-1.pdf
- Decreto 2811 de 1974 [con fuerza de ley]. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. 18 de diciembre de 1974. DO: 34.243.
- Decreto 948 de 1995. Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire. 5 de junio de 1995.
- Decreto 4109 de 2011 [con fuerza de ley]. Por el cual se cambia la naturaleza jurídica del Instituto Nacional de Salud – INS y se determina su objeto y estructura. 2 de noviembre de 2011. DO: 48.241.
- Decreto 1076 de 2015 [con fuerza de ley]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 26 de mayo de 2015.
- Decreto 555 de 2021 [Alcaldía Mayor de Bogotá]. Por el cual se adopta la revisión general del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C. 29 de diciembre de 2021.
- Echeverri Londoño, C. A. (2019). *Contaminación atmosférica*. Ediciones de la U.
- Finkelievich, S. & Fischnaller, C. (2014). Ciencia ciudadana en la sociedad de la información: nuevas tendencias a nivel mundial. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 9(27), 11-31. <https://www.redalyc.org/pdf/924/92431880001.pdf>
- Fischer, F. L. & Beltrán, D. F. (2022). Análisis del material particulado en relación con la percepción de la calidad de vida en tres localidades de Bogotá - Colombia. *Gestión y Ambiente*, 24(2), 2-16. <https://doi.org/10/jdn6>
- Fajardo Montaña, O. A. (2021, 2 de noviembre). ¿Qué son las guías de calidad del aire 2021? *Noticentral Universidad Central*. <https://www.ucentral.edu>.

co/noticentral/son-guias-calidad-del-aire-2021#:~:text=Las%20nuevas%20gu%C3%ADas%20de%20la,la%20evidencia%20ha%20avanzado%20m%C3%A1s

Hoyos, C. [@cdhoyoso]. (2020, 25 de marzo). *Buen ojo! Desde ayer en la noche se empezó a consolidar esa situación. Aquí mi interpretación: No siempre el aire que entra por el norte es cargado de partículas, de hecho ayer desde las 18:00 cambió súbitamente la concentración de PM2.5 en Barbosa* [tuit]. Twitter. <https://twitter.com/cdhoyoso/status/1242810817076236296>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (s. f.-a). *Calidad del Aire*. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (s. f.-b). *Subsistema de información sobre calidad del aire - SISAIRe*. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/sisaire>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2005). *Estudio de la caracterización climática de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2019a). *Informe del Estado de la calidad del aire en Colombia 2018*. <http://www.andi.com.co/Uploads/Informe%20estado%20calidad%20del%20aire%202018.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2019b). *Protocolo de revisión y seguimiento autoridades ambientales del proceso de medición de emisiones generadas por fuentes móviles organismos de evaluación de la conformidad – OEC*. Subdirección de Estudios Ambientales – Grupo de Acreditación. <http://www.ideam.gov.co/documents/412030/38799248/E-SGI-AC-PC006+PROT+OCOLO+REVISI%C3%93N+Y+SEGUIMIENTO+A+AUTORIDADES+AMBIENTALES.pdf/8e9e53c3-7e22-4a55-bf01-a07949026cf4?version=1.0>

Instituto Nacional de Salud [INS]. (2018). *Carga de enfermedad ambiental en Colombia. Informe técnico especial 10*. Observatorio Nacional de Salud. <https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10%20Carga%20de%20enfermedad%20ambiental%20en%20Colombia.pdf>

- Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones. 22 de diciembre de 1993. DO: 41.146.
- Ley 1972 de 2019. Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles y se dictan otras disposiciones. 18 de julio de 2019. DO: 51.018.
- Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a los \$20,7 billones (2017, 7 de mayo). *Departamento Nacional de Planeación*. [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx)
- Mataka, A. [@arseniomataka]. (2020, 21 de agosto). *Sacramento region now. Reason #101 why hyper local air sensors are sort of a good idea* [tuit]. Twitter. <https://twitter.com/arseniomataka/status/129703358699095302?s=20>
- Mazaheri, M., Clifford, S., Yeganeh, B., Viana, M., Rizza, V., Flament, R., Buonanno, G & Morawska, L. (2018). Investigations into factors affecting personal exposure to particles in urban microenvironments using low-cost sensors. *Environment International*, 120, 496-504. <https://doi.org/10/gfncwx>
- Medina, E. (2019, 28 de agosto). ¿Qué impacto tienen los incendios del Amazonas en la calidad del aire de Bogotá? *Alcaldía de Bogotá*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/impacto-de-los-incendios-del-amazonas-en-bogota>
- Medio Ambiente y Derechos Humanos, *Opinión Consultiva OC-23/17, Ct. Inter-Am. D.H. (ser. A) 23 (15 de noviembre de 2017)*. https://www.corteidh.or.cr/docs/opiniones/seriea_23_esp.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2010). *Política de Prevención y Control de la contaminación del aire*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/Politica_de_Prevencion_y_Control_de_la_Contaminacion_del_Aire.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2012). *Diagnóstico nacional de salud ambiental*. República de Colombia. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2019). *Estrategia Nacional de Calidad del Aire*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/ESTRATEGIA_NACIONAL_DE_CALIDAD_DEL_AIRE_1.pdf
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2016). *Urban green spaces and health. A review of evidence*. World Health Organization Regional Office for Europe. https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/321971/Urban-green-spaces-and-health-review-evidence.pdf
- Organización Mundial de la salud [OMS]. (2021, 22 de septiembre). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Mundial de la salud [OMS]. (2022a, 4 de abril). *Miles de millones de personas siguen respirando aire insalubre: nuevos datos de la OMS*. <https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>
- Organización Mundial de la salud [OMS]. (2022b, 4 de abril). *Base de datos de la calidad del aire*. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/who-air-quality-database>
- Pérez, R. (2017). Altitud sobre el nivel del mar y efectos en la contaminación. En S. Ponce de León, T. Fortoul & R. Pérez (eds.), *Efectos de la contaminación atmosférica en la salud* (pp. 47-54). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Polvo del desierto del Sahara ya llegó a Bogotá (2020, 25 de junio). *Semana*. <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/polvo-del-desierto-del-sahara-ya-llego-a-bogota/52308/#:~:text=%22Al%20pa-recer%20son%20las%20arenas,que%20indicar%C3%ADa%20que%20ser%C3%ADa%20arena>
- Reyes Coca, S. (2002). *Introducción a la meteorología*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Relator Especial sobre las implicaciones para los derechos humanos de la gestión y eliminación ecológicamente racionales de las sustancias y los desechos peligrosos, *Informe del Relator Especial sobre las implicaciones para los derechos humanos de la gestión y eliminación ecológicamente racionales de las sustancias y los desechos peligrosos*, doc. ONU A/HRC/39/48 (3 de agosto de 2018).
- Resolución 2410 de 2015 [Secretaría Distrital de Ambiente]. Por medio del cual se establece el Índice Bogotano de Calidad del Aire -IBOCA- para la definición de niveles de prevención, alerta o emergencia por con-

