INFORME FINAL DE DISEÑO DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA JURISDICCIÓN DE CORNARE

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO DE COLABORACIÓN No. 141-2023

UNA ALIANZA ENTRE:

EJECUTOR

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Corporación Académica Ambiental

EL HOMBRE POR NATURALEZA
Cornare
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL RIONEGRO-NARE

MEDELLÍN, 2023

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS 3
LISTA DE FIGURAS 4
1 INTRODUCCIÓN 5
2 OBJETIVOS 6
2.1 Objetivo general 6
2.2 Objetivos específicos 6
3 MARCO TEÓRICO 6
4 METODOLOGÍA 8
5 RESULTADOS Y ANÁLISIS 15
5.1 Recolección de información general 15
5.1.1 Geografía y clima 15
5.1.2 Cartografía de la zona de estudio 17
5.1.3 Crecimiento demográfico 19
5.1.4 Estudios de salud 25
5.2 Campañas de monitoreo preliminar 26
5.3 Estudio meteorológico preliminar 27
5.3.1 Rosas de vientos por campañas de monitoreo 27
5.3.2 Rosas de vientos mensuales 29
5.3.3 Tendencias de vientos anuales 30
5.3.4 Tendencias de precipitación anual 32
5.3.5 Condiciones meteorológicas 33
5.3.6 Quejas asociadas al recurso aire 34
5.4 Inventario de emisiones 34
5.4.1 Fuentes fijas puntuales 34
5.4.2 Fuentes fijas de área 39
5.4.3 Fuentes difusas o dispersas 41
5.4.4 Fuentes móviles 44
5.5 Modelación preliminar 45
5.5.1 Recomendaciones 46
6 DISEÑO DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE 47
6.1 Escala, objetivos y tipo de SVCA 47
6.2 Ubicación de las estaciones del SVCA 49
6.2.1 Estaciones fijas 49
6.2.2 Estaciones indicativas 51
6.2.3 Equipos de medición 56
6.2.4 Consideraciones especiales de este tipo de SVCA 58
6.2.5 Diseño SVCA 58
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Origen y efectos en la salud y el ambiente de los contaminantes criterio [5] 7
Tabla 2. Niveles máximos permisibles según la Resolución 2254 de 2017 [2] 8
Tabla 3. Escala de Monitoreo de los SVCA 10
Tabla 4. Duración de un programa de vigilancia. Extraído del Manual de Diseño del SVCA 11
Tabla 5. Características del SVCA Tipo III Intermedio 14
Tabla 6. Número de empresas según su sector productivo por subregión 36
Tabla 7. Descripción del SVCA Tipo III Intermedio. 48
Tabla 8. Puntos críticos de emisiones del contaminante criterio PM_{10} 52
Tabla 9. Puntos críticos del contaminante criterio $PM_{2.5}$ 53
Tabla 10. Emisiones de los contaminantes criterio SO_2 y NO_2 54
Tabla 11. Puntos críticos de precursores de ozono. 55
Tabla 12. Metodologías de medición recomendadas para el SVCA 57
Tabla 13. Ventajas y desventajas de las técnicas de medición para el SVCA 57
Tabla 14. Diseño SVCA 59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la clasificación de los SVCA según el tamaño de población 9
Figura 2. Diagrama de flujo de la revisión inicial para el diseño de un SVCA..... 12
Figura 3. Diagrama de flujo para el diseño de un SVCA de una autoridad ambiental..... 13
Figura 4. Centros poblados de la jurisdicción de Cornare 17
Figura 5. Distribución de la población en las subregiones de la jurisdicción de Cornare .. 18
Figura 6. Distribución de la población en zona urbana y rural en la jurisdicción de Cornare 18
Figura 7. Zonificación ambiental de las áreas protegidas en la jurisdicción de Cornare ... 19
Figura 8. Empresas con fuentes fijas puntuales y su sector productivo por subregión 35
Figura 9. Contaminantes criterio por sector productivo. 37
Figura 10. Emisiones de contaminantes criterio para todas las subregiones. 38
Figura 11. Emisión total de compuestos orgánicos volátiles por subregión de la corporación. Enmarcado en el convenio 141-2023 41
Figura 12. Empresas con fuentes difusas por subregión..... 43
Figura 13. Empresas con fuentes fijas puntuales y fuentes difusas por subregión..... 44
Figura 14. Rosa de vientos diurna en la estación La Danta 50
Figura 15. Densidad de fuentes fijas y dispersas..... 56

1 INTRODUCCIÓN

Los efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana y ambiental han tomado un lugar importante a la hora de tomar decisiones y de implementar programas en beneficio de la población, con la intención de vigilar el estado de la calidad del aire y velar por el derecho a respirar un aire limpio. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica ha generado consecuencias graves y se ha catalogado como una de las causas de muerte a nivel mundial. El deterioro en la calidad del aire influye directamente en la salud humana causando enfermedades como ERA (Enfermedad Respiratoria Aguda). Los costos ambientales también han sido cifras que han hecho que se ponga el foco en estrategias de control, evaluación y monitoreo de los contaminantes emitidos al aire [1].

Desde la Constitución Política se menciona “el derecho colectivo a gozar de un ambiente sano y el deber del Estado de proteger la integridad del ambiente y prevenir los factores de deterioro ambiental”. Además, uno de los objetivos de la Política de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica que adoptó el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año 2010 consiste en “regular los contaminantes de la atmósfera que pueden afectar la salud humana, fijando niveles adecuados para proteger la salud de la población”. Para la regulación de los contaminantes se fijaron niveles máximos permisibles y una clasificación del estado del aire según el ICA (Índice de Calidad del Aire) que da cuenta del estado de este recurso relacionado con los efectos en la salud de la población. Por lo anterior, el control y monitoreo de la calidad del aire se hace fundamental para conocer el estado del aire al que está expuesto la población de la jurisdicción, las consecuencias que trae consigo y también las medidas a implementar [2].

El monitoreo de la calidad del aire, ha permitido identificar los contaminantes emitidos al aire y sus orígenes, también las condiciones meteorológicas que influyen en la dispersión de los contaminantes, proporcionando información relevante para elaborar e implementar programas orientados a la adecuada gestión del recurso aire, incluyendo acciones de mitigación de la problemática y alternativas para reducir la emisión de contaminantes [3].

La implementación de un Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire se hace debido a problemáticas de contaminación atmosférica y en poblaciones de mínimo 50.000 habitantes. Consiste en un conjunto de equipos de medición de parámetros de la calidad del aire y variables meteorológicas que permite el seguimiento y monitoreo de los contaminantes emitidos al aire y su dispersión. Además de los equipos de medición es necesario personal capacitado, programas de mantenimiento y un sistema de administración de información para garantizar de la calidad de los datos [4].

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire en la jurisdicción de Cornare con base en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar el diagnóstico inicial planteado por el protocolo para tener una visión integral de la jurisdicción de la Corporación
- Evaluar los puntos críticos de emisiones contaminantes en la jurisdicción de la Corporación
- Presentar el diseño del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire para la jurisdicción de la Corporación

3 MARCO TEÓRICO

Los compuestos químicos que generan un deterioro en la calidad del aire tienen distintos orígenes, y se clasifican según sus efectos en la salud o en el ambiente como contaminantes criterio, gases de efecto invernadero, tóxicos o peligrosos y climáticos de vida corta. En la Tabla 1, se mencionan los contaminantes criterio y algunos efectos en la salud y el ambiente [5].

Contaminante criterio	Origen	Efectos	
		Salud	Ambiente
Óxidos de nitrógeno (NOx)	Generados a partir de procesos de combustión en vehículos y plantas generadoras de energía	Tos, bronquitis e irritación en garganta, nariz y ojos	Generación de lluvia ácida, acidificación y eutrofización de ecosistemas

Contaminante criterio	Origen	Efectos	
		Salud	Ambiente
Partículas suspendidas (PM_{10}-$PM_{2.5}$)	PM_{10} proviene de actividades como la agricultura, industria, minería y tráfico vehicular. $PM_{2.5}$ proviene de la combustión o condensación de gases contaminantes	Asma agravada	Reducción de los nutrientes del suelo, daño en bosques sensibles y cultivos agrícolas
Ozono (O_3)	Se forma a partir de reacciones fotoquímicas	Dolor de cabeza, pérdida de funcionamiento pulmonar e irritación ocular	Menor rendimiento y calidad de las plantas
Dióxido de azufre (SO_2)	Se produce por el uso de combustibles compuestos de azufre	Dificultad para respirar, paro cardíaco y bronquitis crónica	Generación de lluvia ácida y deterioro de los suelos

Tabla 1. Origen y efectos en la salud y el ambiente de los contaminantes criterio [5]

Según los últimos reportes del IDEAM sobre el estado de la calidad del aire, el contaminante de mayor preocupación es el Material Particulado Menor a 2,5 micras ($PM_{2.5}$) debido a la afectación a las vías respiratorias de la población [1]. La contaminación atmosférica ha ocasionado enfermedades agudas y crónicas, respiratorias, cardiovasculares y cerebrovasculares a las personas expuestas a la contaminación del aire, y las poblaciones con mayor riesgo son los adultos mayores e infantes. Algunos estudios concluyen que la influencia de la contaminación puede retardar el desarrollo de los pulmones en niños y otros estudios afirman que la contaminación del aire puede afectar las células y en consecuencia el ADN. Un estudio realizado por la Facultad Nacional de Salud Pública de la Universidad de Antioquia, señaló que el incremento de 10 $\mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ aumenta la probabilidad de riesgo a padecer una enfermedad o morir por los daños ocasionados en la salud relacionados a la contaminación atmosférica. A nivel nacional, un informe realizado por el Instituto Nacional de Salud en 2018 señaló que 15.681 personas mueren anualmente debido a la exposición de contaminantes atmosféricos, aproximadamente un 8% del total de muertes del país son debido a la calidad del aire [6]. Por lo anterior, para regular la contaminación atmosférica y así mismo proteger la salud humana, la normativa a nivel nacional fijó niveles máximos permisibles para los contaminantes (ver Tabla 2).

Contaminante	A partir del 1 de julio de 2018		A partir del 1 de enero de 2030	
	Nivel máximo permisible ($\mu g/m^3$)	Tiempo de exposición	Nivel máximo permisible ($\mu g/m^3$)	Tiempo de exposición
PM_{10}	50	Anual	30	Anual
	100	24 horas		
$PM_{2.5}$	25	Anual	15	Anual
	50	24 horas		
SO_2	50	24 horas	20	24 horas
	100	1 hora		
NO_2	60	Anual	40	Anual
	200	1 hora		
O_3	100	8 horas		
CO	5,000	8 horas		
	35,000	1 hora		

Tabla 2. Niveles máximos permisibles según la Resolución 2254 de 2017 [2]

La Resolución 2254 de 2017 se establece con el fin de garantizar un ambiente sano y reducir el riesgo sobre la salud a causa de la exposición a contaminantes atmosféricos, y atendiendo las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) que propone una reducción progresiva de la contaminación atmosférica en lugares donde se exceden los límites máximos permisibles [5].

Debido a las evidencias sobre los efectos en la salud a partir de las emisiones de contaminantes atmosféricos y los niveles permitidos por la normativa, es necesario el monitoreo constante de los contaminantes emitidos a la atmósfera por lo que se hace importante el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire, el cual consiste en un conjunto de equipos de monitoreo de contaminantes atmosféricos y de variables meteorológicas que se instalan en puntos críticos de emisiones contaminantes y donde hay una población mayor a cincuenta mil habitantes [4].

4 METODOLOGÍA

Para conocer el tamaño de la población e iniciar con el diseño del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) fue necesario verificar el último reporte brindado por el DANE

(Departamento Administrativo Nacional de Estadística) y se encontró que para el año 2018 había 723.553 habitantes en la jurisdicción de Cornare según el Censo Nacional de Población y Vivienda [7]. Lo anterior con el fin de identificar el tipo de SVCA que le corresponde a la Corporación, cumpliendo con el criterio de tener entre 500.000 y 1.500.000 de habitantes el tipo de sistema que se debe diseñar es el Tipo III: Intermedio (Ver Figura 1).

