



**Elementos clave para estudiar la contaminación atmosférica en el municipio de
Rionegro, Antioquia**

Daniela Patiño Hernández

Ana María Ruíz Grajales

Monografía presentada para optar por el título de Profesional en Desarrollo Territorial

Asesor

Alderid Gutiérrez Loiza, docente del pregrado en Desarrollo Territorial

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Económicas
Desarrollo Territorial
El Carmen de Viboral, Antioquia
2023

Cita	(Patiño Hernández & Ruiz Grajales, 2023)
Referencia	Patiño Hernández, D., & Ruiz Grajales, A. M. (2023). <i>Elementos clave para estudiar la contaminación atmosférica en el municipio de Rionegro, Antioquia</i> . [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, El Carmen de Viboral, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Biblioteca Seccional Oriente (El Carmen de Viboral)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda

Decano/director: Sergio Iván Restrepo Ochoa

Jefe departamento: Cristian Sánchez Salazar

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen.....	7
Abstract	8
Introducción	9
Aspectos metodológicos	13
1. Industria y transporte: elementos teóricos y primeros hallazgos en el análisis de la contaminación atmosférica en Rionegro.....	16
<i>1.1 Industria</i>	16
<i>1.2 Transporte</i>	25
2. Afectaciones a la salud y el medio ambiente como consecuencia de la contaminación atmosférica.....	31
<i>2.1 Salud</i>	31
<i>2.2 Líquenes como bioindicadores de contaminación</i>	40
3. Conclusiones	46
4. Recomendaciones	48
Referencias bibliográficas.....	52
Anexo.....	57
<i>Guía para abordar la contaminación atmosférica en el municipio de Rionegro</i>	57

Lista de tablas

Tabla 1. Air Quality Guidelines (AQG) 2005 recomendados	33
Tabla 2. Air Quality Guidelines (AQG) 2021 recomendados y objetivos intermedios	34
Tabla 3. Niveles máximos permisibles en Colombia a partir del 2018	35
Tabla 4. Niveles máximos permisibles en Colombia a partir del 2030	35
Tabla 5. Niveles según los rangos de exposición de 24 horas	35

Lista de figuras

Figura 1. Rionegro: variación diaria de la concentración de PM _{2.5}	18
Figura 2. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos	19
Figura 3. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos	20
Figura 4. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos	20
Figura 5. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos	21
Figura 6. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos	21
Figura 7. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos	22
Figura 8. Fábricas en la autopista Rionegro - Guarne Antioquia, en diferentes momentos ...	23
Figura 9. Fábricas en la autopista Rionegro – Guarne Antioquia, en diferentes momentos ..	23
Figura 10. Fábricas en la autopista Rionegro - Guarne Antioquia, en diferentes momentos .	24
Figura 11. Fábricas en el sector Belén - Rionegro Antioquia, en diferentes momentos	24
Figura 12. Fábricas en la autopista Rionegro – Guarne Antioquia, en diferentes momentos	24
Figura 13. Sector Laureles, Rionegro Antioquia	28
Figura 14. Sector Clínica Somer, Rionegro Antioquia	29
Figura 15. Sector Terminal de Transporte, Rionegro Antioquia	29
Figura 16. Sector Belén, Rionegro Antioquia.....	30
Figura 17. Combustión de fuentes móviles en emisiones GEI zona urbana 2018-2019 Rionegro, Antioquia.....	38
Figura 18. Combustión de fuentes móviles en emisiones GEI 2018-2019. Rionegro, Antioquia.....	39
Figura 19. Clorosis.....	42
Figura 20. Deseccación.....	42
Figura 21. Necrosis	42
Figura 22. Cambios de coloración	42
Figura 23. Reducción de talla	42
Figura 24. Clorosis.....	44
Figura 25. Clorosis.....	44
Figura 26. Deseccación.....	44
Figura 27. Deseccación.....	44
Figura 28. Necrosis	44
Figura 29. Necrosis	44
Figura 30. Decoloración	45
Figura 31. Mapa red AireCiudadano - La Ceja del Tambo, Antioquia	50

Siglas, acrónimos y abreviaturas

DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Asuntos Ambientales
OMS	Organización Mundial de la Salud
PM	Material particulado
CORNARE	Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare
CEO	Corporación Empresarial del Oriente Antioqueño
UCI	Unidad de Cuidados Intensivos
IDW	Inverse Distance Weighting
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
ANDEMOS	Asociación Colombiana de Vehículos Automotores
SOMOS	Sistema Operativo de Movilidad del Oriente Sostenible
ENT	Enfermedades no transmisibles
AQG	Air Quality Guidelines
GEI	Gases de Efecto Invernadero
UCO	Universidad Católica de Oriente
DNP	Departamento Nacional de Planeación
SVCA	Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire

Resumen

La presente monografía permite examinar los elementos clave para analizar la contaminación atmosférica en el municipio de Rionegro, sustentado en el principio de precaución establecido en el numeral 15 de la Declaración de Rio sobre Medio Ambiente y Desarrollo. En este sentido, se identifica que la industria y la movilidad son dos actividades que emiten material particulado a la atmosfera, el cual, genera múltiples afectaciones a la salud de los seres humanos y otros seres vivos como los líquenes. Se analizan estos factores en el municipio y se plantean dos mapas cartográficos que muestran los lugares con mayores índices de contaminantes en el aire en la zona urbana y una parte de la zona rural de Rionegro.

Palabras clave: contaminación atmosférica, industria, movilidad, material particulado, salud, Rionegro.

Abstract

This monograph examines the key elements for analyzing atmospheric pollution in the municipality of Rionegro, based on the precautionary principle established in paragraph 15 of the Rio Declaration on Environment and Development. In this sense, it is identified that industry and mobility are two activities that emit particulate matter into the atmosphere, which generates multiple affectations to the health of human beings and other living beings such as lichens. Likewise, these factors are analyzed in the municipality and two cartographic maps are presented showing the places with the highest levels of air pollutants in the urban area and part of the rural area of Rionegro.

Key words: air pollution, industry, mobility, particulate matter, health, Rionegro.

Introducción

“Colombia, como muchos de los países de América Latina viene presenciando un proceso acelerado de concentración de su población en las áreas urbanas” (Universidad Externado y Centro de Investigación sobre Dinámica Social, 2007. p.8); estos autores plantean que la violencia rural, las precarias condiciones de tenencia de la tierra, la búsqueda de una mejor calidad de vida o mayores ingresos económicos, entre otras circunstancias han sido factores importantes para explicar las evoluciones de crecimiento urbano en el país. De acuerdo con Murad (2003) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE- en 1938 el 30,94% de la población era urbana, para el año 1973 ya representaba el 59,12%, en 1993 la población urbana aumentó al 68,63% del total y para el año 2018 el 77,1% de la población se encontraba asentada en zonas urbanas del país y el 22,9% restante en zonas rurales.

Estas transformaciones implican múltiples retos en el ordenamiento territorial de los centros urbanos en términos de planeación y desarrollo sostenible, teniendo en cuenta que, si bien el crecimiento urbano y la concentración de la población presentan oportunidades relacionadas con una mayor oferta de bienes y servicios, un aumento en la productividad, innovación y mayor mano de obra disponible, entre otras; puede también traer consigo, múltiples implicaciones de orden social, económico y ambiental, como lo son la pérdida de ruralidad, la demanda de infraestructura, de servicios básicos y de sistemas de transporte, así como contaminación del suelo, el agua y el aire. A lo largo del tiempo se han identificado y estudiado las múltiples consecuencias de este fenómeno; por interés de la presente investigación, se abordará principalmente lo relacionado con la contaminación atmosférica, siendo uno de los problemas que afronta la sociedad actual y el cual se evidencia principalmente en las ciudades y grandes centros poblados del mundo.

A escala mundial y de América Latina, la mayoría de las principales urbes presentan altos niveles de contaminación ambiental atmosférica, por lo cual, se ha logrado reconocer la importancia de evaluar el impacto que este genera en el medio ambiente y en la salud de las personas. En este sentido, se ha hecho evidente la necesidad de fortalecer el control y monitoreo de las emisiones que se generan a la atmósfera por parte de actividades como la industria y la movilidad. Este interés, se logró efectuar mediante acuerdos como los Objetivos de Desarrollo Sostenible -ODS- (2015) y la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático -CMNUCC- (1994). Así mismo, varios países del continente, entre ellos Brasil, México,

Colombia y Costa Rica, han implementado diversas regulaciones medioambientales a través de decretos, leyes, constituciones y sistemas de carácter ambiental, entre otros, que aportan a la protección y cuidado del medio ambiente.

Respecto a la escala nacional es importante destacar el Instituto de Hidrología, Meteorología y Asuntos Ambientales -IDEAM- como el ente encargado de hacer vigilancia de la calidad del aire en el país, para lo cual, contribuye con la formulación de programas, políticas, estrategias e instrumentos orientados a una adecuada planificación del territorio y el seguimiento y control de las fuentes de emisión, que conlleven a prevenir y controlar el aumento de la contaminación atmosférica (IDEAM, 2022). De modo general, el IDEAM en tres estudios sobre la contaminación del aire (2012, 2016 y 2017) plantea que, si bien Colombia ha tenido avances importantes respecto a la prevención y control de la contaminación atmosférica, el país presenta algunas falencias en el desarrollo de inventarios de fuentes de emisión, aplicación de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, desarrollo de estudios epidemiológicos y estimaciones económicas de la problemática de calidad del aire.

Por su parte, el municipio de Rionegro Antioquia, lugar donde se centra la presente investigación, ha desarrollado diversas transformaciones espaciales en los últimos años, entre ellas se destaca el crecimiento demográfico, las economías de aglomeración, el asentamiento industrial y la construcción de equipamientos metropolitanos, entre otros. De acuerdo con Caselli (2000), los lugares caracterizados por poseer numerosas concentraciones industriales y demográficas, se encuentran expuestos a las emisiones de cantidades considerables de sustancias contaminantes en la atmósfera. La investigación considera que las actividades de transporte e industria son principales aspectos a tratar como posibles fuentes de contaminación atmosférica en el municipio de Rionegro, dado que otros factores como deforestación y ganadería extensiva son poco frecuentes, las cuales generan -o podrían generar- múltiples impactos sociales y ambientales. Según informes del IDEAM, hasta el momento no se tienen conocimientos de reportes que den cuenta de deforestación en el municipio, aún así, esta actividad se asocia con los incendios forestales resultado de preparación de terrenos incontrolados (Lineamiento para la formulación del Informe de Gestión Ambiental, 2019). Aunque el Oriente antioqueño presenta altos porcentajes de ocupación ganadera, Rionegro no se encuentra relacionado entre los municipios que tienen mayor extensión de pastos como por ejemplo Puerto Triunfo con 73%, Abejorral en 70% y La Ceja con proporciones cercanas al 50% aproximadamente (CORNARE, et al. 2016).

En este sentido, el interés de la presente investigación surge por la relevancia que representa la contaminación atmosférica como uno de los principales problemas ambientales del mundo, el cual, conlleva a múltiples impactos en el medio ambiente y en la salud de los seres vivos, según la Organización Mundial de la Salud -OMS- (2021) un aire limpio o un aire con calidad, es un requisito básico de la salud y el bienestar humano. En Colombia, algunas de las ciudades se enfrentan a este desafío ambiental, siendo el municipio de Rionegro un territorio no solo con características para la transición a ciudad sino, además para hacer frente a una posible contaminación atmosférica, por esta razón, la pesquisa plantea como principal objetivo examinar los elementos clave para el análisis de la contaminación atmosférica en el municipio de Rionegro, sustentado en el principio de precaución, el cual se ampliará más adelante en este mismo apartado. En concordancia, se elaboró una guía o manual con las indicaciones pertinentes respecto a la manera en la cual se podría abordar el estudio de la contaminación atmosférica en Rionegro y, a partir del análisis de resultados, las entidades correspondientes puedan tomar decisiones encaminadas a controlar o mitigar su proliferación.

En principio, se plantea que la movilidad es una fuente que contribuye a la contaminación, teniendo en cuenta que arroja a la atmósfera material particulado -PM- debido a la combustión del petróleo implementado en los vehículos de transporte. Según Mészáros (1999), el material particulado es comprendido como la mezcla de partículas sólidas y líquidas presentes en la atmósfera, las cuales, de acuerdo con Fang et al. (2003) son emitidas por el hollín del diesel, el polvo de las vías, el polvo de la agricultura y las partículas resultantes de procesos productivos. De acuerdo a su tamaño, el material particulado se cataloga en PM_{10} y $PM_{2,5}$, a partir de Sbarato et al. (2000) el primero es el de mayor tamaño, su medida es de 10 micrones de metro - μm - está compuesto por partículas gruesas y es producido esencialmente por la combustión de diésel y partículas de emisiones industriales. El segundo - $PM_{2,5}$ - es el de menor tamaño según Gaviria, et al. (2011), estos autores argumentan que está compuesto por partículas finas y su medida es 2,5 micrones de metro - μm -, se produce por la combinación de compuestos asociados a partículas ácidas como resultado de la ignición de combustibles fósiles, la producción manufacturera y la quema agrícola, además, poseen una capacidad de introducirse fácilmente en las vías respiratorias debido a su tamaño. Por su parte, la industria genera impacto ambiental y contaminación atmosférica a causa de los múltiples residuos y gases que resultan de los procesos de fabricación. Sumado a lo anterior, se considera que el aumento de las demandas por parte de la población implica un crecimiento en los niveles de producción, por lo cual, los

sectores en los cuales se ha concentrado esta actividad -en este caso, Rionegro- presentan, por lo general, un alto potencial de impacto ambiental.