- taminación atmosférica en Bogotá D. C. y se toman otras determinaciones. 11 de diciembre de 2015.
- Resolución 2254 de 2017 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. 1 de noviembre de 2017. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>
- Salas Pérez, C. & Coy Castro, D. F. (2019). Análisis espacial de islas de calor en la ciudad de Bogotá: los efectos de la urbanización, un estudio desde la teledetección [tesis de pregrado inédita]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/16028>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Instituto Nacional de Ecología. (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>
- Secretaria Distrital de Ambiente [SDA]. (s. f.-a). *La calidad del aire*. https://ambientebogota.gov.co/todas-las-investigaciones/-/asset_publisher/pibvwzUnZiNr/content/la-calidad-del-aire
- Secretaria Distrital del Ambiente [SDA]. (s. f.-b) *Conozca el índice bogotano de calidad del aire IBOCA*. <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Conozca%20el%20IBOCA.pdf>
- Secretaría Distrital de Ambiente [SDA]. (2017). *Informe anual de calidad del aire en Bogotá*. <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/IA%20Informe%20Anual%202016%20RMCAB.pdf>
- Secretaría Distrital de Ambiente [SDA]. (2020). *Inventario de emisiones de Bogotá. Contaminantes atmosféricos*. <https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/397082/Inventario+de+Emisiones+de+Bogota+portal+nuevo.pdf/972994eb-7f58-42c2-a801-0f8579937919>
- Secretaria Distrital del Ambiente [SDA]. (2021, 14 de abril). *¿Qué es el IBOCA?* <http://iboca.ambientebogota.gov.co/publicaciones/175/que-es-el-iboca/>
- Secretaria Distrital de Movilidad [SDM]. (2020, 18 de noviembre). *Bogotá se sabe mover de manera sostenible y cuidando el medio ambiente*. https://www.movilidadbogota.gov.co/web/cierre_total_de_la_calzada_paralela_de_la_autopista_norte_entre_calles_93_y_94_sentido_nortesur

- Velázquez Salamanca, J. E. (2016). Análisis de la relación entre índices de estabilidad atmosférica y concentración de PM 2.5 en la ciudad de Bogotá: desarrollo de herramientas de captación y análisis de datos [tesis de pregrado inédita]. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17981/u729670.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Zamudio, J. A. (2016). Estrategias para mitigar la contaminación del aire en zonas aledañas a grandes avenidas de Bogotá [tesis de maestría inédita]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/59910/11510626.2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXOS

Anexo 1. Recopilación de normas y políticas nacionales sobre la calidad del aire

Normativa internacional

Referencia	Contenido
Guías de calidad del aire OMS	Las guías contienen indicaciones para los países en general, pero estas recomendaciones se formulan de conformidad con las capacidades de cada país.
Resolución 74/212 Asamblea General de las Naciones Unidas	Se designa el Día Internacional del Aire Limpio por un cielo azul, que se observará a partir de 2020. A su vez, se invita al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
Opinión Consultiva OC-23/17 Corte IDH	La Corte Interamericana de Derechos Humanos (Corte IDH) emite en esta opinión su respuesta a una consulta sobre las obligaciones ambientales de los Estados. Aquí la Corte reitera el carácter fundamental que tiene el derecho al medio ambiente sano.
Objetivos de Desarrollo Sostenible	En el año 2015, el Gobierno nacional participó en la Cumbre de Desarrollo Sostenible y la elaboración de la Agenda 2030, como parte de Naciones Unidas, proceso en el cual se definieron los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ods).

Normativa nacional

Número	Referencia	Contenido
Decreto 948 de 1995	Por la cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973 (...) en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire.	Establece acciones para la prevención y el control de la contaminación atmosférica, junto con los mecanismos para preservar la calidad del aire.
Decreto 1552 de 2000	Por la cual se modifica el artículo 38 del Decreto 948 de 1995.	Prohíbe las emisiones visibles de contaminantes en vehículos accionados por diésel.
Decreto 2622 de 2000	Por medio del cual se modifica el Decreto 948 de 1995.	Contenido de plomo y otros contaminantes.
Decreto 244 de 2006	Por el cual se crea y reglamenta la Comisión Técnica Nacional intersectorial para la Prevención y el control de la Contaminación del Aire, Conaire.	Se crea y se reglamenta Conaire.