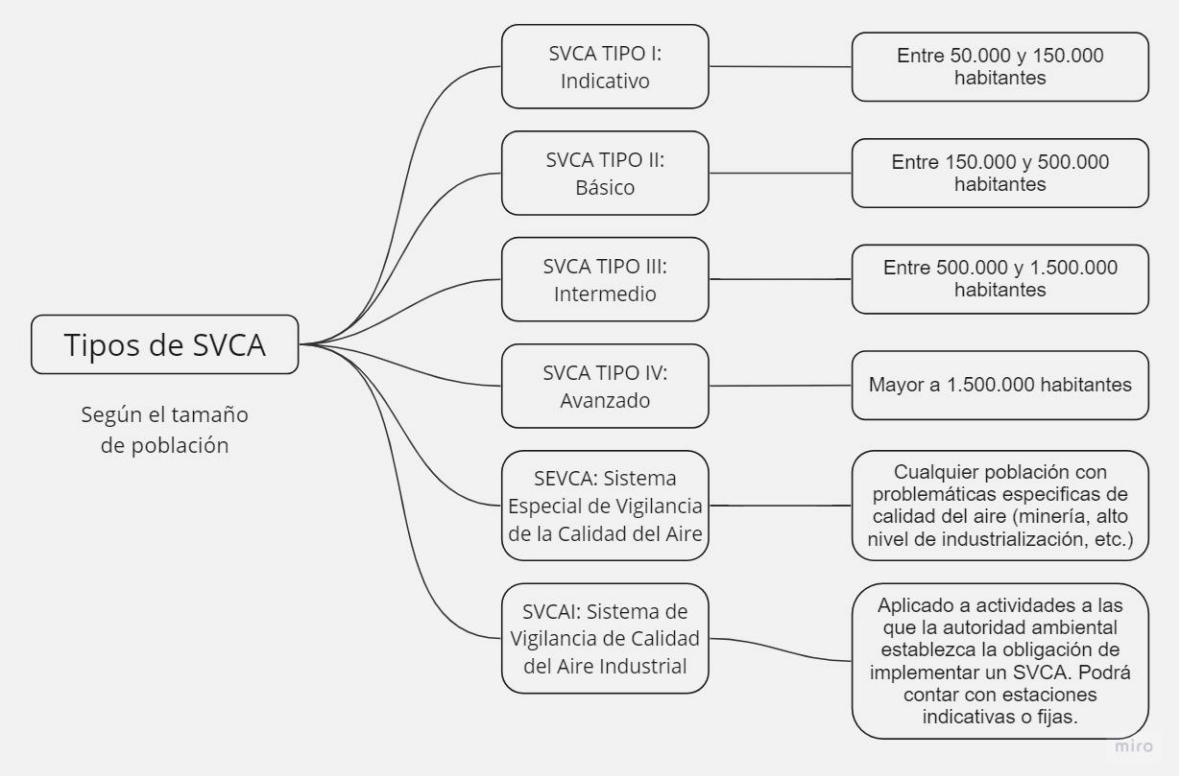


Figura 1. Diagrama de flujo de la clasificación de los SVCA según el tamaño de población

Para el diseño del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), fue necesario establecer la escala de monitoreo, el Manual de Diseño de SVCA muestra una tabla donde se verifica a cuál escala de monitoreo aplica la jurisdicción de la Corporación (Ver Tabla 3).

Tabla	Descripción	Escala
Micro	Típica de áreas como cañones urbanos y corredores de tráfico donde el público puede estar expuesto a altas concentraciones de contaminantes provenientes de las emisiones de fuentes móviles o fuentes puntuales. Responde a estudios puntuales de un grupo de fuentes y receptores específicos y/o estudios epidemiológicos. Las mediciones tomadas a esta escala no deben tomarse como representativas de un área mayor.	2-100m
Media	Representa concentraciones típicas de zonas limitadas en un área urbana.	100m-0.5km
Vecindario	Las mediciones en esta categoría pueden representar las condiciones en un área específica al interior de un área urbana.	0.5km-3km
Urbana	Condiciones de un área urbana.	3km-20km
Regional	Áreas rurales o conjunto de áreas urbanas y rurales. Incluye la interacción de varias jurisdicciones de diferentes autoridades ambientales.	Más de 20km hasta el área total de la jurisdicción
Nacional	Estudio del país. Incluye la integración de varios SVCA y jurisdicciones de diferentes autoridades ambientales.	Todo el país

Tabla 3. Escala de Monitoreo de los SVCA

Donde identificamos que los 26 municipios de la jurisdicción tienen áreas rurales y urbanas, y está conformada por un área de 827.600 hectáreas, lo que equivale a 8276 km^2, por lo anterior el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) para la jurisdicción de la Corporación tendrá una escala de monitoreo regional.

Posteriormente se definieron los objetivos para el sistema de vigilancia, teniendo en cuenta que un SVCA puede tener uno o varios objetivos conforme a sus problemáticas identificadas. Los objetivos deben plantearse en coherencia con la disponibilidad técnica y económica de la Corporación, de acuerdo con esto los objetivos pueden ser planteados a corto, mediano y largo plazo. Los objetivos del SVCA en la jurisdicción de la Corporación serán los siguientes:

1. Determinar el cumplimiento de las normas nacionales de la calidad del aire.
2. Observar las tendencias a mediano y largo plazo.
3. Evaluar el riesgo para la salud humana.
4. Activar los procedimientos de control en episodios de contaminación.

De acuerdo con los objetivos planteados anteriormente, la duración del SVCA debe ser igual o mayor a 5 años, cumpliendo así con los primeros 2 objetivos del SVCA y siguiendo

las recomendaciones del Manual de Diseño del SVCA (ver Tabla 4).

Objetivo básico	Duración del programa
Evaluar cumplimiento de normas y determinación de tendencias	Mayor o igual a cinco (5) años
Evaluar estrategias de control	Mayor o igual a dos (2) años. Uno antes y otro después de implantar la estrategia
Información al público	Mínimo 1 año
Identificación de áreas críticas	Dos años. Dependiendo de la complejidad ambiental del área
Estudios específicos	Dependerá de los parámetros evaluados, cantidad requerida de datos y la frecuencia de medición

Tabla 4. Duración de un programa de vigilancia. Extraído del Manual de Diseño del SVCA

La siguiente propuesta se construyó con base en el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire [8]. Inicialmente se hace una revisión general donde se define la escala de monitoreo del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), los objetivos que orientaran el diseño y el diagnóstico que permite una visión amplia del contexto de la región. El manual de diseño de SVCA solicita un diagnóstico que contenga información general de la región, el inventario de emisiones atmosféricas, una campaña de monitoreo, un estudio meteorológico, una modelación y finalmente el análisis de toda la información recolectada. En la primera parte de la recolección de información general se incluyen estudios de salud realizados en la jurisdicción de la Corporación, datos geográficos como condiciones topográficas y usos del suelo, condiciones climatológicas, crecimiento demográfico, actividades socioeconómicas, desarrollo urbano y movilidad vehicular (Ver Figura 2).

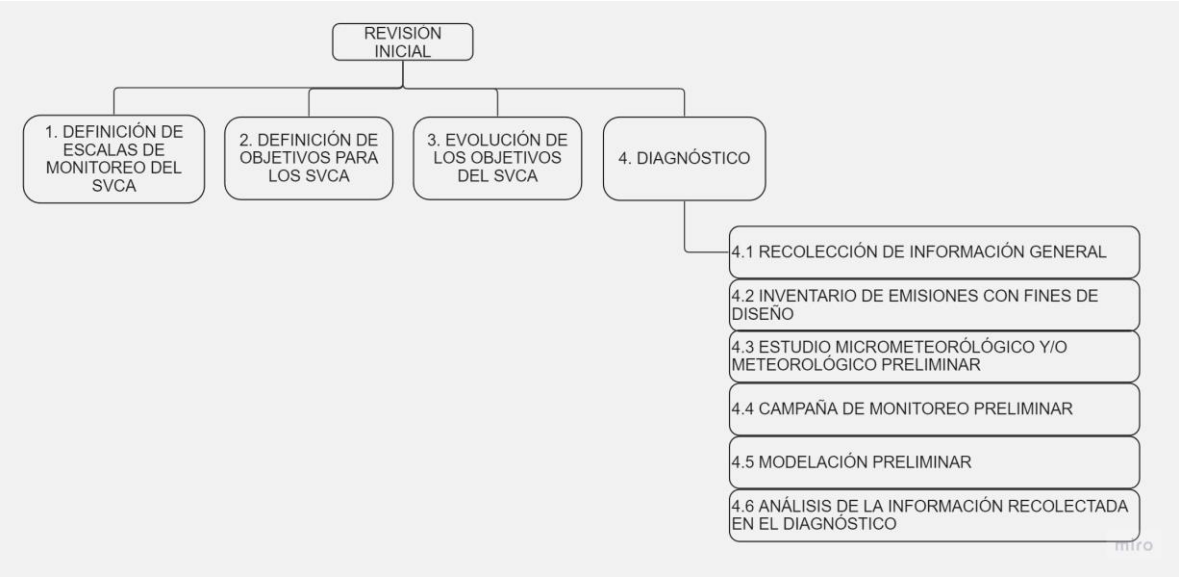


Figura 2. Diagrama de flujo de la revisión inicial para el diseño de un SVCA

Para iniciar con el diagnóstico, se hizo una revisión de los estudios de salud realizados en la región sobre el impacto de la calidad del aire y su relación con algunas enfermedades; por otro lado, se evaluó la geografía y el clima de la región que hace parte de la jurisdicción, y se obtuvo a partir del Atlas del IDEAM (a nivel del departamento de Antioquia) y de la plataforma de Meteoblue (por municipio en el año 2023), y con esta información se pudo hacer una identificación de las épocas secas y húmedas. Posteriormente se recolectó información relacionada con el desarrollo urbano, las actividades socioeconómicas y la movilidad vehicular de los municipios, encontrada en los planes de ordenamiento, en los planes de desarrollo, en estudios realizados en la región y también en la línea base ambiental municipal creada por la Corporación; la información específica sobre tipos de viviendas, índices demográficos, distribución demográfica y geográfica de empleos fue extraída del último reporte del DANE del 2018 y de la plataforma TerriData. Por su parte, la cartografía de la zona de estudio fue consolidada a partir de la página web de Cornare y del IGAC, donde se apreciaron los centros poblados, las áreas rurales, las zonas protegidas y los límites entre municipios.

El estudio meteorológico preliminar requerido por el Manual del Diseño del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire, se realizó con base en las campañas de monitoreo realizadas por la jurisdicción. Para la elaboración de las rosas de vientos anuales y rosas de vientos por campañas de monitoreo se extrajo la información de la plataforma SISAIRE y el

procesamiento de datos se hizo en Excel y WRPlot View, como resultado se obtuvo además de las rosas de vientos, gráficas y tablas de frecuencia de las velocidades del viento.

Después de la revisión inicial se evalúan las problemáticas ambientales, el número de habitantes, el dominio y los objetivos del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA), para definir el tipo de sistema que se diseñará y así mismo los parámetros que se deben seguir (Ver Figura 3).

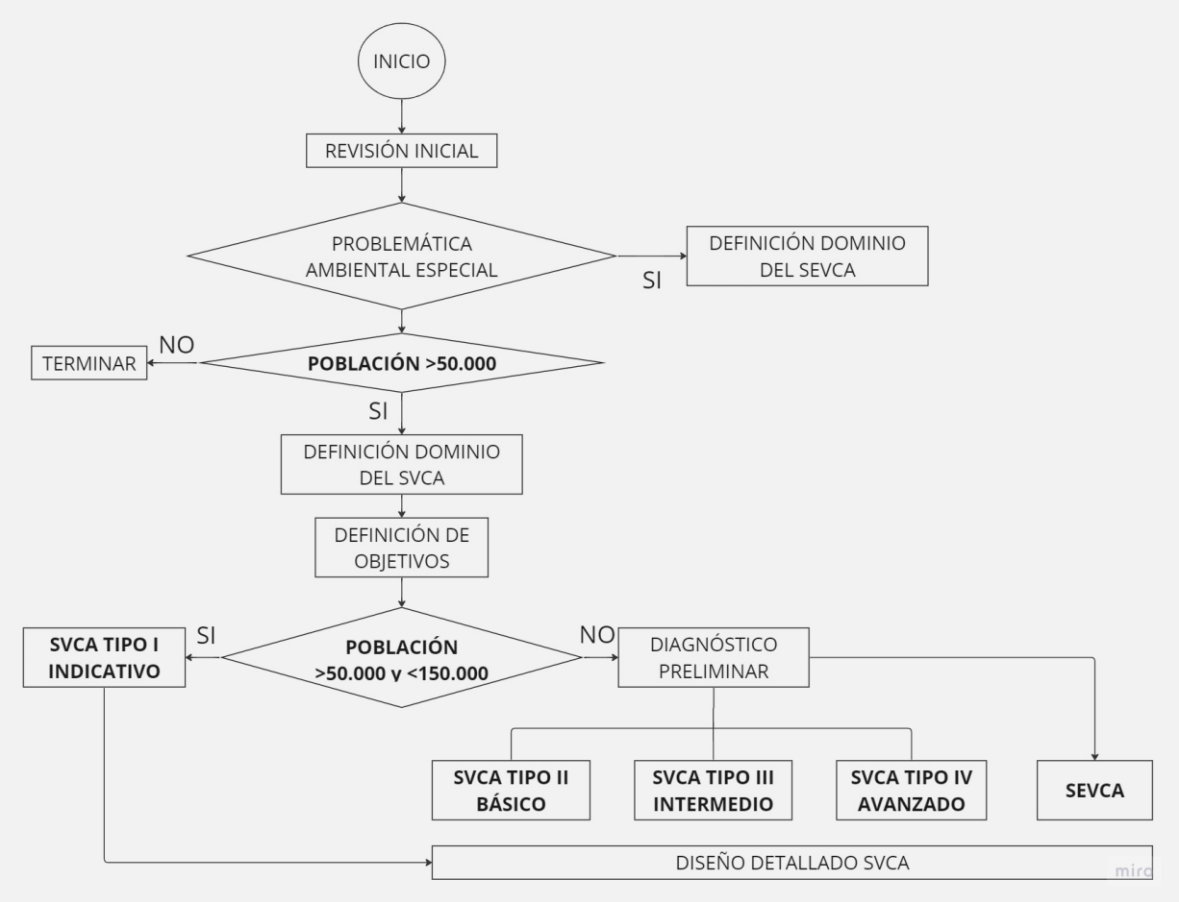


Figura 3. Diagrama de flujo para el diseño de un SVCA de una autoridad ambiental

En la Tabla 5, se presenta la descripción de las características que debe tener el SVCA Tipo III Intermedio. Es importante tener en cuenta que pueden ser definidos otros contaminantes o parámetros a medir, a partir del inventario de emisiones, campañas de

monitoreo, información existente o el modelo de dispersión; así mismo cada estación podrá contar con varios equipos y medir uno o más parámetros.