Respecto a la relación de movilidad e industria, se plantean dos aspectos principales: En un primer momento, aumenta la demanda vehicular teniendo en cuenta que: 1) surge la necesidad de trasladar insumos requeridos para la producción industrial desde otros lugares y, 2) se movilizan los productos terminados por parte de la empresa. Y en un segundo momento, la industria propicia una mayor concentración de personas y un aumento en la movilidad de las mismas con el fin de desplazarse desde sus lugares de residencia hacia sus lugares de trabajo, y viceversa (Bedoya y Martínez, 2009).

Es importante mencionar que en el municipio se han realizado algunas aproximaciones respecto a la contaminación atmosférica con el objetivo de medir y analizar su comportamiento y evolución. Los resultados han establecido que, en su mayoría, Rionegro no ha superado los niveles máximos permisibles establecidos por La Organización Mundial de la Salud, -los cuales se desarrollarán en apartados posteriores-. A pesar de lo anterior, la investigación se sustenta en el principio de precaución planteado en el numeral 15 en la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de 1992, el cual proclama que “con el fin de proteger el medio ambiente, los Estados deberán aplicar ampliamente el criterio de precaución conforme a sus capacidades. Cuando haya peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente” (Naciones Unidas, 1992). En términos generales, el principio de precaución da cuenta de que, en caso de amenaza para el medio ambiente y la salud de las personas, no es necesaria una verificación científica para tomar medidas apropiadas que permitan prevenir los daños posteriores.

Aspectos metodológicos

Para lograr el objetivo planteado de la investigación se implementaron algunas estrategias y técnicas pertinentes para la recolección y posterior análisis de la información. En principio, el enfoque metodológico cualitativo preponderaba a lo largo de la pesquisa, sin embargo, se optó por llevar a cabo una metodología mixta, en la cual los enfoques cualitativos y cuantitativos permitieran integrar datos y conocimientos con la finalidad de comprender ampliamente la temática de estudio.

Como estrategia cualitativa, de acuerdo con los aportes de Galeano (2014) y Monje (2011), la investigación documental posibilitó una revisión cuidadosa y sistemática de estudios, informes de investigación, estadísticas, literatura y documentos en bases de datos en línea, con la intención de contextualizar y argumentar sobre el tema en cuestión. A su vez, a partir de la observación participante, se lograron percibir aspectos claves dentro de las transformaciones del municipio de Rionegro para constatar gran parte de la información documental hallada, puesto que la misma, es considerada como una estrategia que, según DeWalt y DeWalt (2022) posibilita una mejor interpretación del contexto y la temática de estudio, y permite responder preguntas de investigación, construir teoría o demostrar hipótesis gracias al apoyo de estrategias complementarias como la entrevista, el análisis documental, las encuestas, entre otras.

En este sentido, la técnica de trabajo de campo realizada posteriormente propició tomas de registros fotográficos de los aspectos clave a considerar; encuentros virtuales por medio de entrevistas semiestructuradas con diferentes actores influyentes en el municipio, como por ejemplo, la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare - CORNARE- y la Corporación Empresarial del Oriente antioqueño -CEO-, corporaciones que juegan un papel fundamental respecto al tema de contaminación atmosférica en el Oriente antioqueño; y particularmente, el rastreo constante de zonas estratégicas del territorio con la intención de analizar visualmente si la información que se ha desarrollado a lo largo del escrito corresponde o no, a la realidad de la zona de estudio.

Asimismo, se realizó un encuentro virtual con un actor del municipio de La Ceja del Tambo, - como referente de análisis para la investigación-, quien hace parte de una iniciativa de red de ciencia ciudadana llamada Waira, por medio de la cual monitorean la calidad del aire del municipio de La Ceja. Lo anterior, con el objetivo de informar a las personas respecto a la

calidad del aire que están respirando y, a su vez, apoyar de manera argumentativa las posibles tomas de decisiones de los entes y actores gubernamentales. Posteriormente, se llevó a cabo otro encuentro virtual con un Médico General y estudiante de maestría en Medicina Tropical y Enfermedades Infecciosas, quien ejerce en la Unidad de Cuidados Intensivos -UCI- del hospital San Juan de Dios en el municipio de Rionegro, el cual aportó información relevante respecto a las consecuencias de la contaminación atmosférica en la salud de los seres humanos, las dificultades y los retos que enfrenta el país y Rionegro en relación con esta temática.

Por su parte, la bola de nieve como técnica sustentada en la idea de amplificar progresivamente la recolección de información a partir de contactos proporcionados por diferentes sujetos (Martín y Salamanca, 2007), permitió conocer y valorar herramientas y temáticas que en un primer momento no se consideraron dentro de la investigación, por tal razón, esta técnica contribuyó a la recopilación de datos cuantitativos de complejo acceso por parte del profesor del pregrado en Desarrollo Territorial Juan Camilo Rengifo, los cuales, al ser procesados y analizados por medio del software ArcGIS (hace parte del campo de los Sistemas de Información Geográfica), proporcionó herramientas como el Inverse Distance Weighting -IDW- para la espacialización efectiva de los datos relacionados con la distribución de contaminantes atmosféricos en el municipio de Rionegro, cuyo objetivo es la elaboración de mapas cartográficos como producto final, gracias al apoyo técnico brindado por la profesora del pregrado en Desarrollo Territorial Kateryn Peña. El IDW (o ponderación de distancia inversa) “utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento” (Esri, 2023), es decir, supone que los puntos que se encuentran más cerca son más parecidos, y, por lo tanto, su información tiene más relevancia e influencia sobre el punto a valorar.

De igual manera, mediante la bola de nieve se obtuvo información alusiva a los líquenes en relación con la contaminación atmosférica por parte de una profesional en Biología, como un aporte que posiblemente pudiese ser útil en la investigación. Por tanto, luego de una amplia búsqueda documental se logró esclarecer que los líquenes son organismos bioindicadores, es decir, se implementan para determinar de manera cualitativa el estado de la atmósfera a partir de una lesión en el líquen (Hawksworth et al. 2005 y Liiteroff et al. 2009). En relación con lo anterior, se realizaron salidas a terreno en algunas zonas del municipio de Rionegro con la intención de visualizar y fotografiar organismos liquénicos para determinar si estos presentan -o no- lesiones físicas atribuibles a la presencia de contaminantes atmosféricos en el territorio.

Por esta razón, se consideró un tema pertinente y esclarecedor para complementar y argumentar el tema en cuestión, el cual, se desarrollará más adelante. Finalmente, toda la información hallada, recolectada y seleccionada, se analizó y plasmó de manera estratégica con el propósito de otorgarle un orden o secuencia, y a su vez, categorizar los aspectos claves, los actores relevantes y los hallazgos encontrados para el estudio de la contaminación atmosférica en el municipio de Rionegro.

1. Industria y transporte: elementos teóricos y primeros hallazgos en el análisis de la contaminación atmosférica en Rionegro

1.1 Industria

A partir de los patrones históricos, las actividades industriales se han concentrado en las grandes ciudades o centros poblados del mundo, teniendo en cuenta entre otros aspectos, la disponibilidad de mano de obra. Esta tendencia, ha traído como consecuencia diversos efectos ambientales en los centros urbanos (Badii et al., 2015), entre los cuales se destacan la emisión de residuos sólidos, líquidos y gaseosos, desencadenando a su vez, contaminación del suelo, hídrica y atmosférica. Para este último tipo de contaminación, Munsift et al. (2021) argumentan que los procesos industriales emiten cantidades considerables de compuestos orgánicos, monóxido de carbono, hidrocarburos y productos químicos al aire. En Colombia, las fuentes fijas (emisión de contaminantes a través de una chimenea) arrojan a la atmósfera entre el 18% y el 22% de contaminantes presentes en la misma, una de las principales causas de la emisión de contaminantes a partir de las actividades industriales, está relacionada con la tecnología implementada en los procesos de producción, dado que, en general, no se evidencian buenas prácticas ambientales, eficiencia energética y reconversiones tecnológicas (CONPES, 2018).

Posiblemente, para el Oriente antioqueño el tema de la contaminación atmosférica no es un suceso indiferente, puesto que, de acuerdo con Bohórquez (comunicación personal, 1 de abril del 2022) Coordinadora Ambiental de la CEO, se percibe un interés manifiesto por parte de algunas empresas ubicadas en la subregión de tratar este asunto. Acciones como mantenimientos preventivos a equipos de medición de fuentes fijas y móviles, socializaciones y capacitaciones sobre la contaminación atmosférica, control y seguimiento a diversas empresas frente a las emisiones que estas ocasionan, son algunas de las prácticas que se llevan a cabo en esta zona con la intención de promover una conciencia colectiva y a su vez, cumplir con la norma que establece los límites permisibles de contaminación atmosférica en el país.

CORNARE y la CEO son algunas de las entidades que han expresado compromiso y apoyo para tratar la temática mencionada en principio, no solo de manera individual sino también en un trabajo colaborativo, es por esto que, el grupo de emisiones atmosféricas de CORNARE ejerce funciones de control y seguimiento a las emisiones de algunas de las empresas pertenecientes a la CEO. Asimismo, la Corporación Autónoma Regional, implementa estaciones de monitoreo en puntos clave de la subregión con la intención de medir los

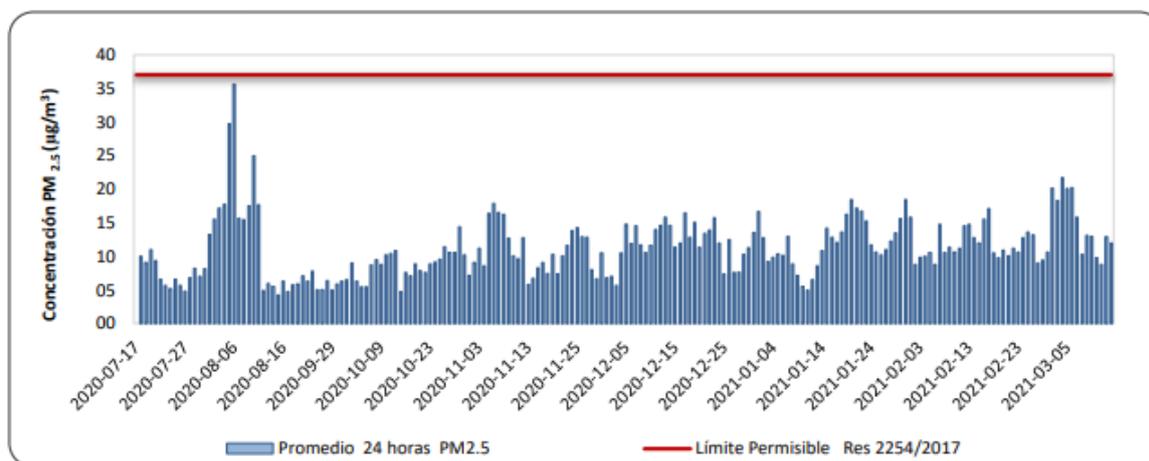
contaminantes atmosféricos presentes. En la actualidad, existe una estación automática en operación ubicada en el barrio San Antonio de Pereira, en el municipio de Rionegro, específicamente en las instalaciones del Mall Comercial San Antonio, puesto que el barrio se encuentra en un punto estratégico del territorio, en donde se presentan altos niveles de flujo vehicular según Zapata (comunicación personal, 18 de mayo de 2022), quien hace parte del grupo de Recurso Aire de CORNARE. De acuerdo con el IDEAM (2016), los equipos de monitoreo automáticos contienen en su interior piezas con la capacidad de analizar una muestra y generar un dato en tiempo real, lo que permite su reporte inmediato al público y a los operadores del Sistema de Vigilancia para la toma de decisiones idóneas respecto al estado de la calidad del aire; además, el tiempo de implementación de un equipo depende del número de habitantes, la problemática asociada al territorio y análisis geográficos, climáticos, económicos, industriales, de salud, entre otros, por lo que se recomienda un tiempo estimado de mínimo 3 meses de monitoreo.

Para obtener y analizar los resultados arrojados por la estación automática ubicada en San Antonio, CORNARE cuenta con convenios con el Laboratorio del Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental LABGIGA de la Universidad de Antioquia, quien acompaña la medición de los contaminantes de acuerdo a la normativa colombiana, puesto que esta permite este tipo de acompañamiento solo a los laboratorios ambientales acreditados, “la acreditación es un proceso que garantiza la competencia técnica y la idoneidad de una institución para desarrollar un grupo de funciones específicas, de acuerdo con unos criterios establecidos. De este modo, se garantiza que la producción de datos e información físico química generada por los sistemas de vigilancia, cumpla con los mejores estándares y criterios de calidad” (IDEAM, 2016, p.42). Según el Informe técnico final de la calidad del aire desarrollado por LABGIGA (2021), el monitoreo se llevó a cabo de manera continua a partir del 17 de julio de 2020 hasta el 14 de marzo del 2021, tomando medición de contaminantes como el material particulado PM_{10} , y $PM_{2.5}$, SO_2 (dióxido de azufre), CO (monóxido de carbono), NO_2 (óxido de nitrógeno) y O_3 (ozono) en tiempo real. Como resultado, los seis contaminantes monitoreados registraron concentraciones por debajo de los límites permisibles establecidos para cada uno en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-.