Número	Referencia	Contenido
Decreto 979 de 2006	Modificación del Decreto 948 de 1995.	Modifica las normas de calidad del aire respecto a grados de exposición, niveles de prevención y alerta, declaratorias y medidas específicas para atender las emergencias.
Resolución 2200 de 2006	Modificación de las condiciones mínimas para Centros de Diagnóstico Automotor.	Establecen las condiciones mínimas que deben cumplir los Centros de Diagnóstico Automotor para realizar las revisiones técnico-mecánicas y de gases de los vehículos automotores.
Ley 1205 de 2008	Por medio de la cual se mejora la calidad de vida a través de la calidad del diésel.	Se dictan normas de producción, importación, almacenamiento, adición y distribución de combustibles diésel, con el fin de minimizar su impacto ambiental negativo.
CONPES nacional 3510 de 2008	Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia.	Busca diversificar la canasta energética del país con la inclusión de biocombustibles, como alternativa o complemento al mezclarse con el diésel.
Resolución MADS 909 de 2008	Por la cual se establecen normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.	Establece las normas y los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas.
Resolución MADS 910 de 2008	Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes.	Establece los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres. Además, reglamenta los requisitos y las certificaciones a las que están sujetas los vehículos y las demás fuentes móviles.
Resolución 650 de 2010	Por la cual se adopta el protocolo de monitoreo.	Adopta el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, compuesto por el diseño y las especificaciones de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire.
Resolución 651 de 2010	Por el cual se crea SISAIRE.	Crea el subsistema de información sobre calidad del aire SISAIRE.
Resolución 935 de 2011	Por la cual se establecen los métodos para la evaluación de emisiones.	Establece a nivel nacional diez métodos para la evaluación de emisiones contaminantes por fuentes fijas. Igualmente, determina el número de pruebas o corridas para la ejecución de métodos para la evaluación de emisiones.

Número	Referencia	Contenido
Resolución 6982 de 2011	Por la cual se dictan normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y protección de la calidad del aire.	Dictamina normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y para la protección de la calidad del aire. Además, establece normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas en el periodo urbano del Distrito Capital.
Resolución 1111 de 2013	Por la cual se modifica la resolución 910 de 2008.	Establece los límites máximos de emisión permisibles para fuentes móviles terrestres.
Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Establece el decreto reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible, el cual contiene el reglamento de protección y control de la calidad del aire, que tiene alcance general y es aplicable en todo el territorio colombiano.
Resolución mads 2254 de 2017	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.	Establece la norma de calidad del aire y las disposiciones para la gestión del recurso del aire a nivel nacional. Con ello busca garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud por exposición a contaminantes.
CONPES 3943 de 2018	Política para el mejoramiento de la calidad del aire.	Por medio de este documento se plantean soluciones intersectoriales para el desarrollo de acciones que aporten al mejoramiento de la calidad del aire. Involucra diferentes ministerios y entidades del orden nacional.
Resolución mads 40177 de 2020	Por la cual se definen los energéticos de bajas o cero emisiones teniendo como criterio fundamental su contenido de componentes nocivos para la salud y el medio ambiente.	Definiciones de combustibles limpios o de cero emisión para el transporte.
CONPES 3943 de 2018	Política de Mejoramiento de Calidad del Aire.	Mediante la cual se proponen acciones para reducir las concentraciones de contaminantes en el aire, específicamente a través de la renovación y modernización del parque automotor.

Número	Referencia	Contenido
Ley 1972 de 2019	Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y el medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles.	Establece medidas para reducir las emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes móviles que circulen por el territorio nacional, haciendo énfasis en el material particulado.

Normativa distrital

Número	Referencia	Contenido
Directiva 07 de 2005	Se adopta el Plan de Gestión Ambiental, instrumento de planeación establecido a largo plazo.	Señala los lineamientos para garantizar la conservación de un medio ambiente sano en la Secretaría General, y adopta los planteamientos señalados en el Decreto 456 de 2008.
Acuerdo 367 de 2009	Por el cual se insta a la Administración Distrital a que informe de manera permanente, pública y masiva el estado de la contaminación atmosférica en la ciudad de Bogotá D. C.	Establece que la información de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) será permanente y masiva. Esta deberá publicarse máximo dentro de las 12 horas siguientes a la recepción de los datos en la página web de la Secretaría Distrital de Ambiental.
Decreto 596 de 2011	Por medio de la cual se adopta la Política Distrital de Salud Ambiental para Bogotá D.C. 2011.	Se busca mejorar la salud ambiental en el territorio mediante: trabajo articulado de las instituciones, coordinación, investigación y participación, para que permitan una mejor calidad de vida.
Decreto 098 de 2011	Adopta el Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá.	Adopta el Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá. Este es el instrumento de planeación a corto y mediano plazo para el Distrito Capital y se encarga de orientar las acciones progresivas de los actores distritales tendientes a la descontaminación del aire de la ciudad.
Decreto 623 de 2011	Por medio de la cual se clasifican las áreas fuente de contaminación ambiental clase I, II, III de Bogotá.	Pretende clasificar las áreas fuente de contaminación ambiental para adoptar las medidas de reducción de contaminación de las fuentes fijas.