Característica	Parámetro
Tecnología de medición	Pasivo Activo Automático
Tiempo de monitoreo	Permanente
Periodicidad del monitoreo	Permanente
Parámetros a medir	PM_{10} $PM_{2.5}$ Ozono
Número de estaciones	Mínimo 3 estaciones de PM_{10} Mínimo 1 estación de $PM_{2.5}$ Mínimo 1 estación de Ozono
Tipos de estaciones	Fondo Fondo urbana Indicativas EPE
Ubicaciones estaciones	De acuerdo con el diseño específico descrito en el diseño detallado
Periodicidad del muestreo	Muestreadores activos cada tercer día. Para muestreadores pasivos: tres series de un mes de duración cada dos años Para analizadores **automáticos: permanente**
Instrumentos meteorológicos	Pluviómetros automáticos Estaciones meteorológicas automáticas portátiles Estación meteorológica de alta precisión

Tabla 5. Características del SVCA Tipo III Intermedio

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Recolección de información general

5.1.1 Geografía y clima

Subregión Aguas

En general, se observa que, en la mayoría de los datos que se tienen de la precipitación mensual acumulada, extraídos de las plataformas de Meteoblue y la del Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia – SAMA, para la subregión Aguas, la precipitación tiende a concentrarse más en el mes de abril y noviembre, presentando valores que oscilan entre los 100 y 185mm para Meteoblue y para SAMA 345 mm. En cambio, los valores más bajos de precipitación se observan en los meses de septiembre y diciembre.

Para la velocidad del viento se tienen valores que oscilan entre los 15 y 18 km/h, teniendo las temperaturas más altas en mayo entre los 20 y 28°C y las temperaturas más bajas entre 5 y 16°C.

Subregión Bosques

Para la subregión Bosques solo se tiene información de 2 municipios, Cocorná y Puerto Triunfo, teniendo los valores más altos para la velocidad del viento en julio entre 15 y 16 km/h. Las temperaturas más elevadas las registra Puerto Triunfo debido a su ubicación geográfica y a factores climáticos específicos de la zona, su pico más alto fue en el mes de agosto con 33°C, por su parte la temperatura más alta registrada en Cocorná fue de 27°C en el mes de septiembre.

En términos generales de precipitación extraídos de la plataforma de Meteoblue, se observa que, Cocorná presenta su pico más alto en noviembre con 130 mm de precipitación mensual acumulada y Puerto Triunfo sus picos más altos se dan en julio con 85mm.

Subregión Páramo

En general, se observa que, en la mayoría de los datos que se tienen de la precipitación mensual acumulada, extraídos de las plataformas de Meteoblue y la del Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia – SAMA, para la subregión Páramo, la precipitación tiende a

concentrarse más en el mes marzo, julio y noviembre, presentando valores que oscilan entre los 60 y 150mm según lo registrado por Meteoblue (siendo Nariño el municipio con el menor valor y Abejorral el municipio con el pico más alto de precipitación) y para SAMA valores de 246mm y 26mm (siendo Sonsón el municipio con mayor valor y Abejorral con el menor). A diferencia de, diciembre y mayo en donde se presentan los valores más bajos de precipitación en la mayoría de los municipios de esta subregión.

Los valores más altos de la velocidad del viento en la subregión Páramo oscilan entre 13 y 17 km/h en el mes de julio, las temperaturas más bajas oscilaron entre 6 y 13°C presentadas en su mayoría en el mes de febrero, y las más altas entre 18 y 23°C registradas en su mayoría en el mes de mayo.

Sonsón se caracteriza por tener tres pisos térmicos, lo que significa que su territorio abarca diferentes zonas climáticas con características térmicas específicas.

Subregión Porce-Nus

La precipitación más baja en la subregión Porce-Nus se presentó en el mes de diciembre, y los valores más altos de precipitación fueron registrados en octubre y noviembre con un rango entre 90 y 150mm, y las temperaturas más altas fueron registradas en mayo. Por su parte, Santo Domingo y San Roque presentan el valor más alto de la velocidad del viento en el mes de septiembre con 20 km/h, Concepción también presenta el valor más alto en septiembre, pero con 18 km/h, por último, en Alejandría el valor máximo de la velocidad del viento es de 17 km/h presentado en el mes de octubre.

Subregión Valle de San Nicolás

En la subregión Valle de San Nicolás en la mayoría de sus municipios, se registran las temperaturas más bajas en enero y febrero, con un rango de temperaturas entre los 6 y 9°C, las temperaturas más altas se presentan en mayo con valores entre los 20 y 23°C.

En cuanto a los datos que se tienen de la precipitación mensual acumulada, extraídos de las plataformas de Meteoblue y la del Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia – SAMA, para la subregión Valles de San Nicolás, la precipitación tiende a concentrarse más en los meses de marzo, octubre y noviembre, presentando valores que oscilan entre los 78 y 160 mm. A diferencia de, enero y diciembre en donde se registran los valores más bajos de precipitación en la mayoría de los municipios de esta subregión.

En términos de la velocidad del viento El Retiro tuvo su valor máximo en julio con 15 km/h, en Marinilla, Guarne y Rionegro el valor máximo osciló entre 19 y 20 km/h en julio y octubre, para La Unión, La Ceja, El Carmen de Víboral y San Vicente la velocidad del viento máxima osciló entre 17 y 18 km/h en julio y octubre.

5.1.2 Cartografía de la zona de estudio

En términos de extensión, centros poblados y zonas rurales, la subregión Valles de San Nicolás tiene un territorio de mayor extensión, con mayor porcentaje de centros poblados (2,31%) y menor porcentaje de zonas rurales (97,69%), por su parte, la subregión Porce-Nus es el territorio con menor extensión, menor área con centros poblados teniendo el 0,22% del área total del territorio y mayor proporción de zonas rurales (99,78%) (ver Figura 4, Figura 5 y Figura 6).

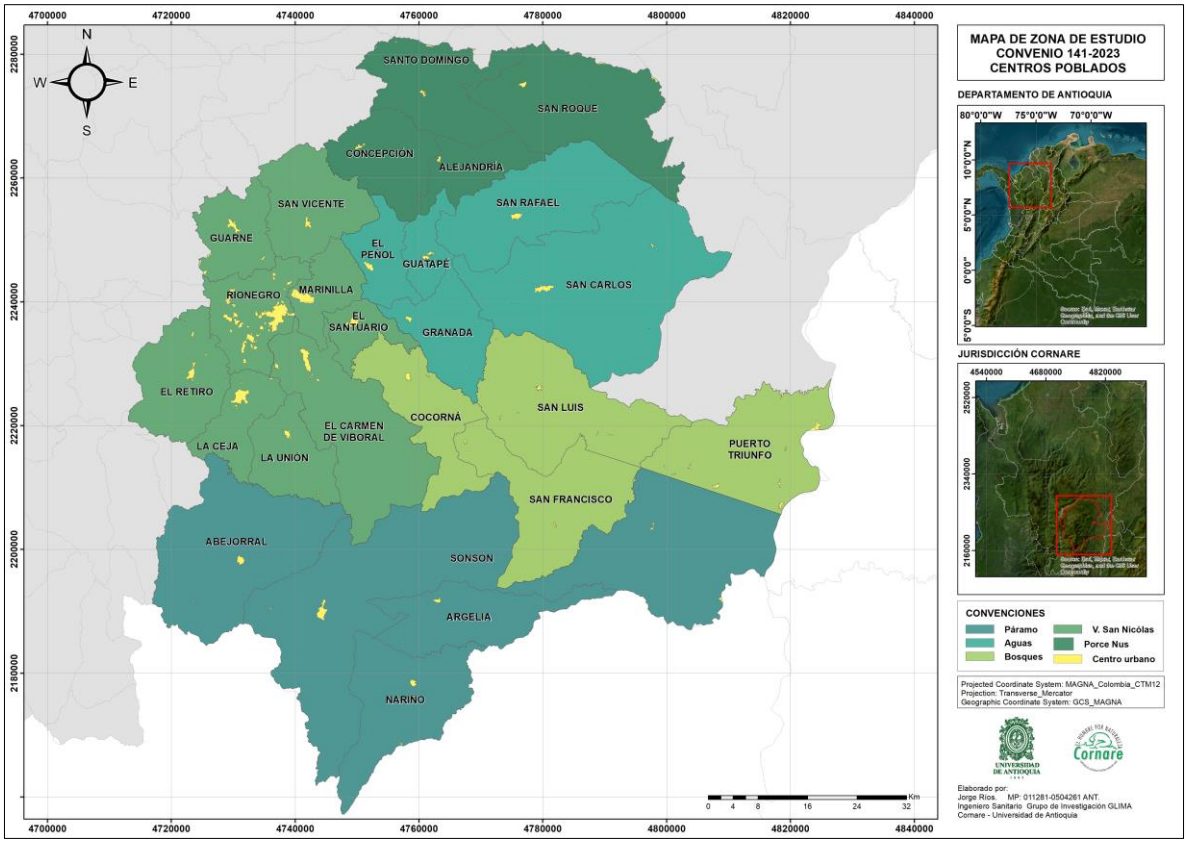


Figura 4. Centros poblados de la jurisdicción de Cornare

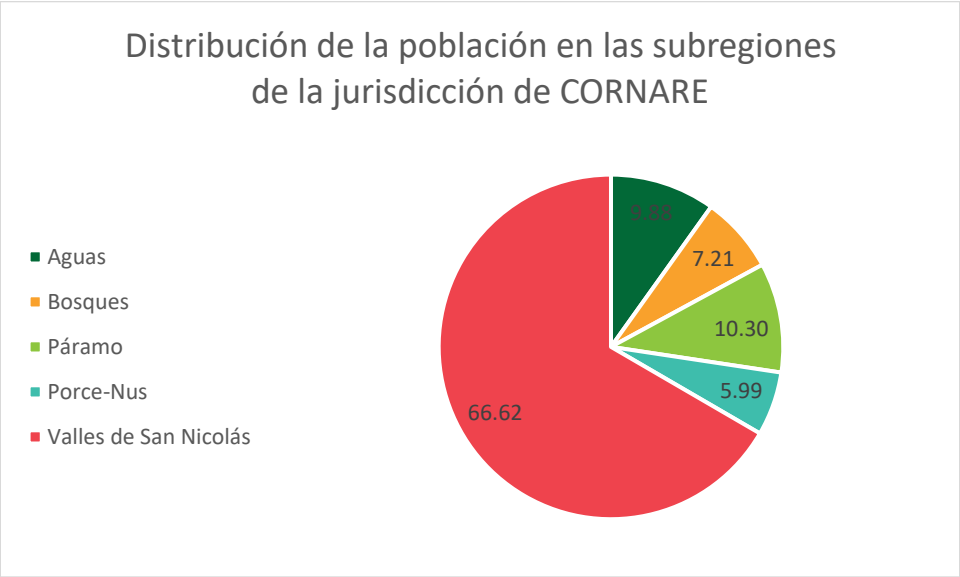


Figura 5. Distribución de la población en las subregiones de la jurisdicción de Cornare

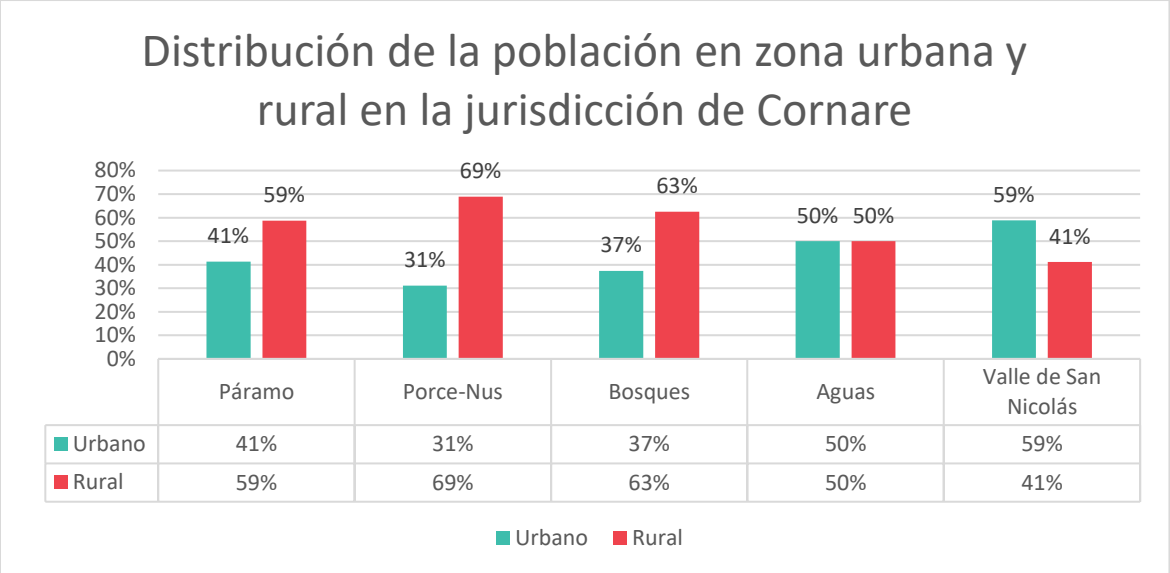


Figura 6. Distribución de la población en zona urbana y rural en la jurisdicción de Cornare

En relación con las áreas protegidas, la subregión con mayor extensión de áreas protegidas es Páramo ocupando el 29,12% del área total del territorio, por su parte, Porce-Nus es la

subregión con menor porcentaje de áreas protegidas respecto a la extensión total del territorio con un 10,83%. A partir de la zonificación ambiental que tiene la jurisdicción de Cornare, se encontró que las zonas de preservación son las más comunes en las subregiones, especialmente en Páramo siendo el 69,58% del total de áreas protegidas; por su parte, la subregión con mayor porcentaje de zonas de restauración es Bosques con un 32,34% y por último la subregión con mayor extensión de zonas de uso sostenible es Valles de San Nicolás con un 25,57%. Además, las zonas generales de uso público representan un porcentaje muy bajo respecto al total de áreas protegidas entre 0,01% y 0,18%, también es importante tener en cuenta que Porce-Nus no cuenta con este tipo de zona (ver Figura 7).