Sin embargo, como se logra apreciar en la gráfica 1, “el valor máximo de material particulado $PM_{2.5}$ para un promedio de 24 horas se ubicó en $35,6 \mu g/m^3$ –microgramos por metro cúbico de aire- y fue entre todos los contaminantes, la concentración más cercana a alcanzar el límite

máximo permisible (37,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)” (LABGIGA, 2021, p.165) entre los meses de julio y agosto del año 2020 aproximadamente. No obstante, los valores registrados durante ese período de tiempo no excedieron los límites normativos.

Figura 1. Rionegro: variación diaria de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$



Fuente: LABGIGA (2021, p. 97)

Por su parte, la CEO acompaña el acuerdo o plan de crecimiento verde de CORNARE en donde participan 120 empresas, a partir de allí dan cuenta sobre qué permisos ambientales existen, cuáles son las necesidades y dificultades de las empresas y, de esta manera, planean las mejores acciones a implementar y visualizan oportunidades de mejora, es decir, identifican las necesidades de las empresas para generar planes de acción. Como resultados generales, las empresas han cumplido con la tarea, dado que los niveles de contaminación emitidos por las mismas se encuentran por debajo de la norma, no obstante, las características propias de algunas actividades globales asentadas en el territorio, podrían comprometer los resultados óptimos que hasta ahora se evidencian, como lo es el caso de la industria. Esta es considerada como la principal actividad del Oriente antioqueño que en el futuro lograría afectar la calidad del aire de la subregión, específicamente en el municipio de Rionegro, puesto que, desde que se realicen actividades industriales y de servicios, la contaminación existe, argumentan Bohórquez (comunicación personal, 1 de abril del 2022) y Zapata (comunicación personal, 18 de mayo de 2022).

En consecuencia, se realizó un rastreo en campo de algunas empresas asentadas en el municipio de Rionegro, específicamente en el corredor vial de la autopista Medellín - Bogotá, donde no solo se observan actividades industriales, sino también de transporte y movilidad, siendo una

zona de conectividad importante para el país. Lo anterior, se llevó a cabo con la finalidad de obtener capturas fotográficas para evidenciar si las empresas emiten o no partículas sólidas como el hollín. En este sentido, es relevante considerar que el hollín -comprendido como un conjunto de partículas conformadas esencialmente por carbono- es uno de los principales contaminantes atmosféricos que se genera a partir de procesos térmicos y químicos (Salvo, 2014). Según La Organización Internacional del Trabajo (2019) este contaminante es introducido a la atmósfera a partir de 3 grandes categorías: 1) emisiones procedentes de fuentes móviles -industria del transporte-; 2) emisiones procedentes de fuentes fijas -empresas, hogares, granjas y vertederos de basura-; y 3) emisiones procedentes de la generación de energía. Además, ambos autores coinciden en el impacto negativo que el hollín puede producir en la salud, particularmente en el agravamiento de enfermedades respiratorias.

Las imágenes 1, 2, 3, 4, 5 y 6 evidencian la presencia de hollín en la atmósfera, el cual es expulsado por las chimeneas industriales de las fábricas debido a procesos termoquímicos que allí ocurren. Las fotografías se capturaron entre los días lunes y viernes, es decir, en diversas fechas y en diferentes horarios del día con el objetivo de comparar las capturas. En ellas se logra observar que, aunque la emisión de hollín ocurre en el transcurso del día, en algunos horarios este aumenta su visibilidad, debido -probablemente- a la alta producción y operatividad de la empresa.

Figura 2. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Miércoles, 05 de octubre de 2022
2:00 p.m.

Figura 3. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Viernes, 7 de octubre de 2022
10:00 a.m.

Figura 4. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Lunes, 26 de diciembre de 2022
1:00 y 1:30 p.m.

Figura 5. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Miércoles, 28 de diciembre de 2022
9:00 a.m.

Figura 6. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Miércoles, 28 de diciembre de 2022
8:30 a.m.

Figura 7. Fábricas en el sector Belén, Rionegro Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Martes, 03 de enero de 2023
10:00 a.m.

De igual manera, las imágenes 7, 8, 9, 10 y 11 se fotografiaron durante diversos fines de semana, algunas el día sábado y otras el domingo. En las capturas es posible percibir una disminución en la visibilidad de material gaseoso expulsado por las chimeneas, puesto que -posiblemente- la producción en cantidad e intensidad de las empresas no sea la misma que se requiere entre los días lunes y viernes. A su vez, en la imagen 11 no es posible apreciar a simple vista la expulsión de hollín, por lo que se puede considerar que algunas empresas industriales no se encuentran en operatividad los fines de semana y la emisión de sustancias es de baja intensidad, por lo cual no es perceptible o podría ser un día atípico.

Figura 8. Fábricas en la autopista Rionegro - Guarne Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Sábado, 27 de agosto de 2022
11:30 a.m.

Figura 9. Fábricas en la autopista Rionegro – Guarne Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Sábado, 27 de agosto de 2022
1:30 p.m.

Figura 10. Fábricas en la autopista Rionegro - Guarne Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Sábado, 7 de enero de 2023
10:00 a.m.

Figura 11. Fábricas en el sector Belén - Rionegro Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Domingo, 15 de enero de 2023
10:00 a.m.

Figura 12. Fábricas en la autopista Rionegro – Guarne Antioquia, en diferentes momentos



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Domingo, 15 de enero de 2023
11:00 a.m.

Si bien en el municipio de Rionegro se desarrollan algunas prácticas e iniciativas para el control de las emisiones de elementos contaminantes a la atmósfera por parte de las diversas empresas asentadas en la región, es de resaltar que aún se evidencian algunos aspectos que podrían llegar a comprometer de manera indeseada la calidad del aire en el territorio. La implementación de tecnologías basadas en hornos y calderas aplicados en los procesos productivos, así como el uso de combustibles derivados del petróleo, carbón o gas natural, contribuyen ampliamente a la contaminación del aire (Agencia Internacional de Energía, 2017). Por esta razón, el control de estas emisiones depende en gran medida de la eficiencia energética y de los procesos productivos, la transición hacia combustibles limpios, la implementación de nuevas tecnologías y las condiciones del territorio (National Renewable Energy Laboratory, 2006).

1.2 Transporte

La contaminación atmosférica de origen antropogénico aparece a partir del descubrimiento del fuego, esta ha cobrado importancia principalmente desde la revolución industrial y el uso masivo de combustibles fósiles como fuente de energía (Aránguez, et al. 1999). De acuerdo con Gaviria et al. (2011) la contaminación del aire se entiende como la conglomeración de distintas sustancias que se encuentran presentes en la atmósfera, las cuales son emitidas en mayor medida por vehículos automotores e industrias. Siva y Ahire (2018) señalan que la principal fuente de contaminación son los procesos que implican combustión, mediante la oxidación de los elementos que componen los combustibles, las materias primas y el aire.

En este sentido, es importante hacer referencia a los combustibles fósiles, comprendidos como una fuente de energía resultante de la descomposición de materia orgánica de plantas, animales y microorganismos bajo la tierra (Rice, 2018). Según Ordóñez (2009) los combustibles fósiles se clasifican en tres tipos principalmente: carbón, petróleo y gas natural. Expone Reyes (1999) que:

El primero, es el combustible más contaminante de los tres, siendo, además, importante para la industria en términos de cocción de alimentos, insumo para las máquinas de vapor y la participación en la generación de electricidad. El segundo, es el combustible necesario para el funcionamiento de las actividades automovilísticas, la combustión de este material arroja desechos tóxicos, los cuales, afectan al medio ambiente. Finalmente, el tercero es el combustible más limpio, sus reservas superan a las demás

fuentes fósiles. Sin embargo, la implementación del gas natural resulta costosa en la mayoría de los casos para el transporte (pp. 87-90).

Es de interés para la presente investigación el petróleo, teniendo en cuenta que es implementado como un combustible que permite el funcionamiento de los automotores, los cuales posibilitan la operación de la mayoría de los automóviles y otros medios de transporte. Aunque es un material relevante para las dinámicas globales, su implementación genera niveles de contaminación en la atmósfera, como se ha podido observar hasta el momento.

La movilidad es una actividad que implica combustión y se entiende como una práctica social que “involucra el desplazamiento de las personas y sus bienes, conjuga deseos y/o necesidades de viaje (o requerimientos de movilidad) y capacidades objetivas y subjetivas de satisfacerlos, de cuya interacción resultan las condiciones de acceso de grupos sociales a la vida cotidiana” (Gutiérrez, 2012, p. 68). Este desplazamiento se lleva a cabo en la mayoría de casos, mediante vehículos motorizados como automóviles, autobuses, aviones y embarcaciones. De acuerdo con Querol (2018) los vehículos automovilísticos emiten sustancias contaminantes a la atmósfera por medio de tres vías: 1) evaporación de sustancias volátiles de los combustibles como el petróleo, la gasolina y el gas natural, 2) elementos que hacen parte de los gases de escape, y 3) componentes procedentes del desgaste de algunas piezas de los vehículos como el disco del freno, neumáticos y embrague.

“Los vehículos son la fuente principal de generación de contaminantes del aire, en Colombia son responsables de la emisión del 78% de las partículas” (DNP, 2018. p. 33). Entre las principales causas de las emisiones generadas por los vehículos, se destacan: la calidad del combustible utilizado, las características del proceso de combustión y la edad del parque automotor. Respecto a la última, la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores - ANDEMOS- plantea que, en cuanto a la edad promedio de la flota vehicular que circula en el país, pasó de 15,7 años en 2015 a 17,2 años a finales del 2020. Esto es relevante teniendo en cuenta que, una flota vehicular obsoleta genera un impacto directo sobre el medio ambiente y, por tanto, en la salud y calidad de vida de la población.

Por su parte, el sistema de transporte en Rionegro también llegaría a proporcionar dificultades respecto a la calidad del aire que hoy se observa en la región, una de las razones es la limitada prestación del servicio, por ejemplo, existen zonas que no presentan cobertura de rutas públicas y por tanto, las personas deben tomar dos vehículos de transporte para llegar a un solo lugar,

lo cual condiciona que algunos de los habitantes opten por adquirir sus propios vehículos particulares para transportarse. En este sentido, las demandas de movilidad emergen dado que, en un primer momento, surge la necesidad de trasladar insumos requeridos para la producción industrial desde otros lugares. Y en un segundo momento, la industria propicia una mayor concentración de personas y un aumento en la movilidad de las mismas, con el fin de desplazarse desde sus lugares de residencia hacia sus lugares de trabajo, y viceversa (Bedoya y Martínez, 2009).

De igual manera, sectores como la educación, la salud, la recreación, el deporte, y en general, la demanda de diversos bienes y servicios, requieren, en su mayoría, desplazamientos por medio del transporte automotor. La Alcaldía de Rionegro y el Sistema Operativo de Movilidad del Oriente Sostenible -SOMOS- en *El Plan Maestro de Movilidad de Rionegro 2018* exponen la partición modal de los viajes según los medios de transporte disponibles, en el cual, se evidencia una distribución correspondiente a: 27% caminando, 25% transporte público, 23% vehículo privado, 16% motocicleta y 2,4% bicicleta. Es posible concluir que, el uso de transporte automotor representa más del 60% en el municipio, por lo cual, es necesario plantear y promover estrategias de mejoramiento y alternativas de transporte que permitan disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera.

En Rionegro actualmente se está desarrollando un nuevo Sistema Integrado de Transporte denominado Sitirio, planeado y proyectado con la intención de apostarle a la movilidad sostenible del municipio. Tiene como objetivo brindar mejores tiempos de desplazamiento a los usuarios, hacer más eficiente el transporte público de pasajeros y mejorar la movilidad del municipio. Su implementación se está realizando de una manera gradual y en principio, pretende abarcar las rutas tradicionales de las empresas de transporte existentes, y posteriormente, busca ampliar la cobertura de transporte en el territorio (Somos, 2023).

Cabe resaltar que, gran parte de los vehículos de transporte públicos y privados de Rionegro no han implementado una transición hacia combustibles limpios, los cuales acatan las definiciones y normas de calidad decretadas por los ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Minas y Energía, puesto que dichos combustibles se obtienen a partir de la biomasa de origen vegetal o animal, lo que permite ser un sustituto del ACPM implementado en los motores diésel (Comisión de Regulación, 2016). El transporte urbano sostenible enfoca a las diferentes entidades gubernamentales de cada ciudad para instaurar la movilidad como componente prioritario, con el propósito de implementar políticas que disminuyan la emisión

de contaminantes y así, garantizar una mejor calidad de vida urbana y un espacio público confortable y seguro (Pardo, 2009), pero, teniendo en cuenta la satisfacción de sus habitantes que varía de acuerdo con el modelo de ciudad y esquema de movilidad por el que se apueste.