Número	Referencia	Contenido
Resolución IBOCA 2410 de 2015	Por la cual se establece el índice Bogotano de Calidad del Aire (IBOCA) para la definición de niveles de prevención, alerta o emergencia por contaminación atmosférica en Bogotá.	Busca establecer un indicador para la gestión de acciones entre sectores de ambiente y salud en los temas de calidad del aire.
Decreto 595 de 2015	Por el cual se adopta el Sistema de Alertas Tempranas Ambientales de Bogotá para su componente aire, SATAB-aire.	Adopta el Sistema de Alertas Tempranas Ambientales de Bogotá en su componente aire (SATAB-aire). Este tiene como objetivo reducir el riesgo por contaminación atmosférica en Bogotá, en el marco del Sistema Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático (SDGR-CC).
Resolución 831 de 2018	Por la cual se declara la alerta amarilla por contaminación atmosférica en la ciudad de Bogotá D.C.	Se adopta el índice iboca para tomar acciones frente a la contaminación atmosférica en Bogotá. De conformidad con los niveles de riesgo, se resuelve declarar alerta amarilla.
Documento de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) PAMCA.	Plan de acción para mejorar la calidad del aire – PAMCA.	
Plan de desarrollo distrital 2020-2024	Un nuevo contrato social y ambiental para la Bogotá del siglo XXI.	Es el instrumento de planeación y disposición de lineamientos administrativos para el territorio de Bogotá D.C. Mediante él se definió la meta de reducir el promedio ponderado de las concentraciones de material particulado PM10 y PM2.5. Al respecto, los sectores movilidad y salud del distrito tienen aportes fundamentales para el cumplimiento de dicha meta.
Acuerdo 802 de 2021	Por el cual se establecen lineamientos para la formulación de la metodología para la evaluación y ajuste de los intervalos del Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA).	Dicta una metodología para evaluar la concentración de materiales contaminantes, incluyendo las directrices establecidas por la OMS.
Resolución 868 de 2021	Por medio de la cual se establece el nuevo Índice Bogotano de Calidad del Aire y riesgo en salud (IBOCA).	Se establece el nuevo índice para coordinar la gestión de riesgos de deterioro del ambiente, la salud y la calidad de vida a nivel distrital.

Número	Referencia	Contenido
Decreto distrital 332 de 2021	Por medio del cual se adopta el Plan Estratégico para la Gestión Integral de la Calidad del Aire de Bogotá 2030.	Se pretende reducir las emisiones, proteger la salud y ofrecer una visión regional de la problemática de la contaminación.

Anexo 2.

Tabla de siglas

Abreviatura	Significado
RMCAB	Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
PAMCA	Plan de Acción local para Mejorar la Calidad del Aire
GEI	Gases de efecto invernadero
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IBOCA	Índice Bogotano de Calidad del Aire y riesgo en salud
INS	Instituto Nacional de Salud
MP2.5/PM2.5	Material particulado 2.5 micras
MP10/PM10	Material particulado 10 micras
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
ZUMA	Zonas Urbanas por un Mejor Aire
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
SDS	Secretaría Distrital de Salud
SDM	Secretaría Distrital de Movilidad
MME	Ministerio de Minas y Energía
MSPS	Ministerio de Salud y Protección Social
CO	Monóxido de carbono
EPA	Environmental Protection Agency
CDHNU	Consejo de Derechos Humanos de las Naciones Unidas
OPEL	Oficina de participación, educación y localidades (parte de la SDA)
EIC	Enfermedad isquémica del corazón
EPOC	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica
AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
IRA	Infecciones respiratorias agudas
ECR	Enfermedades crónicas respiratorias
CIDH	Comisión Interamericana de Derechos Humanos
Corte IDH	Corte Interamericana de Derechos Humanos

• DOCUMENTOS 1

ETNORREPARACIONES.

La justicia colectiva étnica y la reparación a pueblos indígenas y comunidades afrodescendientes en Colombia

Publicación digital e impresa
César Rodríguez Garavito,
Yukyan Lam
2011

• DOCUMENTOS 2

LA CONSULTA PREVIA: DILEMAS Y SOLUCIONES. Lecciones

del proceso de construcción del decreto de reparación y restitución de tierras para pueblos indígenas en Colombia

Publicación digital e impresa
César Rodríguez Garavito,
Natalia Orduz Salinas
2012

• DOCUMENTOS 3

LA ADICCIÓN PUNITIVA.

La desproporción de leyes de drogas en América Latina

Publicación digital e impresa
Rodrigo Uprimny, Diana Esther Guzmán, Jorge Parra Norato
2012

• DOCUMENTOS 4

ORDEN PÚBLICO Y PERFILES

RACIALES. Experiencias de afrocolombianos con la policía en Cali

Publicación digital e impresa
Yukyan Lam, Camilo Ávila
2013

• DOCUMENTOS 5

INSTITUCIONES Y NARCOTRÁFICO.

La geografía judicial de los delitos de drogas en Colombia

Publicación digital
Mauricio García Villegas,
Jose Rafael Espinosa Restrepo,
Felipe Jiménez Ángel
2013

• DOCUMENTOS 6

ENTRE ESTEREOTIPOS:

Trayectorias laborales de mujeres y hombres en Colombia

Publicación digital
Diana Esther Guzmán,
Annika Dalén
2013

• DOCUMENTOS 7

LA DISCRIMINACIÓN RACIAL

EN EL TRABAJO. Un estudio experimental en Bogotá

Publicación digital e impresa
César Rodríguez Garavito,
Juan Camilo Cárdenas C.,
Juan David Oviedo M.,
Sebastián Villamizar S.
2013

• DOCUMENTOS 8

LA REGULACIÓN DE LA INTERRUPCIÓN VOLUNTARIA DEL EMBARAZO EN COLOMBIA

Publicación digital
Annika Dalén, Diana Esther Guzmán, Paola Molano
2013

• DOCUMENTOS 9

ACOSO LABORAL

Publicación digital
Diana Guzmán, Annika Dalén
2013

• DOCUMENTOS 10

ACCESO A LA JUSTICIA. Mujeres, conflicto armado y justicia

Publicación digital
Diana Esther Guzmán Rodríguez,
Sylvia Prieto Dávila
2013

• DOCUMENTOS 11

LA IMPLEMENTACIÓN DE LA DESPENALIZACIÓN PARCIAL DEL ABORTO

Publicación digital e impresa
Annika Dalén
2013

• DOCUMENTOS 12

**RESTITUCIÓN DE TIERRAS
Y ENFOQUE DE GÉNERO**

Publicación digital e impresa
Diana Esther Guzmán,
Nina Chaparro
2013

• DOCUMENTOS 13

**RAZA Y VIVIENDA EN COLOMBIA.
La segregación residencial
y las condiciones de vida
en las ciudades**

Publicación digital e impresa
María José Álvarez Rivadulla,
César Rodríguez Garavito,
Sebastián Villamizar Santamaría,
Natalia Duarte
2013