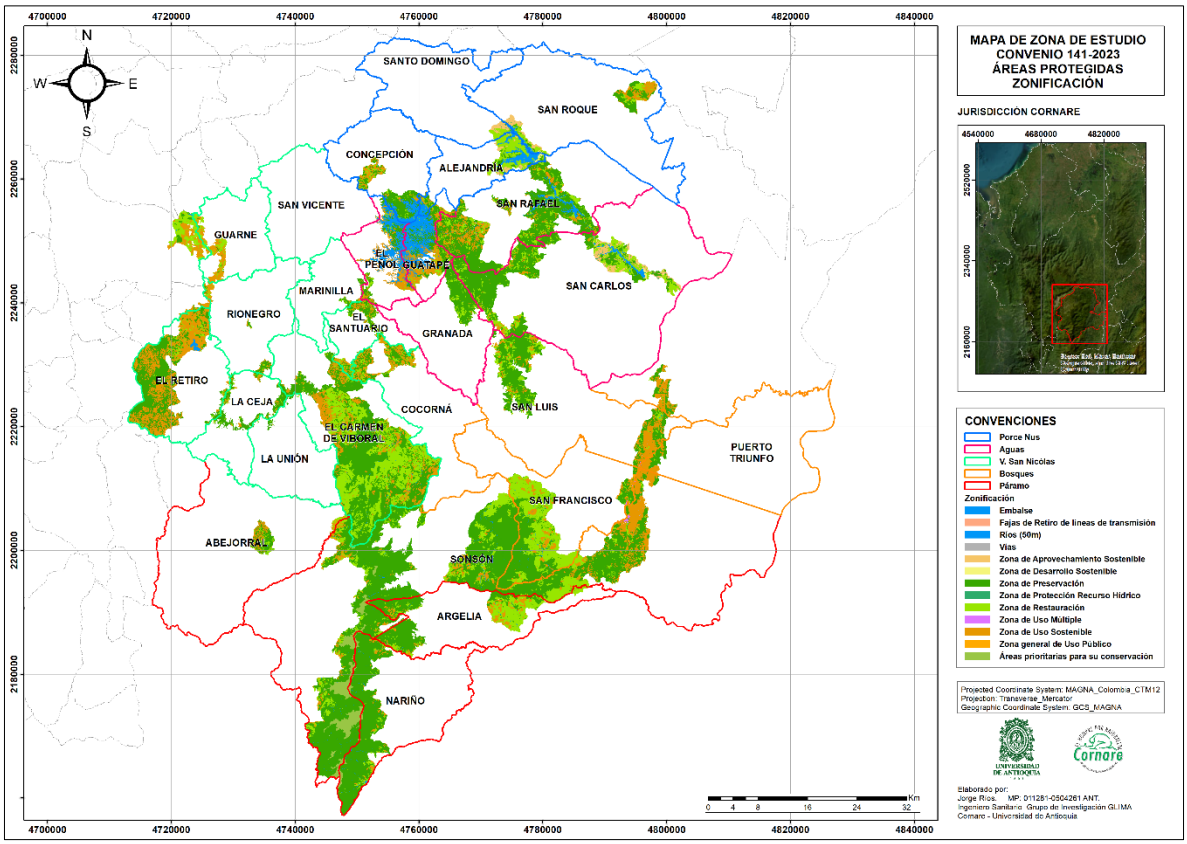


Figura 7. Zonificación ambiental de las áreas protegidas en la jurisdicción de Cornare

5.1.3 Crecimiento demográfico

A) Actividades socioeconómicas, movilidad vehicular y saneamiento básico

A continuación, se presenta el análisis por subregión sobre las actividades socioeconómicas desarrolladas en los municipios, la movilidad vehicular y estado de cobertura del saneamiento básico.

Subregión Valle de San Nicolás

En general, en esta subregión una de las actividades principales es la agricultura, sin embargo, no es la actividad principal a la que se dedican las personas, por su parte cada municipio tiene actividades tradicionales como la producción de cerámica en El Carmen de Viboral [9], la ganadería en La Unión [10], la producción de flores en La Ceja y la ebanistería en El Retiro [9]. Respecto a los sectores en los que se ocupan las personas en la subregión, en 4 de los 9 municipios la mayoría de personas ocupadas se desempeñan en el sector servicios, específicamente en Rionegro [11], El Carmen de Viboral, Guarne [9] y La Ceja; en El Retiro, Marinilla [9] y La Unión se dedican en su mayoría al sector comercio, restaurantes y hoteles, por su parte en El Santuario la mayoría de personas ocupadas se dedican al sector industrial [9] y San Vicente de Ferrer tiene una gran participación en la producción agrícola y el turismo [12].

En términos de saneamiento 3 municipios (Rionegro [13], Guarne [14] y El Retiro) de la subregión realizan la disposición final de los residuos en el Parque Ambiental La Pradera y 4 municipios (El Carmen de Viboral [15], El Santuario, La Unión y San Vicente de Ferrer) tienen su propio relleno sanitario. En cuestión de servicios de alcantarillado, la zona urbana de los municipios tiene una cobertura alta, el municipio con menor cobertura en la zona urbana es El Santuario con el 88,3%, el resto de municipios superan el 90% de cobertura [16]. Por otro lado, la zona rural, posee muy pocas redes de alcantarillado y el sistema de tratamiento de aguas residuales más usado es el de pozos sépticos, siendo Marinilla el municipio con menor cobertura en términos de tratamiento de aguas residuales mediante pozos sépticos con el 52% y los municipios con una mayor cobertura del 85% son Guarne y San Vicente de Ferrer. En relación con el sistema de acueducto en la zona urbana, los municipios con menor cobertura son San Vicente de Ferrer y Marinilla [17] con el 95% y 96% respectivamente, el resto de municipios superan el 99% de cobertura. Por su parte, en la zona rural los municipios con menos cobertura son La Ceja y El Carmen de Viboral el 48% y 71% respectivamente.

En lo que respecta a la movilidad vehicular de los municipios de esta subregión se encontró información diferente como horas pico, viajes diarios en promedio, malla vehicular y parque

automotor; Rionegro y Marinilla (con un conteo de 22304 vehículos) coinciden en el rango de horario con mayor flujo vehicular entre 5:00 y 6:00 pm, por su parte la hora con mayor flujo vehicular en La Ceja es entre 6:00 y 7:00 pm (con un conteo de 3604 vehículos); Rionegro registra 206535 viajes diarios en promedio (incluyendo viajes en bicicleta y a pie), por su lado, Marinilla en un fin de semana puede recibir hasta 72454 viajes en vehículos motorizados; por su parte La Ceja para el 2019 contaba con un parque automotor de 20969 vehículos. En cuanto a la malla vial, Guarne es el que presenta el mayor valor con 361 km y El Santuario el menor valor con 135 km, San Vicente de Ferrer y El Retiro tienen una malla vial de 212 km y 235 km respectivamente. Finalmente, El Retiro cuenta con 1,15 km de ciclorrutas construidas debido a la política pública que promueve el uso de la bicicleta [18].

Subregión Aguas

Las actividades socioeconómicas que son las principales generadoras de empleo son del sector y servicios, comercio y turismo (Granada [19], San Carlos [20] y Guatapé [21]) y agropecuario (El Peñol [22] y San Rafael [23]). En términos de saneamiento básico, específicamente con las redes de alcantarillado en la zona urbana se tiene una cobertura alta con el menor valor de 90% (Guatapé y Granada), por su parte en la zona rural es más común el uso de pozos sépticos siendo Granada el municipio con menor cobertura con 60% y Guatapé [21] con la mayor cobertura del 96%. En relación con el sistema de acueducto, Granada [24] es el municipio con menor cobertura en zona urbana y zona rural con un 90% y 78,6%. Además, todos los municipios de la subregión Aguas tienen relleno sanitario propio para hacer la disposición final de los residuos sólidos.

Subregión Bosques

La principal actividad socioeconómica de la región se desempeña en el sector agrícola con la excepción del municipio de Puerto Triunfo que desarrolla sus principales actividades en el sector comercio y transporte [19]. En términos de saneamiento, la menor cobertura en sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante pozos sépticos en la zona rural la tienen San Luis [25] y Cocorná [26] con 62 y 63% respectivamente, y la mayor cobertura la tiene Puerto Triunfo con un 80%. El sistema de acueducto tiene la menor cobertura en San Francisco [27] con un 90%, el resto de municipios superan el 96% de cobertura en la zona urbana, sin embargo, en la zona rural es la subregión que presenta los valores más bajos en abastecimiento siendo San Francisco el municipio con menor cobertura (10%), seguido de San Luis (22%), luego Cocorná con 44,8% y finalmente Puerto Triunfo tiene una cobertura del 100%. Por último, la mayoría de municipios realiza la disposición final de sus

residuos en un relleno sanitario propio, excepto San Francisco quien deposita el 46% de sus residuos en el Parque Ambiental La Pradera.

Subregión Páramo

El sector agropecuario es la principal actividad socioeconómica desarrollada en la subregión, excepto en Argelia [28] y Abejorral [19] donde el sector terciario (servicios, comercio y turismo) es el que prima en los municipios. En términos de saneamiento, el sistema de alcantarillado en la zona urbana en la mayoría de la subregión supera la cobertura del 90%, sin embargo, Argelia tiene la menor cobertura con un 60%, por su parte, en la zona rural, Argelia tiene una cobertura del 12% y Sonsón del 27%, también es común el uso de pozos sépticos para el tratamiento de aguas residuales en Abejorral tienen una cobertura del 76% y en Nariño del 35% [29]. El sistema de acueducto en la mayor parte de la subregión tiene un abastecimiento que supera el 97% en la zona urbana, con excepción del municipio de Argelia que tiene un abastecimiento del 80%, por su parte, en la zona rural no hay abastecimiento de agua potable en el municipio de Argelia, en Nariño tiene una cobertura del 16%, en Sonsón del 42% y por último el municipio que mayor cobertura tiene es Abejorral con un 80% [15]. Finalmente, todos los municipios de la subregión realizan la disposición final de sus residuos sólidos en rellenos sanitarios propios.

Subregión Porce-Nus

En la subregión la actividad socioeconómica que predomina está enmarcada en el sector terciario relacionado con servicios, comercio y turismo, excepto en el municipio de Santo Domingo que desempeña sus actividades en el sector primario (actividad agrícola y piscícola) [19]. En cuestión de saneamiento básico, el sistema de alcantarillado en la zona urbana tiene una alta cobertura sobre el 98%, por su parte, en la zona rural el sistema de tratamiento de aguas residuales mediante pozos sépticos tiene la menor cobertura en San Roque y Santo Domingo con 35,4% y 70% y la mayor cobertura Alejandría y Concepción con 93% y 85%. El sistema de acueducto en la zona urbana tiene una cobertura del 100% en toda la subregión; en la zona rural hay un déficit del 100% en el municipio de San Roque [15], y los demás municipios tienen una cobertura del 20%, 32% y 60% (Concepción [30], Alejandría y Santo Domingo [15] respectivamente). Por último, la mayoría de municipios de la subregión hacen la disposición final de los residuos sólidos en un relleno sanitario propio, con la excepción de Santo Domingo que hace la disposición final de los residuos en el Parque Ambiental La Pradera.