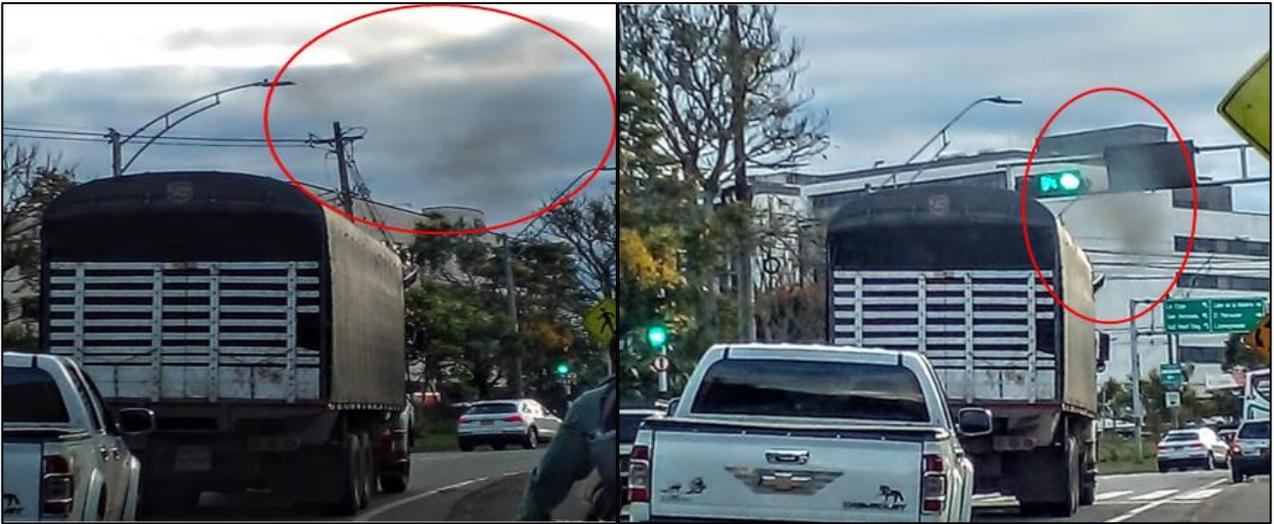
En este sentido, se registraron capturas fotográficas de algunos vehículos de transporte públicos y privados, los cuales se encontraban transitando por distintas zonas del municipio de Rionegro -centrales y periféricas principalmente- en diversos días de la semana, fines de semana y en diferentes horarios. Lo anterior, con la intención de evidenciar la emisión de hollín producto del diésel. En las imágenes 12, 13, 14 y 15 se logra apreciar la emisión de hollín por parte de algunos vehículos de transporte, como lo es el servicio público y los vehículos particulares en zonas centrales y periféricas del municipio. Así como se presenta en las fotografías, es común encontrar a lo largo del día pequeñas “nubes” de color grisáceas expandiéndose por el ambiente debido al alto flujo vehicular que transita en Rionegro, puesto que es un municipio núcleo para el Oriente antioqueño. De igual manera, el incremento en actividades económicas como la construcción inmobiliaria, el desarrollo de megaproyectos viales, la relocalización de empresas y la existencia de equipamientos metropolitanos como, por ejemplo, el aeropuerto, la zona franca, el túnel de Oriente y la autopista Medellín - Bogotá (Muñoz y Botero, 2020), son características del municipio influyentes en el alto tránsito vehicular.

Figura 13. Sector Laureles, Rionegro Antioquia



Fotografía:

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Miércoles, 24 de agosto de 2022
5:30 p.m.

Figura 14. Sector Clínica Somer, Rionegro Antioquia**Fotografía:**

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Lunes, 21 de noviembre de 2022
5:30 p.m.

Figura 15. Sector Terminal de Transporte, Rionegro Antioquia**Fotografía:**

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Sábado, 10 de diciembre de 2022
7:00 a.m.

Figura 16. Sector Belén, Rionegro Antioquia**Fotografía:**

Daniela Patiño y Ana María Ruíz. Martes, 17 de enero de 2023.

8:00 a.m.

Es pertinente recordar a partir de los antecedentes expuestos, que el hollín emitido por las actividades industriales y de transporte, producen -además de otros elementos- material particulado, siendo estas partículas responsables de diferentes impactos en la vegetación, el ser humano y el medio ambiente. Teniendo en consideración la literatura científica y los resultados obtenidos de investigaciones realizadas por diferentes entidades ambientales, Zapata (comunicación personal, 18 de mayo de 2022) menciona que los automotores, es decir, el transporte, son los mayores aportantes de $PM_{2.5}$ en la atmósfera, especialmente los vehículos que implementan el diésel como insumo para su operatividad, por lo cual, se considera que el $PM_{2.5}$ es la concentración más susceptible a incumplir los límites normativos -dependiendo de los contextos territoriales-.

2. Afectaciones a la salud y el medio ambiente como consecuencia de la contaminación atmosférica

2.1 Salud

La contaminación atmosférica es uno de los fenómenos ambientales de mayor preocupación en el siglo XXI, se puede entender como “la presencia que existe en el aire de pequeñas partículas o productos secundarios gaseosos que pueden implicar riesgo, daño o molestia para las personas, plantas y animales que se encuentran expuestas a dicho ambiente” (IDEAM, 2021). La calidad del aire se ha deteriorado en gran medida como consecuencia de procesos de urbanización y desarrollo económico, basados principalmente en la quema de combustibles fósiles y la exposición de las personas al mismo, lo que genera múltiples consecuencias en la salud. En 2015 la Asamblea Mundial de la Salud reconoció la contaminación del aire como un factor de riesgo de enfermedades no transmisibles -ENT- como el cáncer y el asma; y la Organización Mundial de la Salud en el 2021 afirmó que la contaminación del aire ha aumentado los niveles de morbilidad y mortalidad, especialmente por enfermedades cardiovasculares y respiratorias no transmisibles, las cuales, son identificadas como las principales causas de mortalidad a nivel mundial.

Las estimaciones de la OMS muestran que alrededor de 7 millones de muertes por enfermedades no transmisibles son atribuibles a los efectos de la contaminación del aire ambiental, particularmente en países de ingresos medianos y bajos. “Hasta la fecha, pruebas sólidas muestran relaciones causales entre la exposición a la contaminación del aire por PM_{2.5} y la mortalidad por todas las causas; así como las infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, cardiopatía isquémica, cáncer de pulmón y accidente cerebrovascular” (OMS, 2021. p.35). Asimismo, un tercio de las muertes por accidentes cerebrovasculares, cáncer de pulmón y cardiopatías se deben a la contaminación del aire.

En concordancia, Rosales-Castillo et al. (2001) afirman que la principal vía de entrada de los contaminantes al organismo es inhalatoria, por tanto, se espera que las afectaciones se presenten en las vías respiratorias, así, las enfermedades más comúnmente reportadas por exposición a la contaminación del aire son bronquitis, enfermedad pulmonar obstructiva crónica y neumonía; y en el sistema cardiovascular, son arritmias e infartos. Además, Munsif et al. (2021) evidencian algunos problemas agudos a causa de la contaminación atmosférica

como molestias oculares, estornudos, tos, mareos y dolor de cabeza. Muñoz y Salcedo (2021) argumentan que la edad es una característica importante, teniendo en cuenta que se relaciona con la gravedad de las consecuencias por la exposición a la contaminación. Para estos autores, una de las poblaciones más susceptibles, aparte de los adultos mayores y los asmáticos, son los niños en etapa prenatal y posnatal puesto que se encuentran en el desarrollo de su organismo.

Según Bustamante (encuentro personal, 19 de enero de 2023), médico general de la Unidad de Cuidados Intensivos del Hospital San Juan de Dios, sede Jorge Humberto González situado en el municipio de Rionegro, existen 4 determinantes en la salud: 1) estilos de vida, 2) factores genéticos y biológicos, 3) atención sanitaria, es decir, la atención que recibe la población por parte del sistema de salud, y 4) los factores medio ambientales. Este último se encuentra relacionado con la contaminación atmosférica, la cual, efectivamente desencadena enfermedades pulmonares, digestivas, cardíacas, entre otras, en los seres humanos. Dichas molestias, se desarrollan en las personas de acuerdo al tiempo en el que se encuentren expuestas a contaminantes, por ejemplo, las enfermedades crónicas se pueden presentar a los 5 o 10 años de exposición, mientras que las enfermedades agudas aparecen entre 1 o 2 semanas de exposición a los contaminantes atmosféricos. Así mismo, Bustamante afirma que un 80% de los pacientes jóvenes que consultan por neumonía, fibrosis pulmonar, entre otras enfermedades, se podrían relacionar con la contaminación atmosférica, aunque no es la única razón, es un factor que se impone en la actualidad debido a los procesos de industrialización y el aumento del flujo vehicular, puesto que son enfermedades que hasta hace 20 años -aproximadamente- no se evidenciaban en población menor a 50 años de edad.

A partir de las directrices de calidad del aire publicadas por la OMS en 2005, se ha planteado que la contaminación del aire ha sido reconocida como la mayor amenaza ambiental para la salud humana debido a su notable contribución a la carga de enfermedades, en el cual, el material particulado $PM_{2,5}$ y el PM_{10} han sido factores de consideración, teniendo en cuenta que según Chen y Kleeman (2009), la exposición a estas partículas en la atmósfera genera diversos impactos en la vegetación, en el hombre y en el medio ambiente.

Desde la última actualización de las directrices de la calidad del aire planteadas por la Organización Mundial de la Salud en el año 2005, se realizaron una serie de pruebas y revisiones sistemáticas que evidenciaron la necesidad de ajustar a la baja, en su mayoría, los niveles de referencia de la calidad del aire, como consecuencia del daño que este genera en la salud humana. En este sentido, en el año 2021 se publicaron las nuevas guías mundiales, las

cuales, advierten que la superación de estos nuevos niveles se asocia a riesgos significativos en la salud y, por el contrario, su cumplimiento puede prevenir enfermedades y muertes causales de la contaminación atmosférica. Es importante mencionar que uno de los principales objetivos de las pautas, es establecer límites para proteger la salud pública a escala mundial, y su definición se planteó teniendo en cuenta procesos de revisión y evaluación de evidencias científicas sobre los efectos de los contaminantes del aire en la salud.

Las siguientes tablas muestran los niveles de referencia de la calidad del aire, en adelante, los niveles Air Quality Guidelines -AQG- o Pautas de la Calidad del Aire planteados por la OMS en 2005 y los actualizados en 2021 que, aunque no son legalmente vinculantes, ofrecen orientaciones a escala mundial sobre los umbrales y límites de los contaminantes atmosféricos, con el fin de prevenir riesgos en la salud. Es de anotar que los objetivos provisionales de la tabla 1 se proponen como pasos incrementales en una reducción progresiva de la contaminación del aire y están destinados a usarse en áreas donde la contaminación es alta. Respecto a las tablas 1 y 2 se observa una disminución de los niveles para el PM₁₀ y el PM_{2.5} en tiempos promedio de un año y 24 horas. En su mayoría, la disminución corresponde a un total de 5µg/m³, excepto el PM_{2.5} en un tiempo promedio de 24 horas, al cual le asignan una baja de 10 µg/m³, siendo 25 en el 2005 y 15 en el 2021.

Tabla 1. Air Quality Guidelines (AQG) 2005 recomendados

Contaminante	Tiempo promedio	Objetivo provisional			Nivel AQG
		1	2	3	
PM _{2.5} µg/m ³	Anual	35	25	15	10
	24 horas	75	50	37.5	25
PM ₁₀ µg/m ³	Anual	70	50	30	20
	24 horas	150	100	75	50

Fuente: OMS, 2005

Tabla 2. Air Quality Guidelines (AQG) 2021 recomendados y objetivos intermedios

Contaminante	Tiempo promedio	Objetivo provisional				Nivel AQG
		1	2	3	4	
PM2.5 µg/m ³	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas	75	50	37.5	25	15
PM10 µg/m ³	Anual	70	50	30	20	15
	24 horas	150	100	75	50	45

Fuente: OMS, 2021

Es relevante mencionar que estos cambios reflejan la importancia de prevenir y controlar posibles aumentos en la contaminación atmosférica, dados los efectos adversos que presenta en la salud. Asimismo, estas directrices brindan a los países un insumo basado en evidencia científica para tomar decisiones frente a la legislación y la política de cada uno, con el propósito de proteger el bienestar de la población y garantizar una mejor calidad de vida. En concordancia, Castillo (2010) plantea que “existe una relación documentada por la literatura científica entre la exposición al material particulado y la aparición de efectos adversos sobre la salud de la población” (pp.1), entre los cuales, se incluyen el incremento en las tasas de incidencia de Enfermedad Respiratoria Aguda (ERA); mayor uso de los servicios de asistencia hospitalaria, como consultas, sala de urgencias y hospitalización; y ocurrencia de muertes prematuras en grupos poblacionales sensibles.