• DOCUMENTOS 14

**PARTICIPACIÓN POLÍTICA DE
LAS MUJERES Y PARTIDOS.
Posibilidades a partir de la
reforma política de 2011.**

Publicación digital
Diana Esther Guzmán Rodríguez,
Sylvia Prieto Dávila
2013

• DOCUMENTOS 15

**BANCADA DE MUJERES
DEL CONGRESO. Una historia
por contar**

Publicación digital
Sylvia Cristina Prieto Dávila,
Diana Guzmán Rodríguez
2013

• DOCUMENTOS 16

**OBLIGACIONES CRUZADAS.
Políticas de drogas y derechos
humanos**

Publicación digital
Diana Guzmán, Jorge Parra,
Rodrigo Uprimny
2013

• DOCUMENTOS 17

**GUÍA PARA IMPLEMENTAR
DECISIONES
SOBRE DERECHOS SOCIALES.
Estrategias para los jueces,
funcionarios y activistas**

Publicación digital e impresa
César Rodríguez Garavito,
Celeste Kauffman
2014

• DOCUMENTOS 18

**VIGILANCIA DE LAS
COMUNICACIONES EN COLOMBIA.
El abismo entre la capacidad
tecnológica y los controles legales**

Publicación digital e impresa
Carlos Cortés Castillo
2014

• DOCUMENTOS 19

**NO INTERRUPIR EL DERECHO.
Facultades de la Superintendencia
Nacional de Salud
en materia de IVE**

Publicación digital
Nina Chaparro González,
Annika Dalén
2015

• DOCUMENTOS 20

**DATOS PERSONALES EN
INFORMACIÓN PÚBLICA.
Oscuridad en lo privado y luz en lo
público**

Publicación digital e impresa
Vivian Newman
2015

• DOCUMENTOS 21

**REQUISAS, ¿A DISCRECIÓN?
Una tensión entre seguridad e
intimidad**

Publicación digital e impresa
Sebastián Lalinde Ordóñez
2015

• DOCUMENTOS 22

**FORMACIÓN EN VIOLENCIA SEXUAL
EN EL CONFLICTO ARMADO.**

***Una propuesta metodológica para
funcionarios***

Publicación digital

Silvia Rojas Castro, Annika Dalén
2015

• DOCUMENTOS 23

CASAS DE JUSTICIA:

una buena idea mal administrada

Publicación digital

Equipo de investigación:

Mauricio García Villegas,

Jose Rafael Espinosa Restrepo,

Sebastián Lalinde Ordóñez,

Lina Arroyave Velásquez,

Carolina Villadiego Burbano

2015

• DOCUMENTOS 24

LOS REMEDIOS QUE DA EL

DERECHO. El papel del juez

constitucional cuando la

***interrupción del embarazo no se
garantiza***

Publicación digital

Diana Esther Guzmán,

Nina Chaparro González

2015

• DOCUMENTOS 25

**EL EJERCICIO DE LA INTERRUPCIÓN
VOLUNTARIA DEL EMBARAZO EN EL
MARCO DEL CONFLICTO ARMADO**

Publicación digital

Margarita Martínez Osorio, Annika
Dalén,

Diana Esther Guzmán,

Nina Chaparro González

2015

• DOCUMENTOS 26

CUIDADOS PALIATIVOS.

***Abordaje de la atención en salud
desde un enfoque de derechos
humanos***

Publicación digital e impresa

Isabel Pereira Arana

2016

• DOCUMENTOS 27

**SARAYAKU ANTE EL SISTEMA
INTERAMERICANO DE DERECHOS
HUMANOS.**

***Justicia para el pueblo del Medio
Día y su selva viviente***

Publicación digital e impresa

Mario Melo Cevallos

2016

• DOCUMENTOS 28

IDEAS PARA CONSTRUIR LA PAZ

LOS TERRITORIOS DE LA PAZ.

***La construcción del estado local
en Colombia***

Publicación digital e impresa

Mauricio García Villegas,

Nicolás Torres Echeverry,

Javier Revelo Rebolledo,

Jose R. Espinosa Restrepo,

Natalia Duarte Mayorga

2016

• DOCUMENTOS 29

IDEAS PARA CONSTRUIR LA PAZ

NEGOCIANDO DESDE LOS

***MÁRGENES. La participación
política de las mujeres en los
procesos de paz en Colombia
(1982-2016)***

Publicación digital e impresa

Nina Chaparro González,

Margarita Martínez Osorio

2016

• DOCUMENTOS 30

IDEAS PARA CONSTRUIR LA PAZ

LA PAZ AMBIENTAL.