B) Distribución geográfica, tipos de viviendas e índices demográficos

El informe proporciona una visión detallada de la distribución de la población en jurisdicción de Cornare, divida en las cinco subregiones: Valles de San Nicolás, Porce-Nus, Bosques, Aguas y Páramo, con un enfoque en la distribución geográfica, tipos de viviendas e índices demográficos. A continuación, se presenta un análisis de cada subregión en función de estos aspectos:

Subregión Valles de San Nicolás

En esta subregión se tiene que para el año 2018 la población total es de 482.040 habitantes, la cual tiene predominio de áreas urbanas con 58.85% [7].

Para la distribución de la población por tipos de viviendas se tiene que la mayoría de la población reside en casas (123.002 viviendas). Las viviendas tipo "Apartamento" son populares en esta subregión con un total de 45.983, especialmente en Rionegro, donde se encuentran la mayoría de ellas. El tipo de vivienda "Cuarto" es menos común en esta subregión, con Porce-Nus teniendo la menor cantidad. La categoría "Otros" es marginal en la subregión, con Rionegro y Guarne teniendo el mayor número de viviendas en esta categoría.

De la misma manera, se presentan los índices de juventud y envejecimiento, así como los índices de feminidad y masculinidad en los diferentes municipios. La subregión con la mayor cantidad de jóvenes es el Valle de San Nicolás, con un índice de juventud del 25,87%, lo que indica una población relativamente joven. Para los municipios de La Unión, Marinilla y El Carmen de Viboral se tienen los menores índices de envejecimiento. Así mismo, estos municipios también tienen los mayores índices de juventud. Un índice de feminidad con cerca de 97 mujeres por cada 100 hombres y de todas las subregiones, Valles de San Nicolás es la que tiene la menor proporción de hombres [31].

Subregión Porce-Nus

Para esta subregión se tiene una población total para el año 2018 de 43.367 habitantes, con una mayor concentración en zonas rurales de 68.89% [7].

Un predominio de viviendas de tipo “Casa”, de las cuales San Roque y Santo Domingo son los municipios con mayor número de viviendas en las categorías "Casa," "Cuarto" y "Otros." Los municipios que presentan más viviendas tipo "Apartamento" son San Roque y Alejandría comparados con los otros municipios de la subregión.

Por otro lado, Concepción tiene el menor índice de juventud (21,27%) y el mayor índice de envejecimiento (14,15%). San Roque tiene el mayor índice de juventud (23,94%) y el menor índice de envejecimiento (10,99%). Esto por esto que, la subregión con la menor cantidad de jóvenes y la mayor cantidad de personas mayores a 65 años es Porce-Nus. Para el índice de masculinidad se presenta un dato mayor a 100, lo que significa que hay más hombres que mujeres en esta subregión [31].

Subregión Bosques

Mientras que en la subregión de Bosques para el 2018 la población total es de 52.142 habitantes. La mayoría de sus municipios tienen una población rural predominante, excepto San Luis, ya que es el único municipio que cuenta con una población urbana mayor [7].

La distribución de viviendas varía, pero en general, la mayoría de los municipios tienen una mayor proporción de viviendas tipo "Casa" en esta subregión. Las viviendas tipo "Apartamento" se encuentran en mayor número en Cocorná y San Luis. Las categorías "Cuarto" y "Otros" presentan los mayores datos los municipios de Cocorná y Puerto Triunfo.

En cuanto al índice de juventud, Puerto Triunfo tiene el mayor índice con el 29,17% y el menor índice de envejecimiento con 5,98%. El menor índice de juventud con 23,07% y el mayor índice de envejecimiento con 12,37% lo tiene el municipio de Cocorná. En resumen, Bosques tiene el índice de envejecimiento más bajo de todas las subregiones, con solo un 9,35% de la población total. En términos de índices de feminidad y masculinidad, Puerto Triunfo presenta un alto índice de masculinidad (123 hombres por cada 100 mujeres). Lo que nos muestra que Bosques tiene la mayor proporción de hombres, con el índice de masculinidad más alto que las demás subregiones [31].

Subregión Aguas

La población para la subregión Aguas aumenta para el año 2018 con un total de 71.474 habitantes. Presenta una distribución equitativa entre áreas urbanas y rurales a diferencia de las demás subregiones [7].

Presenta viviendas variadas en términos de tipos, con mayor concentración de casas en algunos municipios. El tipo de vivienda "Casa" es predominante, especialmente en El Peñol y San Carlos. Las categorías tipo "Apartamento" presentan 2.237 viviendas y "Cuarto" con 206 viviendas, representan el mayor valor en los municipios de San Rafael y El Peñol respectivamente. La categoría "Otros" tiene una participación mínima, pero se encuentra más en Granada y El Peñol.

Los índices de juventud y envejecimiento se presentan en todos los municipios, con diferencias menores. Los municipios de San Carlos, Granada, San Rafael, Guatapé y El Peñol tienen índices de juventud muy similares, San Rafael tiene el mayor índice de envejecimiento (12,16%), mientras que San Carlos tiene el menor (11.54%). En términos de índice de masculinidad, no varía mucho entre los municipios, sin embargo, los municipios de mayor índice lo tienen El Peñol y Guatapé y los menores índices de feminidad lo tienen Grana y San Rafael [31].

Subregión Páramo

La subregión Páramo para el año 2018 presenta una población total de 74.530 habitantes. Una influencia de población mayor en zonas rurales, con una fuerte presencia en los municipios de Abejorral y Nariño [7].

La mayoría de la población vive en casas y una menor cantidad en apartamentos. Se presenta superioridad de viviendas tipo "Casa" en los municipios de Sonsón y Abejorral. Las viviendas tipo "Apartamento" y "Cuarto" son menos comunes en esta subregión, con ciertas preferencias en Sonsón y Nariño. Mientras que, la categoría "Otros" es poco representativa, en Sonsón y Abejorral se observa el mayor número de viviendas (6) por cada municipio para esta categoría.

Presentan diversidad en los índices de juventud y envejecimiento entre municipios. Sonsón tiene el índice más alto de juventud (25%), mientras que Abejorral tiene el menor (22,29%). Abejorral tiene el mayor índice de envejecimiento (12,81%), mientras que el menor índice se encuentra en Argelia (10,44%). Finalmente, esta subregión presenta un índice de feminidad y masculinidad variada, pero en general, hay un mayor porcentaje de hombres [31].

En conclusión, cada subregión de la jurisdicción de Cornare tiene sus propias características demográficas, como la distribución geográfica, tipos de viviendas y composición de la población. Estos datos son fundamentales para comprender las dinámicas demográficas y sociales en cada subregión. Además, pueden ser de gran utilidad para la planificación y la toma de decisiones por parte de la Corporación en su jurisdicción.

5.1.4 Estudios de salud

Se describen los estudios con relación a la calidad del aire y sus efectos en la salud, con detalles sobre la contaminación por material particulado $PM_{2.5}$ y las consecuencias observadas en la población expuesta.

Impacto en la salud: La contaminación atmosférica se relaciona con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cerebrovasculares, especialmente en adultos mayores e infantes. Además, se ha observado un retraso en el desarrollo pulmonar en niños debido a la contaminación del aire, además de posibles daños a nivel celular y del ADN [6].

Estudios locales y soluciones: La Universidad de Antioquia ha identificado que el uso de fogones de leña en el oriente antioqueño ha causado problemas respiratorios en el 70% de las mujeres rurales. Una de las soluciones propuestas es, el programa “HUELLAS” que ha implementado estufas eficientes para reemplazar los fogones, reduciendo hasta un 95% y un 86% las emisiones de material particulado en el interior y exterior de las viviendas, respectivamente. Esto ha resultado en la reducción de emisiones de CO_2 significativas [13].

Regulación y monitoreo: Colombia establece límites permisibles para los contaminantes y utiliza el Índice de Calidad del Aire (ICA) para clasificar el estado del aire en relación con los efectos en la salud de la población. El ICA categoriza la calidad del aire en diferentes niveles, desde "Buena" hasta "Muy dañina a la salud", brindando una comprensión clara de los riesgos asociados a la contaminación atmosférica [2].

Las mediciones en estaciones como la "sede principal de Cornare" en Santuario y "OUTLET IMUSA" en Rionegro indican que la calidad del aire se mantiene mayormente dentro de los límites permisibles [32].

5.2 Campañas de monitoreo preliminar

A continuación, se describen los resultados de una campaña de monitoreo de calidad del aire en cuatro estaciones de la Corporación, del 20 de diciembre de 2022 al 31 de marzo de 2023 para las estaciones ubicadas en Marinilla y Guarne, y para La Danta y Jerusalén del 19 de diciembre de 2022 al 21 de abril de 2023, evaluando principalmente los contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$, la velocidad del viento y la precipitación.

Guarne: Esta estación se encuentra en el casco urbano y es una de las dos estaciones ubicadas en estas áreas. Es notable por registrar valores mínimos de contaminantes (PM_{10} y $PM_{2.5}$) más bajos entre las cuatro estaciones, mostrando una baja concentración de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, registró la mayor cantidad de precipitación durante el período de muestreo.

Marinilla: Al igual que Guarne, es otra estación en un área urbana. Esta estación tiene la velocidad del viento más alta entre las cuatro estaciones y registró valores promedio de la fracción total de PM_{10} y $PM_{2.5}$ más altos en ciertos meses, lo que indica una variabilidad en la concentración de contaminantes a lo largo del tiempo.

Jerusalén: Esta estación está ubicada en una zona de extracción minera. Registró el valor más alto de $PM_{2.5}$, lo que sugiere una alta concentración de este contaminante en comparación con las otras estaciones. Además, tiene velocidades de viento significativamente más bajas en promedio.

La Danta: Similar a Jerusalén, esta estación también se ubica en una zona minera. Mostró la concentración máxima de PM_{10} durante la campaña de monitoreo, excediendo en varias ocasiones los límites máximos permitidos para este contaminante. A pesar de estas concentraciones más altas, la mayoría de los días monitoreados (72.2%) presentaron un Índice de Calidad del Aire "Bueno" para PM_{10}.

En general, los valores de $PM_{2.5}$ y PM_{10} están dentro de límites permisibles. En su mayoría, los valores se clasifican como "Buena" o "Aceptable" en todas las estaciones. La Danta es la única con algunos días clasificados como "Aceptable" para PM_{10}, lo que indica algunas excedencias a la norma para ese contaminante. Por lo tanto, se señala la necesidad de monitoreo continuo y acciones específicas en esas zonas para mantener la calidad del aire en niveles seguros.

5.3 Estudio meteorológico preliminar

El estudio meteorológico preliminar se enfoca en la medición de la dirección y velocidad del viento en un período determinado. A continuación, se realiza la descripción de cada parámetro medido:

Mediciones de dirección y velocidad del viento: El estudio se basa en mediciones de la dirección y velocidad del viento en unidades estándar. La velocidad del viento se mide en metros por segundo (m/s), y la dirección del viento se mide en grados dextrorsum (sentido de las agujas del reloj) a partir del norte geográfico (0°).

Rosa de vientos: Se menciona la construcción de una rosa de vientos, que es una herramienta gráfica utilizada para visualizar la distribución de la dirección y velocidad del viento en un área específica. La rosa de vientos se divide en 16 direcciones cardinales, con una diferencia de 22,5 grados entre cada dirección.

Escala de Beaufort: Se utiliza la escala de Beaufort para caracterizar la velocidad del viento. La escala de Beaufort es una clasificación que relaciona la intensidad del viento con los efectos en el mar y la tierra. Cada nivel de la escala se asocia con un rango de velocidad del viento en metros por segundo. Por ejemplo, el nivel 0 se llama "Calma" y corresponde a velocidades de viento de 0 a 0,2 m/s, mientras que el nivel 9 se llama "Viento muy duro" y corresponde a velocidades mayores o iguales a 20,2 m/s.

5.3.1 Rosas de vientos por campañas de monitoreo

Las rosas de vientos muestran variaciones mensuales y tendencias anuales en cinco estaciones de calidad del aire, se llevaron a cabo tres campañas de monitoreo en las siguientes estaciones: San Antonio de Pereira ubicada en el Mall Comercial San Antonio en el municipio de Rionegro (para la primera y segunda campaña de monitoreo), Guarne ubicada en la Alcaldía, Marinilla en el Hospital San Juan de Dios, La Danta en la vía principal del casco urbano del corregimiento y Jerusalén ubicada en la parte central de la vía principal del corregimiento (para la tercera campaña de monitoreo). Especificando que, la primera

campaña de monitoreo midió la velocidad y dirección del viento entre el 17 de julio de 2020 y el 14 de marzo de 2021.

Estación San Antonio de Pereira (2020-2021):

- **Dirección predominante del viento:** Este (E) con 16.75% de frecuencia.
- **Velocidades predominantes:** Ventolina de 0,3-1,5 m/s y brisa muy débil de 1,5-3,0 m/s.
- **Comportamiento de la rosa de vientos diurna:** Predominio del viento desde el Este (E) con una frecuencia del 27,92%, con velocidades entre 0,3–1,5 m/s, 10,49% en un rango de 1,5– 3,0 m/s de brisa muy débil.
- **Comportamiento de la rosa de vientos nocturna:** Predominio del viento desde el Sur-Sudoeste (SSW), con una frecuencia de 8,94%, con el mayor porcentaje de velocidades en la categoría de ventolina.

Estación San Antonio de Pereira (2021-2022):

- Se presentaron algunas interrupciones en la medición de los datos recolectados.