Respecto a la calidad del aire en el país, en noviembre de 2017 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible publicó la Resolución 2254 de 2017, que incorpora un ajuste progresivo en los niveles máximos permisibles de contaminantes criterios en el país; esta norma incluye aspectos como la gestión preventiva, mediciones en tiempo real y niveles para declarar estados de prevención, alerta y emergencia. “De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, se considera que el aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar humano. Sin embargo, su contaminación sigue representando una amenaza importante para la salud en todo el mundo” (IDEAM, 2017). En este contexto y con el objetivo de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana que pueda ser causado por la exposición a los contaminantes en la atmósfera, el MADS establece lo siguiente para el año 2018 y 2030 respectivamente

Tabla 3. Niveles máximos permisibles en Colombia a partir del 2018

Contaminante	Tiempo de exposición	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM10	Anual	50
	24 horas	75
PM2.5	Anual	25
	24 horas	37

Fuente: IDEAM, 2017

Tabla 4. Niveles máximos permisibles en Colombia a partir del 2030

Contaminante	Tiempo de exposición	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM10	Anual	30
PM2.5	Anual	15

Fuente: IDEAM, 2017

Así mismo, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estableció los rangos de concentración y el tiempo de exposición bajo los cuales se debe declarar por parte de las autoridades ambientales los niveles de prevención, alerta o emergencia:

Tabla 5. Niveles según los rangos de exposición de 24 horas

Contaminante	Tiempo de exposición	Prevención	Alerta	Emergencia
PM10	24 horas	155 - 254	255 - 354	≥ 355
PM2.5	24 horas	38 - 55	56 - 150	≥ 151

Fuente: IDEAM, 2017

Teniendo en cuenta el contexto anterior, se plantean dos mapas cartográficos que espacializan los datos relacionados con emisiones de Gases de Efecto Invernadero -GEI-, en los cuales se mide -entre otros contaminantes- el PM₁₀ como resultado de la combustión de fuentes móviles en la zona urbana y algunas zonas rurales del municipio de Rionegro, en un periodo de tiempo de 9 meses entre 2018 y 2019. Este estudio fue realizado por CORNARE y la Universidad Católica de Oriente -UCO- la información se obtuvo como resultado de la medición de estos contaminantes por parte de 11 estaciones de monitoreo y 106 fuentes fijas-móviles implementadas en el municipio, además, los puntos fueron seleccionados teniendo en cuenta las zonas que presentaran mayor densidad de edificaciones y personas. Es importante

mencionar que los principales GEI son: el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃).

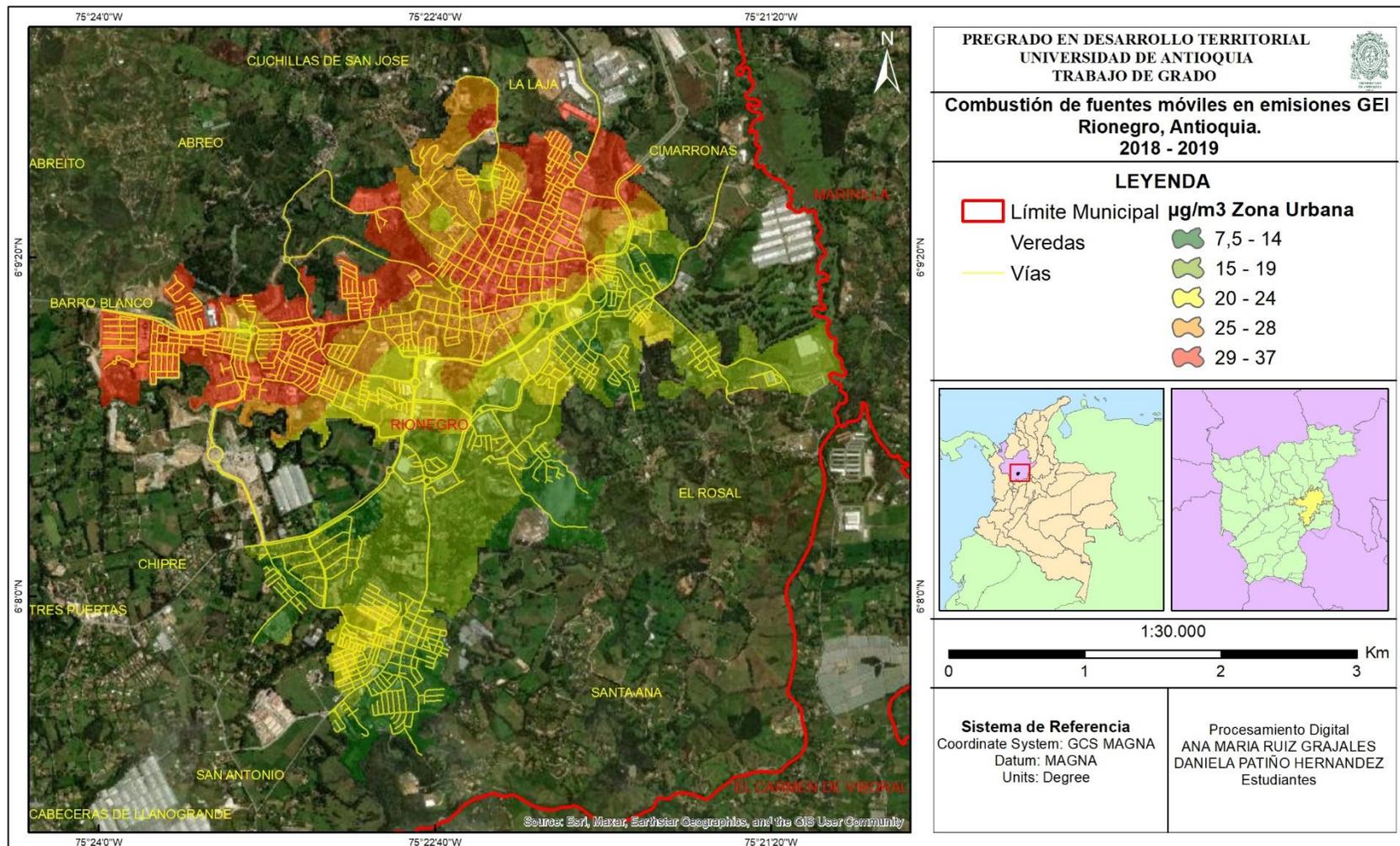
El mapa 1 y 2 son el resultado del procesamiento de los datos en ArcMap por medio de la herramienta IDW, en el cual, es posible observar la espacialización de la información en la zona urbana del municipio con su respectiva red vial. De acuerdo a los colores de la leyenda en el mapa 1, es posible clasificar los rangos de emisión GEI de la siguiente manera: El primero es de una tonalidad verde, el cual representa las áreas de Rionegro que se encuentran entre un 7,5 y 19 Ug/M³ de contaminación; el segundo se caracteriza por tonos amarillo - naranja, y se encuentra entre un 20 y 28 Ug/M³; el tercero, es de tonalidad roja y representa las emisiones entre 29 y 37 Ug/M³. Por su parte, el mapa 2 presenta en colores verdes un rango entre 7,5 y 20 Ug/M³ de emisión de contaminantes; en tonos amarillo - naranja un rango entre 21 y 31 Ug/M³ y finalmente, un rojo que representa los niveles entre 32 y 37 Ug/M³. En este sentido, se lograron identificar las zonas del municipio que presentan menores, intermedios y mayores niveles de emisión de contaminantes respectivamente.

En términos generales, es posible afirmar a partir del mapa 1 que la zona noroccidental presenta mayores emisiones de contaminantes a la atmósfera y es una de las áreas en las que se encuentra gran parte de la red vial del municipio. Además, en este rango -rojo- se encuentran sectores como La Galería, La Casa de Justicia, El Palacio de Justicia, El Parque Empresarial y El Tranvía, los cuales, según el POT (2018) se clasifican dentro de los usos del suelo urbano como usos financieros, de comercio y servicios especializados, consolidando usos mercantiles de gran escala. A esta categoría están asociadas aquellas actividades que generan mayores impactos a nivel urbanístico y ambiental.

El mapa 2 representa la zona urbana y algunas áreas de la zona rural del municipio, puesto que las estaciones de medición de los contaminantes implementadas no lograron abarcar el espacio rural en su totalidad. Es posible observar que, en el noroccidente del mapa la tonalidad roja prepondera -en este caso- en las veredas Abreito, Chachafruto, Barro Blanco y Abreo, así como el sector donde se encuentra el aeropuerto internacional José María Córdoba. Este último, en general implica mayores demandas de flujo vehicular público y privado, tanto de pasajeros como de materiales de carga, por lo cual, podría suponer una emisión considerable de contaminantes a la atmósfera.

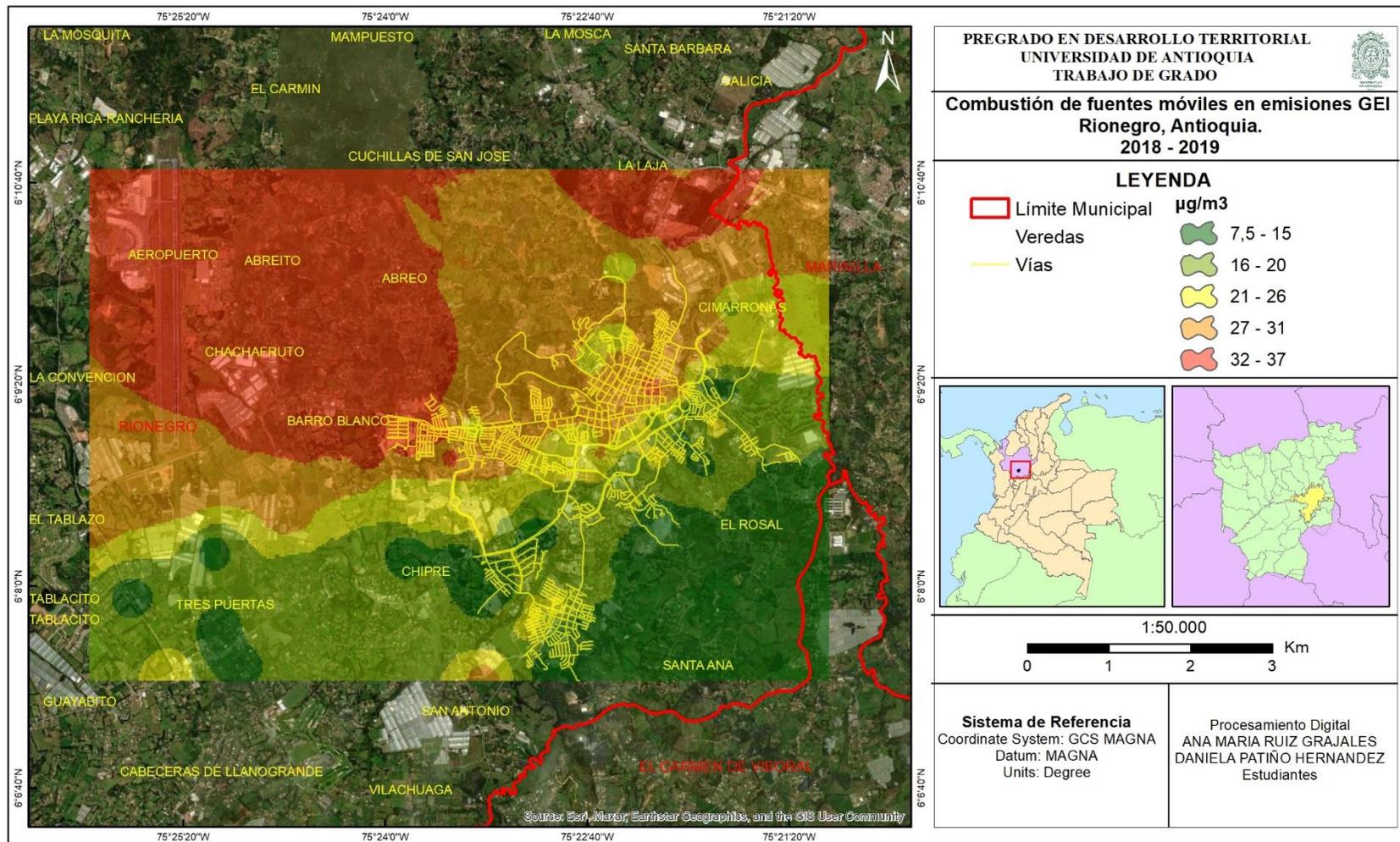
Respecto a los mapas 1 y 2, es posible percibir que el color amarillo se caracteriza por segmentar en dos la zona de estudio del municipio, en el cual, el norte se encuentra en rojo y naranja principalmente -conecta con la vía de comunicación hacia Medellín-, y el sur en las tonalidades verdes -conecta con municipios de menor afluencia-. El amarillo simboliza una franja media de contaminación del aire y podría identificarse como el “área de expansión de contaminación”, es decir, el área con mayor probabilidad a incrementar sus niveles de emisión. Por su parte, el verde y verde oscuro indican baja concentración de contaminantes, siendo esta última intensidad de color la que se encuentra en menor proporción, sin embargo, el color amarillo presenta una tendencia de ocupación en el espacio donde se encuentra localizado el verde.