***Retos y propuestas
para el posacuerdo***

Publicación digital e impresa

César Rodríguez Garavito,

Diana Rodríguez Franco,

Helena Durán Crane

2016

• DOCUMENTOS 31

IDEAS PARA CONSTRUIR LA PAZ

**ACCESO A LOS ARCHIVOS
DE INTELIGENCIA Y
CONTRAİNTELIGENCIA EN EL
MARCO DEL POSACUERDO**

Publicación digital e impresa

Ana María Ramírez Mourraille,
María Paula Ángel Arango,
Mauricio Albarracín Caballero,
Rodrigo Uprimny Yepes,
Vivian Newman Pont
2017

• DOCUMENTOS 32

**JUSTICIA TRANSICIONAL Y ACCIÓN
SIN DAÑO. Una reflexión desde el
proceso de restitución de tierras**

Publicación digital e impresa

Aura Patricia Bolívar Jaime,
Olga del Pilar Vásquez Cruz
2017

• DOCUMENTOS 33

**SIN REGLAS NI CONTROLES.
Regulación de la publicidad
de alimentos y bebidas dirigida
a menores de edad**

Publicación digital e impresa

Diana Guarnizo Peralta
2017

• DOCUMENTOS 34

**ACADEMIA Y CIUDADANÍA.
Profesores universitarios
cumpliendo y violando normas**

Publicación digital e impresa

Mauricio García Villegas,
Nicolás Torres Echeverry,
Andrea Ramírez Pisco,
Juan Camilo Cárdenas Campo
2017

• DOCUMENTOS 35

IDEAS PARA CONSTRUIR LA PAZ

**ESTRATEGIAS PARA UNA REFORMA
RURAL TRANSICIONAL**

Publicación digital e impresa

Nelson Camilo Sánchez León
2017

• DOCUMENTOS 36

IDEAS PARA CONSTRUIR LA PAZ

**SISTEMA DE JUSTICIA TERRITORIAL
PARA LA PAZ**

Publicación digital e impresa

Carolina Villadiego Burbano,
Sebastián Lalinde Ordóñez
2017

• DOCUMENTOS 37

**DELITOS DE DROGAS Y
SOBREDOSIS CARCELARIA
EN COLOMBIA**

Publicación digital e impresa

Rodrigo Uprimny Yepes,
Sergio Chaparro Hernández,
Luis Felipe Cruz Olivera
2017

• DOCUMENTOS 38

IDEAS PARA CONSTRUIR LA PAZ

**COCA, INSTITUCIONES
Y DESARROLLO. Los retos
de los municipios productores
en el posacuerdo**

Publicación digital e impresa

Sergio Chaparro Hernández,
Luis Felipe Cruz Olivera
2017

• DOCUMENTOS 39

IDEAS PARA CONSTRUIR LA PAZ

**RESTITUCIÓN DE TIERRAS,
POLÍTICA DE VIVIENDA
Y PROYECTOS PRODUCTIVOS.
Ideas para el posacuerdo**

Publicación digital e impresa

Aura Patricia Bolívar Jaime,
Angie Paola Botero Giraldo,
Laura Gabriela Gutiérrez Baquero
2017

• DOCUMENTOS 40

**CÁRCEL O MUERTE. El secreto
profesional como garantía
fundamental en casos de aborto**

Publicación digital

Ana Jimena Bautista Revelo,
Anna Joseph,
Margarita Martínez Osorio
2017

• DOCUMENTOS 41

SOBREDOSIS CARCELARIA Y POLÍTICA DE DROGAS EN AMÉRICA LATINA

Publicación digital e impresa
Sergio Chaparro Hernández,
Catalina Pérez Correa
2017

• DOCUMENTOS 42

SOBREPESO Y CONTRAPESOS. La autorregulación de la industria no es suficiente para proteger a los menores de edad

Publicación digital e impresa
Valentina Roza Rangel
2017

• DOCUMENTOS 43

VÍCTIMAS Y PRENSA DESPUÉS DE LA GUERRA. Tensiones entre intimidad, verdad histórica y libertad de expresión

Publicación digital e impresa
Vivian Newman Pont,
María Paula Ángel Arango,
María Ximena Dávila Contreras
2018

• DOCUMENTOS 44

LO QUE NO DEBE SER CONTADO. Tensiones entre el derecho a la intimidad y el acceso a la información en casos de interrupción voluntaria del embarazo

Publicación digital
Nina Chaparro González,
Diana Esther Guzmán,
Silvia Rojas Castro
2018

• DOCUMENTOS 45

POSCONFLICTO Y VIOLENCIA SEXUAL. La garantía de la interrupción voluntaria del embarazo en los municipios priorizados para la paz

Publicación digital
Ana Jimena Bautista Revelo,
Blanca Capacho Niño,
Margarita Martínez Osorio
2018

• DOCUMENTOS 46

UN CAMINO TRUNCADO. LOS DERECHOS SEXUALES Y REPRODUCTIVOS EN MONTES DE MARÍA

Publicación digital e impresa
María Ximena Dávila,
Margarita Martínez, Nina Chaparro
2019

• DOCUMENTOS 47

ETIQUETAS SIN DERECHOS. Etiquetado de productos comestibles: un análisis desde los derechos humanos

Publicación digital e impresa
Diana Guarnizo, Ana María Narváez
2019

• DOCUMENTOS 48

RENDICIÓN DE CUENTAS DE GOOGLE Y OTROS NEGOCIOS EN COLOMBIA. La protección de datos personales en la era digital

Publicación digital e impresa
Vivian Newman Pont, María Paula Ángel Arango
2019

• DOCUMENTOS 49

ELOGIO A LA BULLA. Protesta y democracia en Colombia

Publicación digital e impresa
Sebastián Lalinde Ordóñez
2019

• DOCUMENTOS 50

LOS TERCEROS COMPLEJOS.