Estación Guarne (2022-2023)

- **Dirección predominante del viento:** Sureste (SE) con 21.97% de frecuencia.
- **Velocidades predominantes:** Ventolina (53,52%), Brisa muy débil (16,46%), y Brisa débil (3,52%).
- **Comportamiento de la rosa de vientos diurna:** Mayor presencia de vientos con Brisa muy débil y velocidades menores a 0,3 m/s.
- **Comportamiento de la rosa de vientos nocturna:** Predominio de Ventolina y un alto porcentaje (46%) de vientos en calmas.

Estación Marinilla (2022-2023)

- **Dirección predominante del viento:** Este (E) con 21,64% de frecuencia.
- **Velocidades predominantes:** Ventolina (45,55%) y Vientos en calma (24,19%).
- **Comportamiento diurno y nocturno:** Mayor presencia de vientos en calmas, dirección del viento diurno Sureste (SE) y nocturno Este (E).

Estación Jerusalén (2022-2023)

- **Dirección predominante del viento:** Sur-Sudoeste (SSW) con 8,94% de frecuencia.
- **Velocidades predominantes:** Vientos en calmas (62,84%) y Ventolina (36,32%).

- **Comportamiento de la rosa de vientos diurna:** Predominio de vientos en calma y dirección predominante del viento Sur-Sudoeste (SSW).
- **Comportamiento nocturno de la rosa de vientos:** Alta frecuencia de vientos en calma, dirección predominante del viento Nor-Noreste (NNE).

Estación La Danta (2022-2023)

- **Dirección predominante del viento:** Noreste (NE) con 10,18% de frecuencia.
- **Velocidades predominantes:** Ventolina (46,57%) y Vientos en calma (51,85%).
- **Comportamiento de la rosa de vientos diurna:** Dirección predominante del Este-Sudeste (ESE) y 21,84% de vientos en calma
- **Comportamiento nocturno de la rosa de vientos:** Dirección predominante es Noreste (NE) y el 81,85% de vientos en calma.

En consecuencia, se muestran las rosas de vientos mensuales de las estaciones de monitoreo, es importante notar que la disponibilidad de datos varía de un año a otro. Se mencionan los años 2020, 2021, 2022 y 2023 y las limitaciones en la disponibilidad de datos, como la falta de datos en ciertos meses.

5.3.2 Rosas de vientos mensuales

A continuación, se proporciona una descripción de las rosas de vientos mensuales por cada estación de monitoreo y se destaca la limitación en la representación gráfica de las rosas de vientos debido a la falta de datos en ciertos meses y años.

Estación San Antonio:

- Los datos disponibles para esta estación varían a lo largo de los años, de abril a julio de 2020 y 2021 no se realizaron mediciones y tampoco se tienen datos para el año 2022.
- En agosto se puede observar que, la dirección predominante es Este-Noreste (ENE), y la mayoría de las velocidades del viento están en el rango de 0,3-1,5 m/s.
- En febrero y marzo, la dirección predominante es Sureste (SE), con velocidades predominantes en el rango de "ventolina" (0,3-1,5 m/s).
- Para los demás meses (enero, septiembre, octubre, noviembre y diciembre), la dirección predominante es el Este (E).

Estación Guarne:

- Al igual que en San Antonio, hay una falta de datos en varios meses a lo largo de los años. La falta de datos en los meses entre abril y octubre limita la representación gráfica de las rosas de vientos.

- La dirección predominante en los meses de enero, febrero y marzo es Sureste (SE), con velocidades predominantes en el rango de 0,3-1,5 m/s.
- En noviembre y diciembre, nuevamente predomina el viento del Sureste (SE) con altas velocidades de "ventolina."

Estación Marinilla:

- El año 2021 presenta problemas significativos con datos faltantes y registros inconsistentes en la velocidad y dirección del viento. Por tal motivo, se ha excluido este año en el análisis.
- Las direcciones predominantes en enero y diciembre son Este (E), con velocidades predominantes en el rango de "ventolina" (0,3-1,5 m/s).
- En febrero y marzo, la dirección predominante es Sureste (SE), y se observan rangos de velocidad de “brisa débil” para febrero con mayor porcentaje (3,0–5,3 m/s) y en marzo obtuvo el rango de “brisa muy débil”.

Estación Jerusalén:

- Al igual que en otras estaciones, los datos faltan en varios meses. Sobre todo, se descantan en los meses entre mayo y octubre.
- En enero, las direcciones predominantes son Nor-Noroeste (NNW) y Noreste (NE).
- En noviembre, la dirección predominante es Noroeste (NW), y solo se registran velocidades en el rango de "ventolina."
- En diciembre, predominan las direcciones del Nor-Noreste (NNE), con velocidades de "ventolina."
- En los meses de febrero, marzo y abril, prevalece la dirección del viento Sur-Sudoeste (SSW) con velocidades en el rango de "ventolina."

Estación La Danta:

- Similar a las demás estaciones, hay falta de datos en varios meses. La falta de datos entre mayo y octubre se destaca.
- En enero, febrero y abril, la dirección predominante es Noreste (NE).
- En marzo, la dirección predominante es Este-Sureste (ESE).
- En noviembre, la dirección predominante es Este (E).
- En diciembre, predominan las direcciones del Este-Noreste (ENE).
- Todos los meses predominaron las velocidades en el rango de "ventolina."

5.3.3 Tendencias de vientos anuales

A continuación, se proporciona una descripción de la tendencia de vientos anuales por cada estación de monitoreo, cabe resaltar que, la disponibilidad de datos varía entre estaciones

y años, los datos faltantes y problemas de calidad en algunos años afectan la interpretación precisa de las tendencias.

Estación San Antonio:

Para San Antonio se tiene la siguiente disponibilidad de datos:

- 2020: 97,76%
- 2021: 99,16%
- 2022: 20,57%

En tendencias anuales se presentaron, poca variación en vientos en calma con valores de 27,55% para el año 2020 y 27,37% para 2021. "Ventolina" y "brisa muy débil" muestran pequeñas diferencias, siendo mayor en el año 2021. Además, se presentó una gran variación en 2022 debido a bajo porcentaje de datos disponibles.

Estación Guarne:

Para Guarne se tiene la siguiente disponibilidad de datos:

- 2021: 100%
- 2022: 99.79%
- 2023: 99.12%

En donde se presentaron alta disponibilidad de datos, ofreciendo confianza en las tendencias anuales. La categoría "Ventolina" (0.3-1.5 m/s) predomina entre los rangos de 55 a 58%, seguido de vientos en calma (<0.3 m/s).

Estación Marinilla:

Para Marinilla se tiene la siguiente disponibilidad de datos:

- 2022: 92.20%
- 2023: 99.91%

En esta estación los datos del 2021 no fueron utilizados debido a problemas con datos faltantes y duplicados, sin embargo, se muestran tendencias interesantes en 2022 y 2023. Se presentó mayor presencia de "brisa débil" (3.0-5.3 m/s) en 2022 y "ventolina" predominó en 2023.

Estación Jerusalén:

Para Jerusalén se tiene la siguiente disponibilidad de datos:

- 2021: 96.13%
- 2022: 70.37%
- 2023: 99.36%

En tendencias anuales se presentaron, vientos de calma (<0.3 m/s) predominan entre el 67,71% para el año 2021 y el 62.84% para el 2023. Además, "Ventolina" (0.3-1.5 m/s) también fue relevante con una frecuencia de 28% y 36%.

Estación La Danta:

Para La Danta se tiene la siguiente disponibilidad de datos:

- 2021: 89.80%
- 2022: 66.59%
- 2023: 99.51%

En donde se tiene menor disponibilidad de datos en 2022 y se presentó una tendencia anual predominante de vientos de calma y una mayor presencia de "brisa muy débil" para el 2023.

5.3.4 Tendencias de precipitación anual

A continuación, se describe cada estación en la que se observan patrones distintivos en la precipitación a lo largo de los años (2020-2023), con variaciones en picos y valores bajos en diferentes momentos [33].

Estación San Antonio:

Se observan registros entre agosto y diciembre del año 2020, en donde se presentaron picos altos a finales de octubre y noviembre y septiembre fue el mes con mayor precipitación acumulada. Para el 2021 y 2022 presenta picos notables en el mes de noviembre y abril, respectivamente. Para el 2023 las mediciones se hicieron entre enero y octubre, con picos más altos en febrero y marzo.

Estación Guarne:

Se observan mediciones solo en noviembre y diciembre del 2021, con valores bajos respecto a otras estaciones. Para el 2022 se tienen registros en enero, febrero, marzo y diciembre con los valores más bajos de precipitación. En el 2023 presentó mediciones entre enero y marzo con picos más altos en marzo, siendo una de las estaciones con mediciones limitadas y con la de menor precipitación acumulada.

Estación La Danta:

Se observan altos niveles de precipitación en noviembre y diciembre de 2021. En 2022 y 2023, mantuvieron picos altos en febrero y marzo, indicando una tendencia similar en patrones de alta precipitación.

Estación Jerusalén:

Se observan altos niveles de precipitación en noviembre y diciembre de 2021. En 2022 se presentaron los picos más altos en abril y en 2023 se muestran en marzo. Al igual que, en la estación de La Danta se presentan similitudes en su comportamiento de alta precipitación en noviembre-diciembre y febrero-marzo en los años analizados.

Estación Marinilla:

Se observan altos niveles de precipitación en noviembre de 2021, en 2022 presenta los mismos valores de las demás estaciones en marzo y finalmente, en 2023 se observan altos niveles de precipitación, mostrando un comportamiento similar al de Guarne con picos notables en ese mes.

5.3.5 Condiciones meteorológicas

A continuación, se realiza un análisis de las variables de temperatura vs humedad relativa, presentadas en cada estación de las campañas de monitoreo preliminar ejecutadas por la Corporación:

Alcaldía de Guarne:

La temperatura comienza a disminuir en enero, alcanza su máximo valor en marzo (26-28°C). Mientras que, la humedad relativa asciende desde enero y alcanza su máximo en marzo (95-97%).

Hospital de Marinilla:

La temperatura aumenta gradualmente en febrero, alcanza su pico a finales de febrero/principios de marzo (20-21°C). Mientras que, la humedad relativa disminuye en febrero, luego asciende hasta marzo (77-90%).

Jerusalén:

La temperatura desciende gradualmente, con mínimos en febrero, marzo y abril (22-23°C). Mientras que la humedad relativa disminuye en enero y febrero (80%), alcanza su máximo en abril (95%).

La Danta:

La temperatura se mantiene constante entre 26-27°C, con mínimo en abril (23°C) y pico en marzo (29°C). Mientras que, la humedad relativa disminuye en febrero (77%), con máximos en enero y marzo (hasta 93%).

5.3.6 Quejas asociadas al recurso aire

Según las quejas asociadas al recurso aire reportadas en la base de datos de la Corporación, abarcan preocupaciones diversas, desde emisiones de humo hasta actividades de construcción y contaminación específica del aire. Esta distribución muestra una variedad de problemas asociados al aire en diferentes áreas y se distribuyen de la siguiente manera en 3 subregiones de Cornare:

Valles de San Nicolás:

- 6 quejas en total.
- 3 quejas por generación de humo en Guarne, El Retiro y Marinilla.
- 2 quejas por actividades de construcción (corte de baldos y carpintería) en El Retiro y Rionegro.
- 1 queja en Guarne relacionada con la preocupación por la construcción de chimeneas.

Bosques:

- 2 quejas relacionadas con la contaminación del aire y su dispersión.

Porce-Nus:

- 1 queja relacionada con la quema de amalgama.

5.4 Inventario de emisiones

5.4.1 Fuentes fijas puntuales

A partir de la Figura 8 donde se muestra donde confluyen los diferentes tipos de sectores productivos se puede inferir que la subregión Valles de San Nicolás es la que más empresas con fuentes fijas puntuales tiene en el territorio asociado al sector OTR relacionado con emisiones de dióxido de azufre (SO_2), sin embargo, también tiene otros sectores productivos que se desempeñan en la región y que favorecen a la emisión de VOC's como el sector BAT (Bebidas, alimentos y tabaco), el sector Químico (QMC) y el sector Textil (TXT). El sector BAT, genera en mayor medida emisiones de VOC's, al igual que el sector

QMC y TXT, esto justifica el resultado de la Figura 10 donde se evidencia que el Valle de San Nicolás emite en mayor medida VOC's. Por su parte, Páramo y Bosques tienen menos empresas que posean fuentes fijas puntuales representando en su mayoría al sector productivo CVL (cerámicos, vitreos y ladrillos), el contaminante que más emisiones genera en ese sector es el SO_2 (dióxido de azufre), sin embargo, la subregión Páramo tiene asociado a su vez una cantidad considerable de emisiones de Material Particulado debido a las actividades asociadas a fuentes difusas, equipos de trituración y molienda. Por último, en Porce-Nus solo hay una empresa con 2 fuentes fijas puntuales del sector Químico (QMC) y debido a su tipo de proceso sus emisiones están asociadas al dióxido de azufre (SO_2), aunque el sector QMC se asocie generalmente a emisiones de VOC's (ver Tabla 1Tabla 6).