Figura 17. Combustión de fuentes móviles en emisiones GEI zona urbana 2018-2019
Rionegro, Antioquia



Fuente: Elaboración propia en ArcMap

Figura 18. Combustión de fuentes móviles en emisiones GEI 2018-2019.
Rionegro, Antioquia



Fuente: Elaboración propia en ArcMap

2.2 Líquenes como bioindicadores de contaminación

Los seres humanos no son los únicos afectados por la contaminación atmosférica, existen otros seres vivos que de igual manera presentan alteraciones debido a la exposición a contaminantes, por ejemplo, los líquenes. De acuerdo con Méndez y Fournier (1980) los líquenes están formados por una asociación de hongos y algas verdes, quienes son considerados como los primeros invasores de áreas rocosas, troncos de árboles, paredes o cualquier tipo de superficie árida, debido a su incapacidad para desarrollarse en el suelo, por lo que su crecimiento depende de los nutrientes que el aire transporta. La niebla y el rocío son unas de las mayores fuentes de hidratación para estos organismos, frecuentemente estas presentan más acumulaciones de contaminantes que el agua producida por la precipitación, por lo que los nutrientes de los líquenes también tendrán conglomeración de contaminantes (Mares, 2017). Es por esto que la presencia o ausencia de líquenes en una zona, da cuenta del estado de contaminación en el que se encuentra la atmósfera (Grüninger y Velarde, 1985; Monge, 1990), siendo una característica relevante de los organismos bioindicadores.

Para Hawksworth et al. (2005) un espécimen es comprendido como bioindicador cuando puede ser implementado para determinar de manera cualitativa el estado de la atmósfera. En este caso, se percibe a partir de una lesión en el líquen dada su inhabilidad de adaptación a los cambios ambientales (Lijteroff et al. 2009), es decir, a la exposición de contaminantes atmosféricos. Según Mares (2017) la primera evidencia de sensibilidad o estrés ambiental de los líquenes como bioindicadores de la calidad atmosférica se presentó a finales del siglo XIX en el Jardín de Luxemburgo -París-, asimismo, en la Península Ibérica se implementaron estos organismos como bioindicadores por primera vez en 1997, específicamente en la ciudad de Madrid, partiendo de una investigación cuantitativa de líquenes. Sin embargo, la contribución más relevante en este tema fue el estudio de Cislighi y Nimis en 1997, quienes hallaron una relación entre la mortalidad por cáncer de pulmón en personas nativas de una región de Italia con la contaminación atmosférica, por medio de los líquenes presentes en la zona.

Las alteraciones cualitativas que se pueden detectar en los líquenes por la absorción de sustancias contaminantes en la atmósfera, se basan principalmente en la presencia o ausencia de especies líquénicas como ya se había mencionado en un comienzo. No obstante, estos organismos poseen una sensibilidad según el elemento contaminante, de acuerdo con Carballal, et al. (2006) y Seinfeld (1978) el dióxido de azufre es el compuesto gaseoso más estudiado, el

cual produce en los líquenes variaciones en la coloración y en la forma, aparición de zonas necrosadas, degradación, destrucción de la clorofila, interrupción de la fotosíntesis, entre otros, reduciendo no solo la velocidad de crecimiento del liquen sino también ocasionando su muerte por completo.

A continuación, se presentan de manera ilustrativa algunos síntomas de contaminación atmosférica en especies liquénicas, a partir de una investigación y registros fotográficos realizados por Gómez y Gómez (2007) en Morelia, México. Partiendo del análisis, concluyeron que en la mayoría de zonas en las que rastrearon estos líquenes con lesiones, se caracterizaban por poseer un elevado flujo vehicular e instalación industrial, hallando así “una relación inversamente proporcional entre las frecuencias y coberturas registradas con el tráfico vehicular y la presencia de industrias” (p. 8).

Figura 19. Clorosis**Fotografía:** M. Gómez Peralta**Figura 20. Deseccación****Fotografía:** M. E. Prado Banda**Figura 21. Necrosis****Fotografía:** M. Gómez Peralta**Figura 22. Cambios de coloración****Fotografía:** M. Gómez Peralta**Figura 23. Reducción de talla****Fotografía:** M. Gómez Peralta

Teniendo en cuenta lo anterior, se registraron algunas evidencias fotográficas de líquenes en diversas zonas del municipio de Rionegro, con la finalidad de observar si las especies liquénicas ubicadas en el territorio presentan o no, síntomas o estrés ambiental, y de esta manera, analizar posibles causas y consecuencias. Las imágenes presentadas a continuación se clasificaron de acuerdo a los ejemplos anteriores. Las fotografías 21, 22, 23, 24, 25, 26 y 27 se capturaron en zonas del municipio de Rionegro caracterizadas por presentar dinámicas de alto tránsito vehicular y existencia de industria, como por ejemplo algunos tramos de la autopista Medellín - Bogotá -vía Belén, sector la Herradura-; vía Rionegro - La Ceja, que además de conectar a estos dos municipios principalmente, permite la conectividad con otros territorios del Oriente antioqueño; y la cabecera urbana de Rionegro -Sector Hospital San Juan de Dios sede Jorge Humberto González-.

En estas imágenes se logra apreciar algunos síntomas que, de acuerdo con Gómez y Gómez (2007) son alusivos a la absorción de contaminantes presentes en la atmósfera por parte de los líquenes. Según Sanz y Montañés (1997) la clorosis corresponde a un cambio físico en el líquen o las plantas, reflejado principalmente en una decoloración en las hojas del organismo debido a la poca presencia de hierro por los altos niveles de CO₂ en la atmósfera del suelo. Las fotografías 21 y 22 dan cuenta de ello, en ambas imágenes se observa una decoloración grisácea del líquen, con aparición de tonalidades amarillas en algunas secciones. Las capturas 23 y 24 corresponden a la desecación del líquen, en la primera imagen se observa este síntoma en gran parte del organismo, mientras que, en la segunda ha comenzado solo en una zona del mismo, de acuerdo con Benavides (2002) esta situación se presenta como consecuencia de la pérdida de agua por la absorción de CO₂, lo cual frena el crecimiento del líquen.

Por su parte, la necrosis puede ser evidenciada a partir de una coloración marrón o manchas de color negro en el líquen, generando un aspecto a “quemado”, que posteriormente, puede ocasionar su muerte (Alfaro, et al. 2006). En los registros fotográficos 25 y 26 los líquenes presentan necrosis, aunque algunas zonas se perciben más negras que otras, este síntoma se está extendiendo por el líquen e incluso, algunos comienzan a tornarse de dicho color por completo. Respecto a la decoloración de los líquenes reflejada en la imagen 27, Lillo (2018) argumenta que esta situación se debe principalmente a la presencia de SO₂ (dióxido de azufre) y O₃ (ozono) en la atmósfera; el primero penetra directamente el talo liquénico, ocasionando varios daños o síntomas ya mencionados y; el segundo aumenta la susceptibilidad del líquen respecto a factores como la sequía, plagas, altas temperaturas, entre otras.

Figura 24. Clorosis
Vía Rionegro – La Ceja, Antioquia



Figura 25. Clorosis
Vía Rionegro – La Ceja, Antioquia



Figura 26. Desección
Sector Laureles, Rionegro Antioquia



Figura 27. Desección
Sector Laureles, Rionegro Antioquia



Figura 28. Necrosis
Sector La Herradura, Rionegro Antioquia



Figura 29. Necrosis
Sector La Herradura, Rionegro Antioquia





Fotografías: Daniela Patiño y Ana María Ruíz, 1 de diciembre de 2022

De esta manera, es factible observar y constatar a partir de la bioindicación de las especies líquénicas ubicadas y rastreadas en distintas zonas del municipio de Rionegro, la posible presencia de contaminantes atmosféricos en este territorio, dadas las diversas alteraciones o lesiones cualitativas analizadas en los organismos registrados de manera fotográfica. Asimismo, es relevante mencionar en relación con Pardo (2017) que, esta situación tiende a presentarse de manera aguda en aquellas áreas que presentan niveles elevados de tránsito vehicular, centros urbanos y en zonas de prominente industrialización, siendo estas características propias del municipio de Rionegro y sus zonas de influencia.

3. Conclusiones

En el municipio de Rionegro se implementan diversas iniciativas que pretenden frenar o mitigar la proliferación de emisiones de contaminantes a la atmósfera por parte de las empresas industriales asentadas en este territorio, sin embargo, los cambios que ha enfrentado el municipio con el paso del tiempo requieren de atención al detalle, puesto que fue posible demostrar y argumentar la existencia de focos de contaminación en el aire, los cuales están siendo progresivamente altos. En este sentido, surge la necesidad de realizar transiciones respecto a la forma en la que se llevan a cabo los procesos productivos, optando principalmente por la implementación de nuevas tecnologías y combustibles más amigables con el medio ambiente. Así mismo, es apropiado apoyar e incentivar proyectos como Bicirio en el municipio, con el objetivo de incentivar el uso de otros medios de transporte como la bicicleta.

Aunque la contaminación atmosférica ha existido a causa de fenómenos naturales, esta ha incrementado sus niveles como consecuencia de actividades antropogénicas, entre ellas el transporte y/o movilidad. Esta práctica social es cada vez más demandada por parte de la población, teniendo en cuenta sus necesidades de desplazamiento, el cual se lleva a cabo -en su mayoría- mediante vehículos motorizados que emiten sustancias contaminantes a la atmósfera, como lo es el material particulado. La calidad del combustible utilizado, las características del proceso de combustión y la edad del parque automotor, son de las principales causas de las emisiones causadas por los vehículos, las cuales, comparte el municipio de Rionegro. Más del 60% de desplazamientos en el territorio se realiza por medio del transporte automotor, y en este sentido, iniciativas como Sitirio pretende apostarle a una movilidad que sea sostenible en el municipio.

El transporte y la industria son actividades que en medio de su función arrojan material particulado a la atmósfera, y la exposición de las personas al mismo implica múltiples consecuencias en la salud, según el tiempo y el grado de contaminación al que se exponga-. La OMS en el 2021 planteó que la contaminación del aire ha aumentado los niveles de morbilidad y mortalidad especialmente por enfermedades cardiovasculares y respiratorias no transmisibles, y el IDEAM afirma que el PM_{2.5} es el que presenta mayor afectación al bienestar humano, en consecuencia, a nivel mundial -OMS- y nacional -MADS- se han establecido pautas y límites permisibles de gases contaminantes en la atmósfera, con el objetivo de proteger la salud pública. En este sentido, surge la necesidad de medir, vigilar y analizar las emisiones de contaminantes en el municipio de Rionegro con especial interés, puesto que las

aproximaciones visualizadas en los mapas cartográficos dan cuenta de algunas zonas urbanas y rurales en las cuales los niveles de concentración de los contaminantes criterio evaluados se encuentran en un nivel alto, por lo que representan un riesgo de superar los límites permisibles y afectar la salud de las personas.

De igual manera, fue posible constatar que la contaminación del aire también ocasiona afectaciones en las plantas, en este caso, se observó dicha situación en las especies liquénicas ubicadas en diferentes zonas del municipio de Rionegro gracias a las lesiones identificadas en las mismas, lo cual, permite comprender la existencia de sustancias contaminantes en la atmósfera de este territorio. Es importante resaltar la correlación de la aparición de enfermedades en los líquenes con las zonas en las que se encuentran elevados niveles de tránsito vehicular, asentamiento industrial y los centros urbanos principalmente, siendo estas circunstancias características propias de los lugares en los que se rastrearon los líquenes fotografiados.

Por esta razón, las entrevistas realizadas permitieron esclarecer la información abordada, logrando constatar que la industria y la movilidad son dos actividades que además de representar relevancia en el municipio de Rionegro, también podrían comprometer la calidad del aire que hasta el momento se observa en la región debido a la forma en la que estas se desarrollan. Aunque los límites permisibles de contaminación no han sido superados, fue posible argumentar que el territorio cuenta con la presencia de diferentes contaminantes en la atmósfera, por lo que, de acuerdo con el médico entrevistado, la salud de los rionegreros podría estar siendo afectada en la actualidad, lo cual sugiere en monitoreo permanente del tema con fines de precaución.