**La competencia limitada de la
Jurisdicción Especial para la Paz**

Publicación digital e impresa

Sabine Michalowski,
Alejandro Jiménez Ospina,
Hobeth Martínez Carrillo,
Daniel Marín López
2019

• DOCUMENTOS 51

**DIME DÓNDE ESTUDIAS Y TE DIRÉ
QUÉ COMES. Oferta y publicidad
en tiendas escolares de Bogotá**

Publicación digital e impresa

Valentina Rozo Ángel
2019

• DOCUMENTOS 52

**LOS CAMINOS DE DOLOR.
ACCESO A CUIDADOS PALIATIVOS
Y TRATAMIENTO POR CONSUMO
DE HEROÍNA EN COLOMBIA**

Publicación digital e impresa

Isabel Pereira, Lucía Ramírez
2019

• DOCUMENTOS 53

**LOS SEGUNDOS OCUPANTES
EN EL PROCESO DE RESTITUCIÓN
DE TIERRAS. RETO A LA
REPARACIÓN CON VOCACIÓN
TRANSFORMADORA**

Publicación digital e impresa

Hobeth Martínez Carrillo
2019

• DOCUMENTOS 54

**CANNABIS EN LATINOAMÉRICA.
LA OLA VERDE Y LOS RETOS
HACIA LA REGULACIÓN**

Publicación digital e impresa

Alejandro Corda, Ernesto Cortés,
Diego Piñol Arriagada
2019

• DOCUMENTOS 55

**ACCESO, PROMOCIÓN Y
PERMANENCIA DE NIÑOS, NIÑAS
Y ADOLESCENTES MIGRANTES
EN EL SISTEMA EDUCATIVO
COLOMBIANO. AVANCES, RETOS Y
RECOMENDACIONES**

Publicación digital e impresa

Silvia Ruiz Mancera,
Lucía Ramírez Bolívar,
Valentina Rozo Ángel
2020

• DOCUMENTOS 56

**ENTRE LA BATA Y LA TOGA.
El rol de los tribunales de ética
médica en la garantía de los
derechos sexuales y reproductivos**

Publicación digital e impresa

María Ximena Dávila,
Nina Chaparro
2020

• DOCUMENTOS 57

**LA IMAGINACIÓN MORAL
EN EL TRÁNSITO HACIA LA PAZ.
Experiencias regionales
de convivencia pacífica
en Montes de María**

Publicación digital

Ivonne Elena Díaz García
2020

• DOCUMENTOS 58

**FESTÍN DE DATOS.
Empresas y datos personales
en América Latina**

Publicación digital e impresa

Coordinadores académicos:
Vivian Newman Pont,
Juan Carlos Upegui,
Daniel Ospina-Celis
2020

• DOCUMENTOS 59

**CATASTRO PARA LA PAZ.
TENSIONES, PROBLEMAS,
POSIBILIDADES**

Publicación digital e impresa

Felipe León, Juana Dávila Sáenz
2020

• DOCUMENTOS 60

¿RESTITUCIÓN DE PAPEL? Notas sobre el cumplimiento del posfallo

Publicación digital
Cheryl Morris Rada,
Ana Jimena Bautista Revelo,
Juana Dávila Sáenz
2020

• DOCUMENTOS 61

¿A QUIÉNES SANCIONAR? Máximos responsables y participación determinante en la Jurisdicción Especial para la Paz

Publicación digital e impresa
Sabine Michalowski,
Michael Cruz Rodríguez,
Hobeth Martínez Carrillo
2020

• DOCUMENTOS 62

DISCRIMINACIÓN DE GÉNERO EN EL FÚTBOL. Construir una caja de herramientas para la igualdad de género en el juego bonito

Publicación digital
Rachel Davidson Raycraft,
Rebecca Robinson, Jolena Zabel
Colaboradores:
Nelson Camilo Sánchez León,
María Ximena Dávila,
Nina Chaparro González
2020

• DOCUMENTOS 63

LOS PUEBLOS ÉTNICOS DE COLOMBIA. Derechos territoriales y reparaciones. Módulo de formación para procuradores y servidores del Ministerio Público

Publicación digital e impresa
María Paula Tostón Sarmiento
2020

• DOCUMENTOS 64

LA PARTICIPACIÓN CIUDADANA EN EL SECTOR EXTRACTIVO EN COLOMBIA

Publicación digital e impresa
Fabio E. Velásquez
2021

• DOCUMENTOS 65

LA GUERRA EN MOVIMIENTO. Tomas guerrilleras y crímenes de guerra en la ejecución del plan estratégico de las FARC-EP en el Tolima (1993-2002)

Publicación digital e impresa
Juana Dávila Sáenz, Felipe León,
Bibiana Ramírez, Ricardo Cruz,
Juan Diego Restrepo
2021

• DOCUMENTOS 66

OMISIONES QUE MATAN. Estándares en seguridad vehicular y calidad del aire, su impacto en los derechos humanos

Publicación digital e impresa
Paula Angarita Tovar,
Johnattan García Ruiz,
Diana Guarnizo Peralta
2021

• DOCUMENTOS 67

DERECHOS HUMANOS POR LA IGUALDAD SOCIOECONÓMICA

TERRITORIO WAYÚU: ENTRE DISTANCIAS Y AUSENCIAS. Pobreza alimentaria, malnutrición y acceso a agua potable en los entornos escolares de Uribia

Publicación digital e impresa
Julián Gutiérrez-Martínez,
Ana María Narváez Olaya,
Johnattan García Ruiz,
Diana Guarnizo Peralta
2021

• DOCUMENTOS 68

DERECHOS HUMANOS POR LA IGUALDAD SOCIOECONÓMICA

MUJERES, CALLE Y PROHIBICIÓN: Cuidado y violencia a los dos lados del Otún

Publicación digital e impresa
Isabel Pereira Arana,
María Ximena Dávila Contreras,
Mariana Escobar Roldán,
David Filomena Velandia,
Angélica Jiménez Izquierdo,
Hugo Castro Cortés
2021