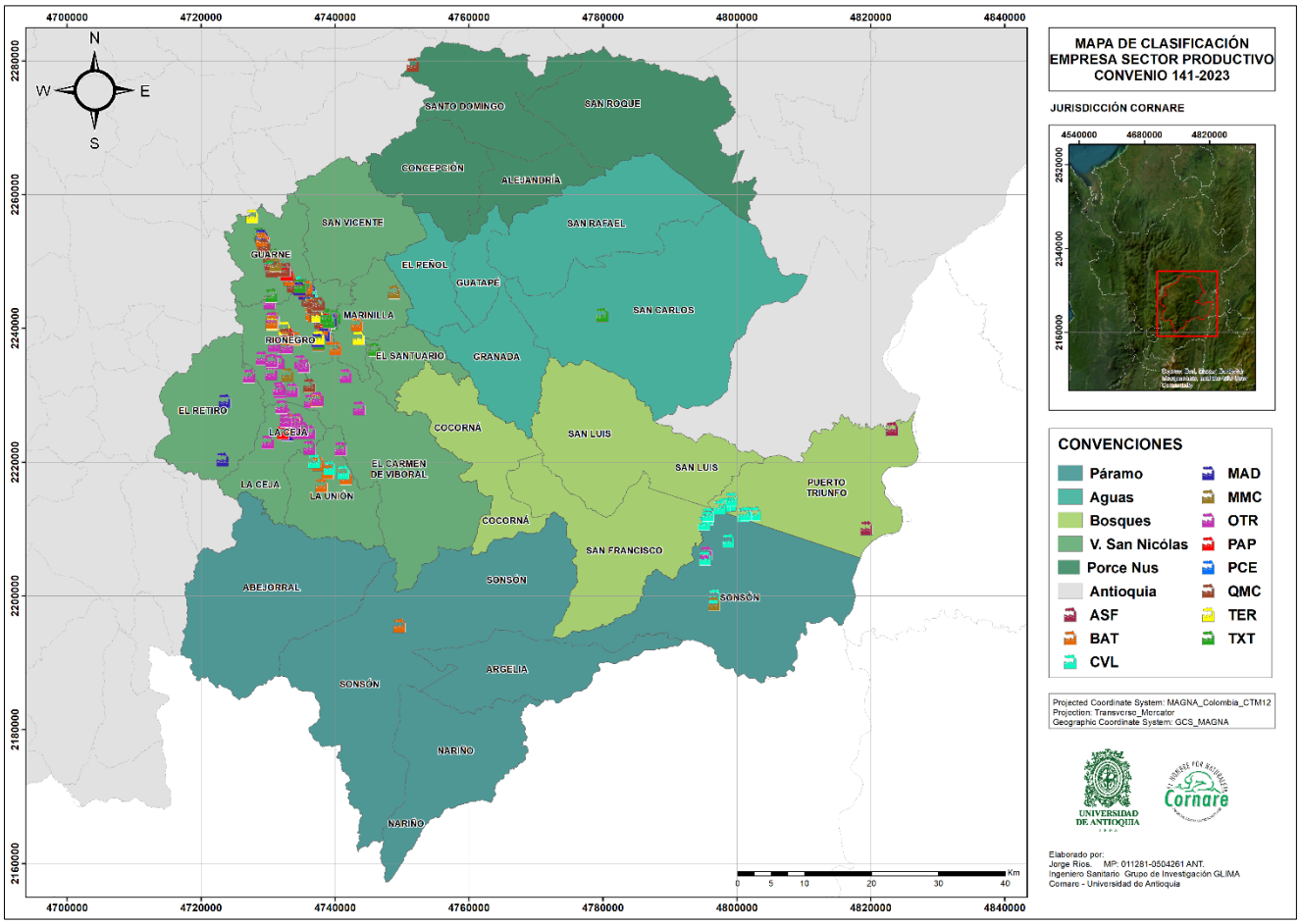


Figura 8. Empresas con fuentes fijas puntuales y su sector productivo por subregión

Subregión	Sectores productivos											
	ASF	BAT	CVL	MAD	MMC	OTR	PAP	PCE	QMC	TER	TXT	Total
Bosques	2		11		1	1						15
Páramo		1	2									3
Porce-Nus									1			1
Valles De San Nicolás	1	28	7	16	12	34	9	1	23	9	17	157
Total	3	29	20	16	13	35	9	1	24	9	18	177

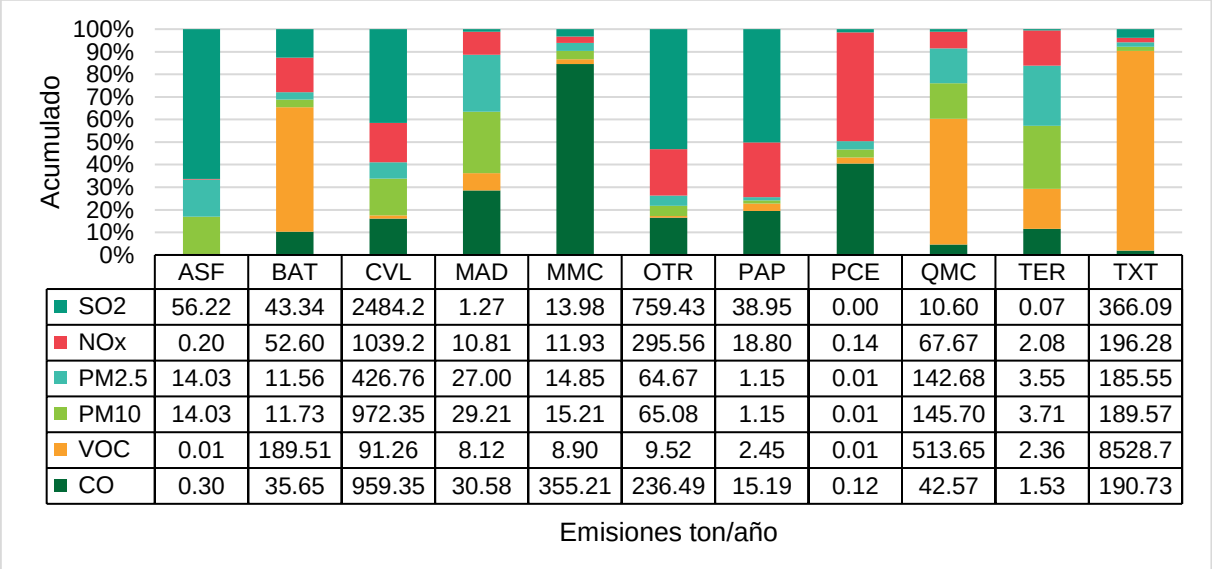
Tabla 6. Número de empresas según su sector productivo por subregión

Contaminantes criterio

En cuanto la cantidad de emisiones de contaminantes según el tipo de sector productivo se tiene que:

- **ASF (producción de asfaltos):** el contaminante que genera mayores emisiones para este sector productivo es el **dióxido de azufre** con el 70% de las emisiones que se dan en este sector productivo, seguido del material particulado, tanto grueso como fino.
- **BAT (bebidas, alimentos y tabaco):** para este sector productivo, los **compuestos orgánicos volátiles** presentan las emisiones más elevadas de los contaminantes emitidos, conformando el 50% de las emisiones generadas, seguido de los óxidos de nitrógeno.
- **CVL (cerámicos, vítreos y ladrilleras):** para el sector productivo de cerámicos, vitreos y ladrillos el contaminante que tiene los niveles de emisión más alto es el **dióxido de azufre**, con un 40% de las emisiones totales del sector, esto se debe a que para este sector se cuenta con varios equipos como hornos y secaderos que en el proceso de secar los minerales no metálicos generan altos contenidos de dióxido de azufre. El segundo contaminante más emitido es el óxido de nitrógeno.
- **MAD (madera):** para el sector de maderas, el contaminante que tiene las emisiones más altas es el **monóxido de carbono**, conformando casi el 30% de las emisiones del sector, seguido por el material particulado, tanto el material fino como el grueso.
- **MMC (metalurgia):** en el sector de la metalurgia, el contaminante más emitido es el **monóxido de carbono**, conformando el 80% de las emisiones totales del sector.
- **OTR (no cuentan con una clasificación):** dentro de las actividades productivas que no cuentan con una clasificación dentro del inventario, se tiene que el contaminante criterio más emitido es el **material particulado fino**, conformando el 60 % de las emisiones, seguido por los óxidos de nitrógeno.

- **PAP (producción de papel):** en el sector de producción de papel, los contaminantes que más se emiten son el **dióxido de azufre** con aproximadamente el 50% de las emisiones generadas en este sector, seguido del óxido de nitrógeno.
- **PCE (producción de plásticos):** en el sector de producción de plásticos, los contaminantes más emitidos son el **monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno**.
- **QMC (químico):** para el sector químico, los **compuestos orgánicos volátiles** presentan los niveles más altos de emisiones con aproximadamente el 50% de las emisiones. Seguido del material particulado.
- **TER (sector terciario):** con respecto al sector terciario, el contaminante más emitido es el **material particulado, tanto grueso como fino**.
- **TXT (Textil):** para el sector textil, los **compuestos orgánicos volátiles** presentan los niveles más altos de emisión en el sector, conformando el 85% de las emisiones.



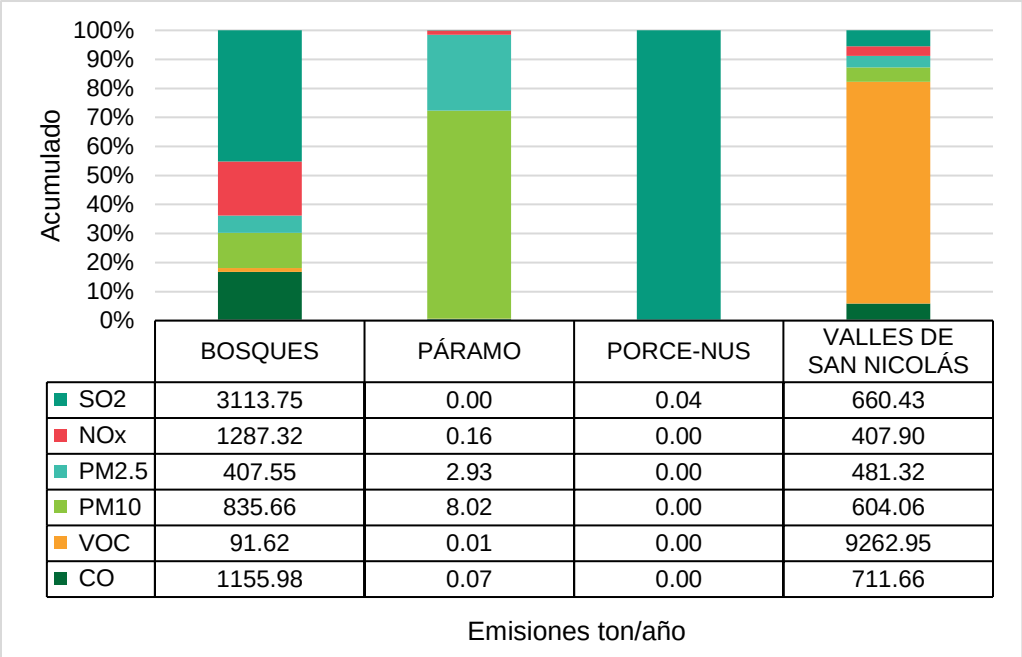
	ASF	BAT	CVL	MAD	MMC	OTR	PAP	PCE	QMC	TER	TXT
SO2	56.22	43.34	2484.2	1.27	13.98	759.43	38.95	0.00	10.60	0.07	366.09
NOx	0.20	52.60	1039.2	10.81	11.93	295.56	18.80	0.14	67.67	2.08	196.28
PM2.5	14.03	11.56	426.76	27.00	14.85	64.67	1.15	0.01	142.68	3.55	185.55
PM10	14.03	11.73	972.35	29.21	15.21	65.08	1.15	0.01	145.70	3.71	189.57
VOC	0.01	189.51	91.26	8.12	8.90	9.52	2.45	0.01	513.65	2.36	8528.7
CO	0.30	35.65	959.35	30.58	355.21	236.49	15.19	0.12	42.57	1.53	190.73

Emisiones ton/año

Figura 9. Contaminantes criterio por sector productivo.

Sin embargo, al observar la Figura 10 donde se evidencian los contaminantes emitidos por subregiones, Bosques y Porce-Nus emiten en mayor medida dióxido de azufre (SO_2), por su parte la subregión Páramo tiene sus mayores emisiones asociadas a Material Particulado, en mayor proporción emisiones de PM_{10} seguido de $PM_{2.5}$, y por último, la subregión Valles de San Nicolás en mayor medida emite VOC's.