4. Recomendaciones

En primer lugar, se sugiere a las entidades gubernamentales apostar por el libre y oportuno acceso a la información caracterizada como pública, puesto que además de ser necesaria para complementar y argumentar los análisis e investigaciones académicas que se realicen, es igualmente relevante que la ciudadanía se encuentre verídicamente informada de todo aquello que sucede a su alrededor para la toma de decisiones de manera consciente. En este caso, se realizaron esfuerzos por adquirir información relacionada con el parque automotor del municipio de Rionegro, puesto que esclarecería aspectos relevantes en relación con la movilidad y características de los vehículos que transitan en el territorio, sin embargo, a pesar de insistir no se tuvo respuesta por parte de la Alcaldía Municipal, la Secretaría de Desarrollo Territorial y la Subsecretaría de Movilidad

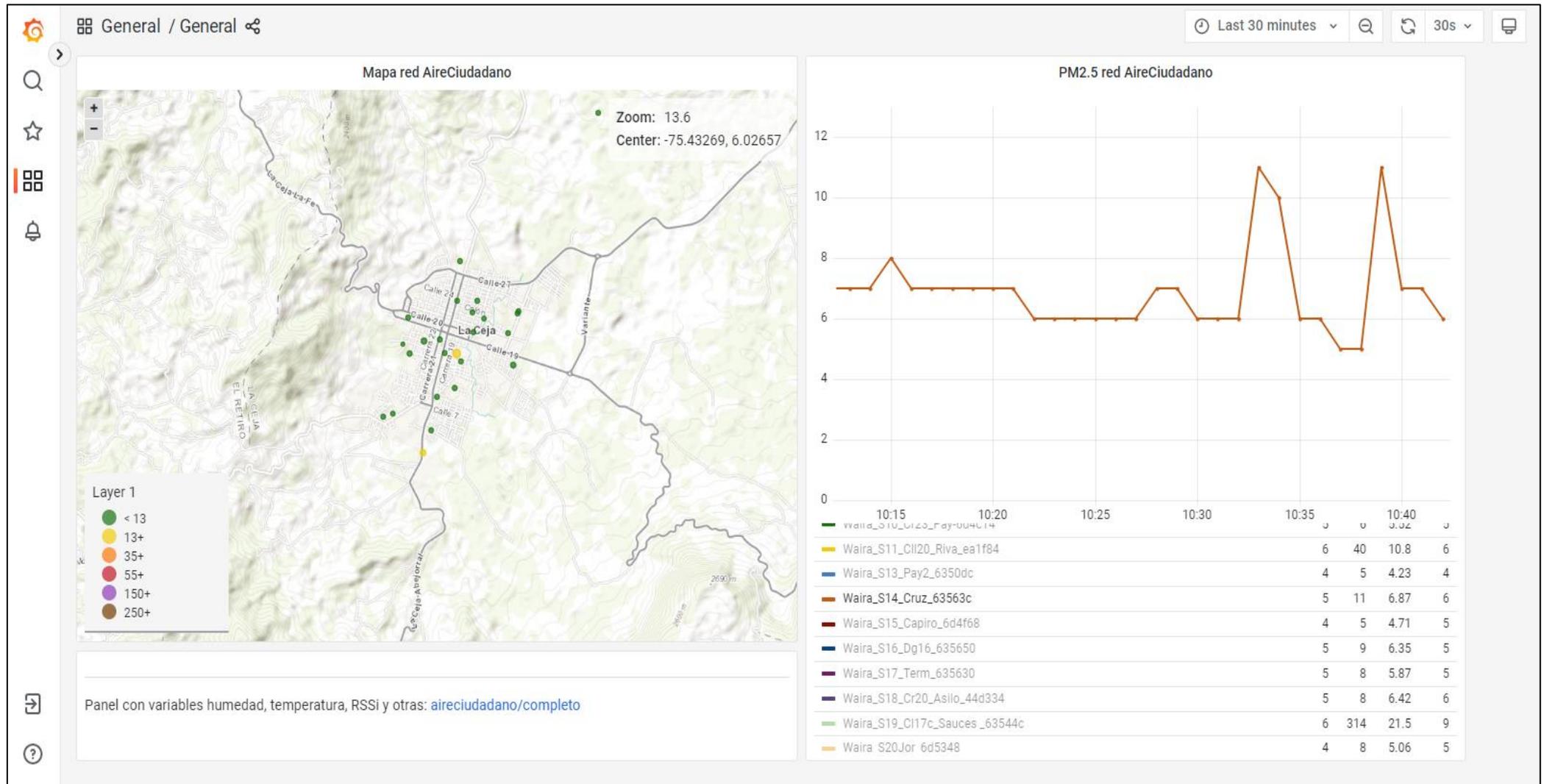
De igual manera, desde los entes tomadores de decisiones se podrían adoptar estrategias que tengan como finalidad impulsar nuevas formas de adaptación a los cambios globales para el desarrollo de las actividades diarias, como por ejemplo pensarse en la transición hacia combustibles limpios (lo cual no fue posible evidenciar en Rionegro) desde el ámbito local y así controlar parte de las emisiones de contaminantes en la atmosfera, implementar algunas tecnologías actuales y verdes que ayuden a mitigar los impactos ambientales, estrategias para alternar el uso de vehículos de transporte o mejorar aún más aquellas con las que se cuente en la actualidad con la intención de disminuir el flujo vehicular y propiciar hábitos saludables a las personas como hacer uso de la bicicleta o poder caminar con tranquilidad

Asimismo, se recomienda al municipio de Rionegro y a los actores clave que se encuentran en el territorio o influyen en él, prestar suma atención a las señales de alerta que hasta el momento arrojan los resultados que dan cuenta de la presencia de contaminantes en la atmosfera, puesto que, aunque visualmente no se perciba un aire contaminado como en otras ciudades del país, no significa que no haya emisión de contaminantes y más aún, que no estén a punto de superar los límites permisibles establecidos por la normativa. En este sentido, argumenta Bustamante (encuentro personal, 19 de enero de 2023) que en el país ni en el municipio se cuentan con registros de enfermedades de pacientes relacionadas con la exposición a contaminantes en la atmosfera para la realización de seguimientos, lo cual no debería estar sucediendo ya que considera que esta situación si se está presentando a nivel nacional y específicamente en Rionegro, por lo que sugiere implementar registros, hacer seguimientos y tomar decisiones adecuadas para no comprometer la salud de los habitantes del municipio.

Para lo anterior, se presentó la oportunidad de conocer una iniciativa llamada Waira, la cual está relacionada con la medición de la contaminación atmosférica en el municipio de La Ceja del Tambo, en este caso, se encuentra realizando monitoreo del contaminante $PM_{2.5}$ -puesto que según la OMS es de mayor riesgo para la salud- a partir de la instalación de 24 sensores en el área urbana y rural. Waira es un sistema de alerta temprana que permite a la ciudadanía acceder a la información de manera pública y cuenta con dos objetivos principalmente: el primero es lograr informar a los individuos cómo es la calidad del aire que están respirando y; el segundo está relacionado con el aporte argumentativo que se le pueda brindar a aquellas personas tomadoras de decisiones como alcaldes, concejales, entidades, corporaciones, entre otras, para planear y ejecutar proyectos de manera informada.

En el mapa 3 se identifican los sensores de monitoreo instalados en el municipio de La Ceja, los cuales corresponden a los puntos en la imagen, esta visualización es posible a partir de la aplicación Grafana, la cual es de libre acceso. En el “layer 1”, es decir, la leyenda del mapa, se encuentran los colores que toman como punto de partida la escala de la OMS: verde y amarillo indican niveles “normales” de contaminación, el tono naranjado representa la existencia de unos niveles de $PM_{2.5}$ que podrían ser perjudiciales para aquellas personas que presentan comorbilidades respiratorias y, del color rojo hacia abajo, demuestran que los niveles de contaminación son contraproducentes para cualquier persona que esté a la exposición de este material particulado. Por su parte, en la gráfica se evidencian los niveles de contaminación alcanzados por el $PM_{2.5}$ en diversos horarios del día y en la parte inferior, se encuentran los sensores de AireCiudadano registrados en el país, los de Waira poseen su nombre al inicio y, entre otros aspectos, alguna palabra clave con la finalidad de indicar el lugar en el cual se encuentra instalado el sensor. Al presionar cada sensor de manera individual, se presenta la gráfica que indica los niveles registrados por el mismo en el barrio del municipio que se haya seleccionado. De igual manera, la aplicación posee un historial en donde se pueden encontrar registros de hasta 50 años posteriores y evidenciarlo en la gráfica, por lo que es posible realizar filtros si se desea analizar un periodo de tiempo específico.

Figura 31. Mapa red AireCiudadano - La Ceja del Tambo, Antioquia



Fuente: Grafana, 2023

En este contexto, Rionegro también tiene la posibilidad de proyectar y examinar la puesta en marcha de una red temprana de calidad del aire, puesto que, hasta el momento, solo cuenta con las estaciones de monitoreo implementadas por CORNARE. Dicha red podría monitorear contaminantes criterio en el municipio -dados los argumentos desarrollados en el presente trabajo investigativo- y que, además, logre ser de carácter público para que los habitantes y visitantes del territorio accedan a la información en tiempo real y tomen decisiones en pro del bienestar común. Para lo anterior, sería pertinente contar con el apoyo de entidades que traten estos temas, diversos colectivos del municipio y profesionales o estudiantes con carreras afines, quienes puedan establecer una sinergia para planear y alcanzar un objetivo común. Igualmente, las entidades gubernamentales, los habitantes del municipio y la población en general, han de promover y mejorar las condiciones de vida, Bustamente (comunicación personal, 19 de enero de 2023) recomienda implementar el uso de la bicicleta, caminar, realizar deporte, alimentarse de forma saludable y no emplear los vehículos particulares cuando el trayecto de desplazamiento sea corto, de esta forma, no solo mejorarían las condiciones de salud de la población, sino que es posible reducir el alto flujo vehicular y por ende, la cantidad de emisión de contaminación a la atmósfera.

Por último, se invita a realizar lectura del anexo planteado al final, el cual es un manual que sugiere los lineamientos clave a tener en cuenta en el momento de analizar la contaminación atmosférica en el municipio de Rionegro para la posterior toma de decisiones respecto a los resultados arrojados.

Referencias bibliográficas

- Agencia Internacional de Energía. (2017). World Energy Balances. Obtenido de <https://webstore.iea.org/world-energy-balances-2017>
- Alcaldía de Rionegro. (2018). Plan de Ordenamiento Territorial POT. <https://rionegro.gov.co/wp-content/uploads/2021/03/Decreto-124-de-09-abril-de-2018-compilacion-acuerdos-POT.pdf>
- Alfaro, A., Córdoba, M., Cebrián, M., Font, I., Juárez, M., Medina, V., Lacasa, A., Sánchez, J., Pallás, V. y Jordá, C. (2006). Necrosis del tomate: “torrao” o “cribado”. *Bol. San. Veg. Plagas*, 32: 545-562.
- Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández, R., Gandarillas, A. Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Esp Salud Pública*, 73: 123-132.
- Badii, M., Guillén, A., Lugo, O. y Aguilar, J. (2015). Factores que provocan la degradación ambiental. *Daena: Revista internacional de buena conciencia*, 10 (3), 1–9. Obtenido de [http://www.spentamexico.org/v10-n3/A1.10\(3\)1-9.pdf](http://www.spentamexico.org/v10-n3/A1.10(3)1-9.pdf)
- Bedoya, J., y Martínez, E. (2009). Calidad del aire en el valle de aburrá Antioquia-Colombia. *DYNA (Colombia)*, 76(158), 7–15.
- Benavides, A., Ramírez, H., Robledo, V., Maiti, R., Cornejo, E., Hernández, J., Sandoval, A., Mendoza, R., Samaniego, E., Ramírez, J., Bacopulos, E., Aguilera, A., y Fuentes, L. (2022). Ecofisiología y bioquímica del estrés en plantas. Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah, México. pp. 7-10.
- Carballal, R., Casares, M., Gutiérrez, L. y García, J. (2006). Introducción a los líquenes. Capítulo 7, pp. 158-188. Proyecto Andalucía Enciclopedia de la Naturaleza, Tomo XXI. Editors: Giralda
- Castillo Lugo, J. (2010). Estimación de los beneficios en salud asociados a la reducción de la contaminación atmosférica en Bogotá, Colombia. Uniandes.
- Chen, J., y Kleeman, M. (2009). Source apportionment of visual impairment during the California regional PM10/PM2.5 air quality study. *Atmospheric Environment*, 43, 6136-6144.
- Cislaghi C., Nimis P L. (1997). Lichens, air pollution and lung cancer. *Nature*. 387: 463-464.
- Comisión de Regulación. (2016). Código de Medida de Combustibles Limpios. CREG.
- CORNARE., Alianza Clima y Desarrollo., Fundación Natura., Fondo Mundial para la Naturaleza. (2016). Actividad económica actual en el Oriente antioqueño y perspectivas de crecimiento verde y desarrollo compatible con el clima. Anexo 4. https://www.CORNARE.gov.co/Plan-crecimiento-verde/Anexo4.Economia-actual-y-perspectivas-CV&DCC_OrienteAntioquena.pdf