• DOCUMENTOS 69

DERECHOS HUMANOS
POR LA IGUALDAD SOCIOECONÓMICA

**LA DESIGUALDAD QUE
RESPIRAMOS. Una mirada desde
la justicia ambiental a la política
de descontaminación del aire
en Bogotá 2010-2020**

Publicación digital e impresa
Diana León Torres,
Sebastián Rubiano,
Vanessa Daza Castillo
2021

• DOCUMENTOS 70

DERECHOS HUMANOS
POR LA IGUALDAD SOCIOECONÓMICA

**EDUCACIÓN Y CLASES SOCIALES
EN COLOMBIA. Un estudio sobre
apartheid educativo**

Publicación digital e impresa
Mauricio García Villegas,
Leonardo Fergusson
2021

• DOCUMENTOS 71

DERECHOS HUMANOS
POR LA IGUALDAD SOCIOECONÓMICA

**DESIGUALDADES DIGITALES.
Aproximación sociojurídica al
acceso a Internet en Colombia**

Publicación digital e impresa
Víctor Práxedes Saavedra Rionda,
Daniel Ospina-Celis,
Juan Carlos Upegui Mejía,
Diana C. León Torres
2021

• DOCUMENTOS 72

**¿CÓMO CONTRIBUIR A LA PAZ CON
VERDAD Y JUSTICIA? Aportes a
la verdad y reconocimiento de
responsabilidad por quienes serán
seleccionados en la Jurisdicción
Especial para la Paz**

Publicación digital e impresa
Sabine Michalowski,
Michael Cruz Rodríguez,
Hobeth Martínez Carrillo
2021

• DOCUMENTOS 73

**NORMAS, VEHÍCULOS Y USUARIOS:
un análisis constitucional
de siniestralidad y seguridad
vehicular en Colombia**

Publicación digital e impresa
Paula Angarita Tovar Diana
Guarnizo Peralta
2021

• DOCUMENTOS 74

**SEGURIDAD VEHICULAR
Y DERECHO INTERNACIONAL
ECONÓMICO: preguntas
y respuestas para Colombia**

Publicación digital e impresa
René Urueña Hernández,
Paula Angarita Tovar,
Diana Guarnizo Peralta
2021

• DOCUMENTOS 75

**¿BARRERAS INSUPERABLES?
Un análisis de la etapa
administrativa del proceso
de restitución de tierras**

Publicación digital e impresa
Aarón Alfredo Acosta,
Nelson Camilo Sánchez
2021

• DOCUMENTOS 76

**TOAR ANTICIPADOS Y SANCIONES
PROPIAS: reflexión informada
para la Jurisdicción Especial
para la Paz**

Publicación digital
Clara Sandoval Villalba,
Hobeth Martínez Carrillo,
Michael Cruz Rodríguez,
Nicolás Zuluaga Afanador,
Juliana Galindo Villarreal,
Pilar Lovelle Moraleda,
Juliette Vargas Trujillo,
Adriana Romero Sánchez,
Andrea Rodríguez Daza
2021

• DOCUMENTOS 77

**¿LA PAZ AL MENOR COSTO?
Análisis presupuestal de la
implementación de la paz
territorial y el sistema integral**

Publicación digital

Alejandro Rodríguez Llach

Hobeth Martínez Carrillo

2022

• DOCUMENTOS 78

DERECHOS HUMANOS
POR LA IGUALDAD SOCIOECONÓMICA

**RENTA BÁSICA FEMINISTA:
de la utopía a la necesidad
urgente para la Paz**

Publicación digital e impresa

María Ximena Dávila,

Nina Chaparro,

Alejandro Rodríguez Llach,

Diana León

2022

• DOCUMENTOS 79

**MÁS ALLÁ DE LOS MÁXIMOS
RESPONSABLES. Los partícipes
no determinantes en los crímenes
más graves y representativos ante
la Jurisdicción Especial para la Paz**

Publicación digital

Sabine Michalowski,

Michael Cruz Rodríguez

2022

• DOCUMENTOS 80

**SER MIGRANTE Y TRABAJAR
EN COLOMBIA: ¿Cómo va la
inclusión laboral de las personas
provenientes de Venezuela?**

Publicación digital e impresa

Lucía Ramírez Bolívar;

Lina Arroyave Velásquez;

Jessica Corredor Villamil

2022

• DOCUMENTOS 81

**REFLEXIONES SOBRE LA REMISIÓN
TEMPRANA DE COMPARECIENTES
A LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
Y ACUSACIÓN**

**El caso fundacional de Almario
Rojas**

Publicación digital e impresa

Sabine Michalowski

Michael Cruz Rodríguez

2022

• DOCUMENTOS 82

**JUSTICIA RESTAURATIVA, DIÁLOGO,
REPARACIÓN Y RENDICIÓN
DE CUENTAS DE ACTORES
ECONÓMICOS EN COLOMBIA**

Publicación digital

Aarón Alfredo Acosta,

Alejandro Jiménez Ospina,

María José León Marín,

Michael Monclou Chaparro,

Laura Natalia Torres Acosta

2022

Transparente como el aire.

Ni información, ni calidad, ni derechos

La mala calidad del aire es un problema ambiental y de salud pública de urgente atención por parte de los estados, quienes han adquirido compromisos internacionales que los obliga a adoptar medidas preventivas, regulatorias y de control. En Colombia existen debilidades en el monitoreo del aire, así como en la institucionalidad que debe proteger los derechos de la ciudadanía. Particularmente Bogotá, una de las ciudades que mayor polución tiene, se presenta como un caso de estudio para intercomparar datos del sistema oficial de medición de la calidad del aire y los sensores de bajo costo como apuesta para complementar y reforzar la línea base de datos públicos, así como para involucrar a la ciudadanía en la producción de ciencia.

978-628-7517-56-1



9 786287 517561