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Bogotá. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/infografias/info-CNPC-2018total-nal-colombia.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación (2018). Documento CONPES 3943. Política para el mejoramiento de la calidad del aire. Bogotá.
- DeWalt, M. & DeWalt, B. (2002). Participant observation: a guide for fieldworkers. Walnut Creek, CA: AltaMira Press
- Esri. (14 de enero del 2023). *Comparar métodos de interpolación*. ArcGIS pro. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/comparing-interpolation-methods.htm#:~:text=enumeran%20a%20continuaci%C3%B3n-,IDW,de%20cada%20celda%20de%20procesamiento>.
- Fang, G.C., Chang, C.N., Chu, C.C., Wu, Y.S., Fu, P., Yang, I.L., y Chen, M.H. (2003). Characterization of particulate, metallic elements of TSP, PM_{2.5} and PM_{2.5-10} aerosols at a farm sampling site in Taiwan Taichung. *The Science of the Total Environment*, 308, 157-166
- Galeano, M. (2012). Estrategias de investigación social cualitativa. El giro en la mirada. *La Carreta Editores E.U Medellín, Colombia*
- Gaviria CF; Benavides PC, T. C.; Tangarife, C. (2011). Contaminación por material particulado respiratorio en Medellín (2008-2009). *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 29(3), 241–50.
- Gómez, M., y Gómez, V. (2007). Líquenes y musgos de Morelia relacionados con la calidad del aire. *Biológicas*, No.9, pp. 5-11. Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- Gutiérrez, A. (2012). ¿Qué es la movilidad? Elementos para (re) construir las definiciones básicas del campo del transporte. *Bitácora Urbano Territorial*, 21(2), 61–74
- Grüninger, W., Velarde, M. 1985. Investigación de líquenes como indicadores de la contaminación y su aprovechamiento en la educación ambiental. En *Revista Científica*. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Instituto de Investigaciones químicas y Biológicas, Universidad de Guatemala, Vol. 7.1: 34- 41.
- Hawksworth D.L., Iturriaga T. y Crespo.A. (2005). Líquenes bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medioambientales en los trópicos. *Rev Iberoam Micol*, 22: 71-82
- IDEAM. (2012). Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM. Diciembre de 2012, Bogotá D.C.Colombia. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/informes-del-estado-de-la-calidad-del-aire-en-colombia>
- IDEAM. (2016). Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015. Publicación aprobada por el IDEAM. Octubre 2016, Bogotá D.C, Colombia. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/informes-del-estado-de-la-calidad-del-aire-en-colombia>

- IDEAM. (2017). Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2016. Publicación aprobada por el IDEAM. Diciembre 2017, Bogotá D.C, Colombia. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/informes-del-estado-de-la-calidad-del-aire-en-colombia>
- IDEAM (2021). Contaminación atmosférica. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica>
- IDEAM (2022). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM. www.ideam.gov.co
- Laboratorio del Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental LABGIGA. (2021). Informe final de calidad del aire del convenio interadministrativo de CORNARE-Universidad de de Antioquia número 218-2020, cuyo objeto es realizar el monitoreo continuo de calidad del aire, realizando el muestreo y evaluación de los contaminantes criterio, solicitado de manera simultánea y en tiempo real, en un punto localizado en el municipio de Rionegro. *Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Entidad contratante CORNARE, Medellín.* https://www.CORNARE.gov.co/SIAR/aire/CALIDAD_DE_AIRE/CONTENIDO/Informe_Monitoreo_Continuo_Calidad_del_Aire_2020-2021.pdf
- Lijteroff R., Lima L. y Prieri B. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (2) 111-12.
- Lillo, A. (2018). Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire. Universidad Complutense.
- Lineamiento para la formulación del Informe de Gestión Ambiental (2019). <https://rionegro.gov.co/wp-content/uploads/2020/12/07-Ambiental-y-Gestion-del-Riesgo.pdf>
- Mares, I. (2017). Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire. Universidad Complutense
- Martín, M y Salamanca, A (2007). El muestreo en la investigación cualitativa. Departamento de Investigación de FUDEN. *Nure Investigación*, n° 27.
- Méndez, O., y Fournier, L.A. (1980). Los líquenes como indicadores de la contaminación atmosférica en el área metropolitana de San José, Costa Rica. *En Revista de Biología Tropical.* Vol. 28: 31-39.
- Mészáros, E. (1999). *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry.* Akadémiai Kiado.
- Monge-Nájera, J. 1990. *Introducción al estudio de la naturaleza. Una visión desde el trópico.* Editorial de la Universidad Estatal a Distancia, San José.
- Munsif, R., Zubair, M.; Aziz, A.; Nadeem, M. (2021). *Industrial Air Emission Pollution: Potential Sources and Sustainable Mitigation, Environmental Emissions,* Richard Viskup, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.93104. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/72766>
- Murad, R. (2003). Estudio sobre la distribución espacial de la población en Colombia. CEPAL. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/7186>

- Naciones Unidas (1994). Convención Marco sobre el Cambio Climático
- National Renewable Energy Laboratory. (2006). Industrial Technologies Program. Obtenido de <https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39308.pdf>
- Ordóñez Agulla, S. (2009). “Después de Hubbert. Los combustibles fósiles.” Boletín de La Real Sociedad Geográfica, (145), 9–48.
- Organización de las Naciones Unidas. (1992). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo*. United Nations. <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>
- Organización Mundial de la Salud (2005). *Directrices de Calidad del Aire, Actualización Global 2005*. Copenhague, Dinamarca: Oficina Regional de la OMS para Europa
- Organización Mundial de la Salud (2021). *Pautas de calidad del aire - Actualización 2021*. Copenhague, Dinamarca: Oficina Regional de la OMS para Europa.
- Querol, X. (2018). La calidad del aire en las ciudades. Fundación Gas Natural Fenosa. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/147650/calidad-del-aire-reto-mundial.pdf>
- Reyes, P. (199). Combustibles Fósiles y Contaminación. Revista de la Facultad de Ingeniería, pp. 87 - 92
- Rice, W.B (2018). La historia de los combustibles fósiles. Teacher Created Materials. ISBN 978-1-4258-4706-7
- Rosales-Castillo, J. A., Torres-Meza, V. M., Olaiiz-Fernández, G., y Borja-Aburto, V. H. (2001). Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos. Salud Pública de México, 43(6), 544–555. <https://doi.org/10.1590/s0036-36342001000600005>
- Pardo, C. F. (2009). Los cambios en los sistemas integrados de transporte masivo en las principales ciudades de América Latina. CEPAL
- Pardo, A. (2017). Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire. Universidad Complutense.
- Grafana (19 de enero de 2023). *Mapa Red AireCiudadano*. Grafana. Recuperado el 19 de enero de 2023 de <https://sensor.aireciudadano.com/d/xTDbNb87z/general?orgId=1&refresh=30s>
- Sanz, M., y Montañés, L. (1997). Diagnóstico visual de la clorosis férrica. ITEA, Vol, 93V, No. 1, 7-22. Estación Experimental de Aula Dei (CSIC). Apartado 202, 50080 Zaragoza, España.
- Seinfeld, J. (1978). Contaminación Atmosférica. Fundamentos Físicos y Químicos. Instituto de Estudios de Administración Local, Madrid.
- Somos (2023). Sitirio. Sistema Integrado de Transporte de Rionegro. <https://somosmovilidad.gov.co/sistema-sitirio/>
- Somos y Alcaldía de Rionegro (2018). Plan Maestro de Movilidad. Rionegro 2018. <https://rionegro.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/Plan-Maestro-de-Movilidad.pdf>

Universidad Externado de Colombia y Centro de Investigación sobre Dinámica Social (2007). Ciudad, espacio y población: el proceso de urbanización en Colombia. Fondo de Población de la Naciones Unidas. Bogotá.

World Health Organization (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.

Anexo

Guía para abordar la contaminación atmosférica en el municipio de Rionegro

Este apartado recopila los lineamientos implementados en el desarrollo de la investigación titulada “Elementos clave para estudiar la contaminación atmosférica en el municipio de Rionegro, Antioquia”, con la finalidad de aportar a las personas o entidades tomadoras de decisiones del municipio de Rionegro una guía por medio de la cual se les facilite la búsqueda respecto a la contaminación atmosférica en el municipio y de esta manera, se logre planificar y gestionar estratégicamente el territorio, teniendo en cuenta la diversidad de dinámicas que interactúan en la problemática y por tanto, los distintos escenarios a los cuales se debe intervenir con la intención de prevenir y controlar la proliferación de contaminantes.

En principio, es relevante realizar una búsqueda que permita contextualizar, conocer y aprender acerca de aquello que se ha abordado hasta el momento desde el orden internacional en relación con la contaminación atmosférica. Para lo cual, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático -CMNUCC- (1994) plantea un escenario para aunar esfuerzos intergubernamentales con el objetivo de mitigar las consecuencias del cambio climático, en este caso, propone fortalecer el control y monitoreo de los contaminantes en la atmósfera para estabilizar sus concentraciones. Por su parte, la Organización Mundial de la Salud -OMS- actualiza los límites permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera a nivel global en el año 2021; realiza estudios que exponen las afectaciones generadas en la salud de las personas debido a la exposición de contaminantes atmosféricos y a su vez, advierte respecto a los contaminantes más susceptibles a incumplir los límites permisibles y la repercusión de los mismos; propone directrices para que los países puedan controlar y evitar la contaminación atmosférica, entre otras.

Para la escala nacional, se recomienda remitirse al Departamento Nacional de Planeación -DNP- puesto que allí se podrán encontrar documentos CONPES, los cuales abordan políticas de mejoramiento de la calidad del aire en Colombia, para reducir la concentración de contaminantes por medio de acciones estratégicas y ecológicas. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- es clave a la hora de indagar sobre la contaminación atmosférica en Colombia, puesto que es el ente encargado de hacer vigilancia de la calidad del aire en el país por medio de estaciones que integran los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire -SVCA-, con el fin de contribuir a la formulación de programas, políticas,

estrategias e instrumentos orientados a la adecuada planificación del territorio, el seguimiento y control de las fuentes de emisión, la gestión de la movilidad sostenible y la renovación tecnológica y de esta manera, prevenir y controlar el aumento de la contaminación atmosférica.

Del Instituto se destacan tres informes principalmente que dan cuenta del estado de la calidad del aire en Colombia para los años 2012, 2016 y 2017. En estas investigaciones el IDEAM plantea que, si bien en Colombia se han implementado estrategias para tener un mayor control y un seguimiento más efectivo de los contaminantes atmosféricos, las autoridades ambientales y los entes de control del país aún tienen falencias que frenan estas medidas, como por ejemplo el desarrollo de inventarios de fuentes de emisión, aplicación de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, desarrollo de estudios epidemiológicos y estimaciones económicas de la problemática de calidad del aire.

Por su parte el municipio de Rionegro se han realizado algunas aproximaciones respecto al análisis de la contaminación atmosférica. La Corporación Autónoma de los ríos Negro y Nare - CORNARE- y la Corporación Empresarial del Oriente -CEO- han expresado compromiso en un trabajo colaborativo mediante acciones para el control y seguimiento de las fuentes de emisión de algunas empresas pertenecientes a la CEO y así mismo, CORNARE ha realizado mediciones de contaminantes atmosféricos por medio de estaciones de monitoreo fijas y móviles en algunos puntos estratégicos del municipio, cuyos informes se encuentran en la página de CORNARE. Juan Fernando Zapata quien hace parte del Recurso Aire de CORNARE y Sandra Bohórquez Coordinadora Ambiental de la CEO, son actores clave a la hora de tratar sobre la contaminación del aire en Rionegro, puesto que cuentan con informes, análisis y conocimientos en relación a la temática. Por ejemplo, estos actores argumentan que en Rionegro el transporte y la industria -respectivamente- son consideradas como las actividades económicas más importantes que en el futuro podrían afectar la calidad del aire del municipio.

Así mismo, es pertinente remitirse al Laboratorio del Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental LABGIGA, quien en convenio con CORNARE ha desarrollado campañas e informes en relación con el monitoreo de la calidad del aire en el Valle de San Nicolás para diferentes momentos. En los años 2017, 2018 y 2019 se determinó que ninguno de los contaminantes monitoreados en la campaña que realizaron superó el nivel máximo permisible establecido en la normativa colombiana. Para el año 2021, cuentan con un Informe técnico final de la calidad del aire, en el cual dan cuenta del monitoreo que se llevó a cabo de manera continua desde el 17 de julio de 2020 hasta el 14 de marzo del 2021, teniendo como resultados que los

contaminantes monitoreados registraron concentraciones por debajo de los límites permisibles establecidos para cada uno, no obstante, para este último año el material particulado PM_{2.5} fue entre todos los contaminantes, la concentración más cercana a alcanzar el límite máximo permisible.

Como referente no solo para el tema en cuestión sino también para planificar estrategias que se puedan aplicar en Rionegro, es imperativo conversar con Sebastián Giraldo, estudiante del pregrado en Desarrollo Territorial y voluntario de la iniciativa Waira. Giraldo, da cuenta de este proyecto, el cual es una red de ciencia ciudadana que tiene como objetivo medir la calidad del aire en el municipio de La Ceja a partir del análisis del material particulado 2.5 o PM_{2.5} puesto que es el contaminante que mayores riesgos representa para la salud de las personas según la OMS. Gracias a la instalación de 24 sensores en diferentes barrios de La Ceja, fue posible tener un sistema de alerta temprana que permite informar a todas las personas cómo se encuentra el aire que están respirando por medio de una aplicación gratuita y de libre acceso. Waira podría considerarse referente como ejemplo para proyectar y ejecutar una estrategia - con algunas similitudes- que impulse y mejore la forma en la que se estudia y visibiliza la contaminación atmosférica en el municipio de Rionegro, de esta manera sería posible implementar sensores que monitoreen la calidad del aire en áreas estratégicas, como la zona noroccidental del municipio, la cual presenta niveles considerables de elementos contaminantes, puesto que se caracteriza por presentar asentamiento industrial, alto flujo vehicular, el aeropuerto José María Córdoba, los cultivos de flores, entre otras dinámicas económicas, y así, obtener información, analizarla y tomar decisiones con argumentos claros, con la finalidad de mejorar las condiciones atmosféricas del territorio o mitigar una posible contaminación del aire si los límites permisibles de emisión establecidos por la OMS o por el Gobierno Nacional llegan a ser superados.