- **Valles De San Nicolás:** en esta territorial los **compuestos orgánicos volátiles (VOC's)** presentan los niveles más altos de emisiones a la atmósfera, con el 76,37 % de las emisiones totales generadas en esta subregión, debido a que en esta subregión se presentan fuentes asociadas al sector textil y de bebidas y alimentos, por lo que se genera, en su mayoría, emisiones de compuesto orgánicos volátiles.
- **Bosques:** para esta territorial se tiene que las emisiones de **dióxido de azufre** son las más elevadas, puesto que conforman el 45,18 % de las descargas atmosféricas de esta subregión.
- **Páramo:** las emisiones más altas en esta subregión corresponden al **material particulado grueso** (**PM_{10}**), dado que, en esta subregión se ubican empresas enfocadas al procesamiento de minerales no metálicos, por lo que se encuentran diversos equipos de trituración y molienda. El porcentaje de material particulado emitido corresponde al 71,67% de las emisiones de la subregión.
- **Porce-Nus:** esta subregión presenta las emisiones más bajas, ya que solo emite **dióxido de azufre** que se generan en dos fuentes asociadas a la misma empresa del sector químico.
- **Aguas:** esta subregión no cuenta con fuentes fijas.



	BOSQUES	PÁRAMO	PORCE-NUS	VALLES DE SAN NICOLÁS
SO2	3113.75	0.00	0.04	660.43
NOx	1287.32	0.16	0.00	407.90
PM2.5	407.55	2.93	0.00	481.32
PM10	835.66	8.02	0.00	604.06
VOC	91.62	0.01	0.00	9262.95
CO	1155.98	0.07	0.00	711.66

Emisiones ton/año

Figura 10. Emisiones de contaminantes criterio para todas las subregiones.

Gases de Efecto Invernadero

En relación con las emisiones de gases de efecto invernadero se tiene que la subregión Aguas no posee fuentes fijas con estimación de emisiones atmosféricas debido a que la única empresa que cuenta con fuentes fijas puntuales aún no presenta información técnica que posibilite la estimación de emisiones a la atmósfera. La subregión Porce-Nus no presenta emisiones de gases de efecto invernadero debido a que solo emite dióxidos de azufre en muy baja proporción. Mientras que, en la subregión Páramo se emitieron 203,65 ton/año de dióxido de carbono, seguido de Bosques que presentó una emisión de 449.974,07 ton/año y finalmente, Valles de San Nicolás presentó los niveles más altos de emisión de CO_2 con un total de 255.027,49 ton/año.

De forma general, el dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero que más se emite debido a las actividades antrópicas que se llevan a cabo en la jurisdicción de la Corporación. Sin embargo, en cuanto a las emisiones de metano (CH_4), Bosques genera el mayor aporte a la atmósfera con 37,16 ton/año seguido de Valles de San Nicolás con 19,74 ton/año, mientras que para las emisiones de óxido nitroso (N_2O) Valle de San Nicolás es la subregión con mayores emisiones con 9,40 ton/año mientras que Bosques emite 6,47 ton/año.

5.4.2 Fuentes fijas de área

Las fuentes fijas de área que se evalúan en el presente inventario son aquellas relacionadas con las estaciones de servicio de combustible, las cuales, a su vez, son fuentes fijas evaporativas, ya que aportan principalmente compuestos orgánicos volátiles (COV) a la atmósfera**.** La estimación de las emisiones de estos compuestos se realizó mediante el uso de factores de emisión y de la información de los litros de combustible líquido vendido, y dado que, las emisiones dependen directamente del volumen de combustible vendido, los municipios que presentan mayor número de ventas son aquellos que presentan los niveles más elevados de emisión de compuestos orgánicos volátiles.

- **Aguas**

En esta subregión, el municipio de Puerto Triunfo presenta el mayor volumen de combustible líquido vendido, por lo tanto, presenta las emisiones más altas de compuestos orgánicos volátiles, emitiendo para el 2022 un total de 16,75 toneladas. Guatapé por su parte es el segundo municipio con las emisiones más altas, aportando 11,54 toneladas de compuestos orgánicos volátiles en 2022.

- **Bosques**

Para esta subregión, el municipio El Peñol presenta el mayor volumen de combustible líquido vendido, por lo tanto, presenta las emisiones más altas de compuestos orgánicos volátiles, emitiendo para el 2022 un total de 18,82 toneladas. San Luis por su parte es el segundo municipio con las emisiones más altas de la subregión, aportando 7,79 toneladas de compuestos orgánicos volátiles en 2022.

- **Páramo**

En la subregión Páramo, el municipio de Sonsón presenta el mayor volumen de combustible líquido vendido, por lo tanto, presenta las emisiones más altas de compuestos orgánicos volátiles, emitiendo para el 2022 un total de 9,50 toneladas. Abejorral por su parte es el segundo municipio con las emisiones más altas, aportando 3,43 toneladas de compuestos orgánicos volátiles en 2022.

- **Porce-Nus**

En Porce -Nus, el municipio de San Roque presenta el mayor volumen de combustible líquido vendido, por lo tanto, presenta las emisiones más altas de compuestos orgánicos volátiles, emitiendo para el 2022 un total de 3,90 toneladas. Santo Domingo por su parte es el segundo municipio con las emisiones más altas, aportando 2,03 toneladas de compuestos orgánicos volátiles en 2022.

- **Valles De San Nicolás**

En esta subregión, el municipio de Rionegro presenta el mayor volumen de combustible líquido vendido, por lo tanto, presenta las emisiones más altas de compuestos orgánicos volátiles, emitiendo para el 2022 un total de 142,17 toneladas. Guarne por su parte es el segundo municipio con las emisiones más altas, aportando 64,52 toneladas de compuestos orgánicos volátiles en 2022 (ver Figura 11).

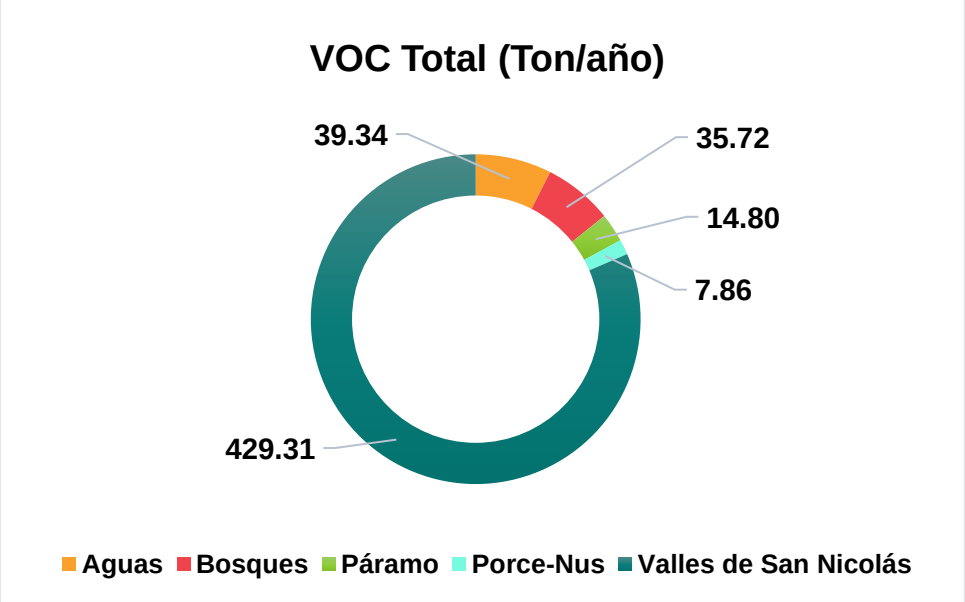


Figura 11. Emisión total de compuestos orgánicos volátiles por subregión de la corporación. Enmarcado en el convenio 141-2023

5.4.3 Fuentes difusas o dispersas

Se realiza la descripción de los resultados de fuentes fijas dispersas por cada subregión que se obtuvo durante el inventario de emisiones:

Valles de San Nicolás

Se identificaron 19 empresas de fuentes fijas dispersas, a las que se les hizo estimación detallada de emisiones solo a 5 empresas. La actividad minera en esta subregión es principalmente en materiales de construcción (69%). Finalmente, se tiene que el municipio de La Unión posee mayor cantidad de empresas (8) para esta subregión y Rionegro presenta valores elevados debido a su actividad productiva con triturados, obteniendo, como resultado emisiones altas de material particulado asociadas a sectores como cerámicos, vítreos, etc.

Bosques

Se identificaron 6 empresas de fuentes fijas dispersas, de las cuales solo a 4 empresas se les realizó la estimación detallada de emisiones. Al igual que los municipios de Valles de San Nicolás, Puerto Triunfo presenta niveles altos de emisiones debido a su actividad en los mismos sectores productivos.

Páramo

Se identificaron 12 empresas de fuentes fijas dispersas, de las cuales solo 5 empresas diligenciaron el formulario enviado para la estimación detallada de emisiones. En esta subregión se obtuvo el mayor registro de minería de materiales no metálicos (46%). Finalmente, se tiene que el municipio de Sonsón posee la mayor cantidad de empresas (9) para esta subregión y concentra la cantidad más elevada de emisiones de material particulado, comparada con las demás subregiones.

Porce-Nus

Se identificó 1 empresa que posee fuentes fijas dispersas, debido a que, la mayoría de las empresas son de extracción de oro y no se tiene una metodología de estimación de emisiones.

Aguas

Se identificaron 2 empresas de fuentes fijas dispersas, de las cuales solo a 1 empresa se les realizó la estimación de emisiones.

En conclusión, se tiene que el mayor número de empresas se encuentran los municipios de Sonsón, La Unión y Rionegro y para la categoría de cerámicos, vítreos, ladrilleras, alfareras y tejares (CVL) se tienen el mayor número de empresas (24), cabe resaltar que, la estimación detallada de emisiones solo se logró para un porcentaje bajo de empresas (37%), lo que limita la visión completa de las emisiones en la región.

Las fuentes difusas están localizadas en mayor medida en las subregiones Páramo, Valles de San Nicolás y Bosques seguido de Aguas y por último Porce-Nus, la subregión con menor área con fuentes difusas (ver Figura 12). Es importante tener en cuenta que las fuentes difusas en general están asociadas al Material Particulado.

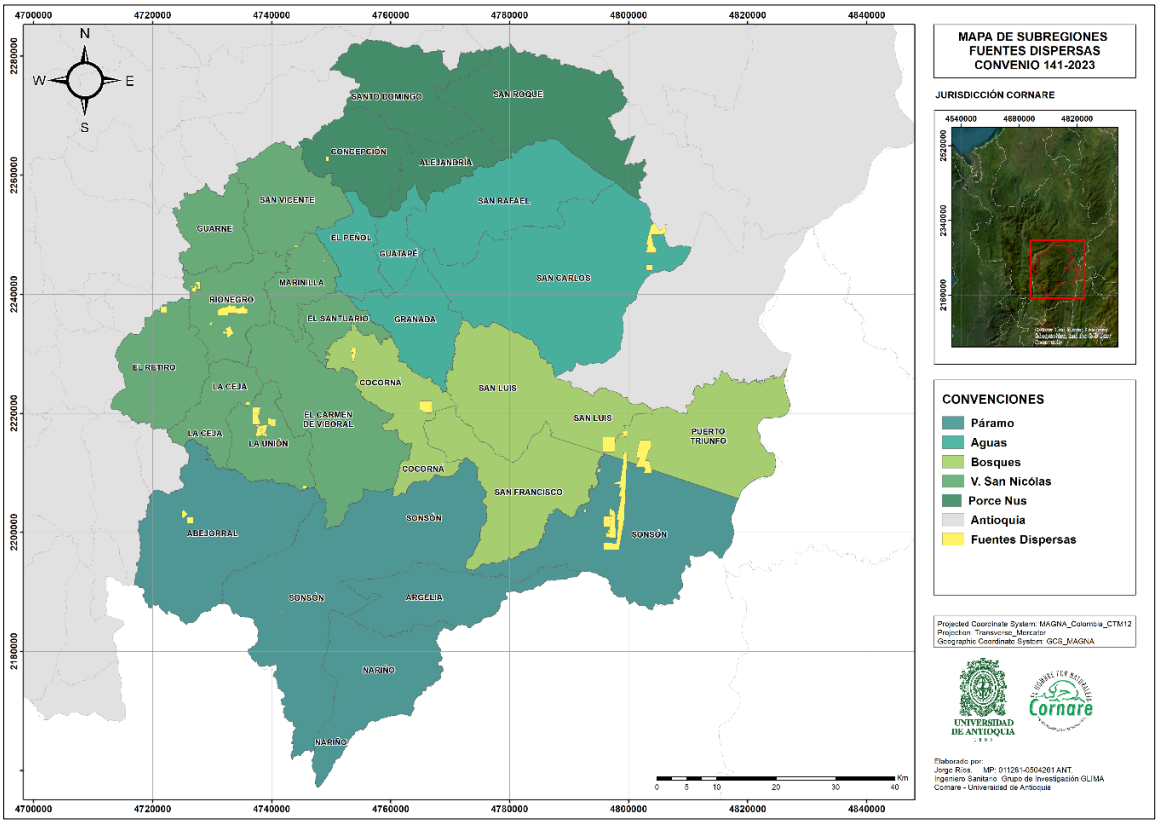


Figura 12. Empresas con fuentes difusas por subregión

Por último, tenemos el mapa consolidado con fuentes fijas puntuales y fuentes difusas que la subregión Valles de San Nicolás tiene una gran participación en los dos tipos de fuentes de emisión, por su parte una porción de la subregión Bosques y Páramo también tienen una participación significativa en contraste con las otras subregiones (ver Figura 13).

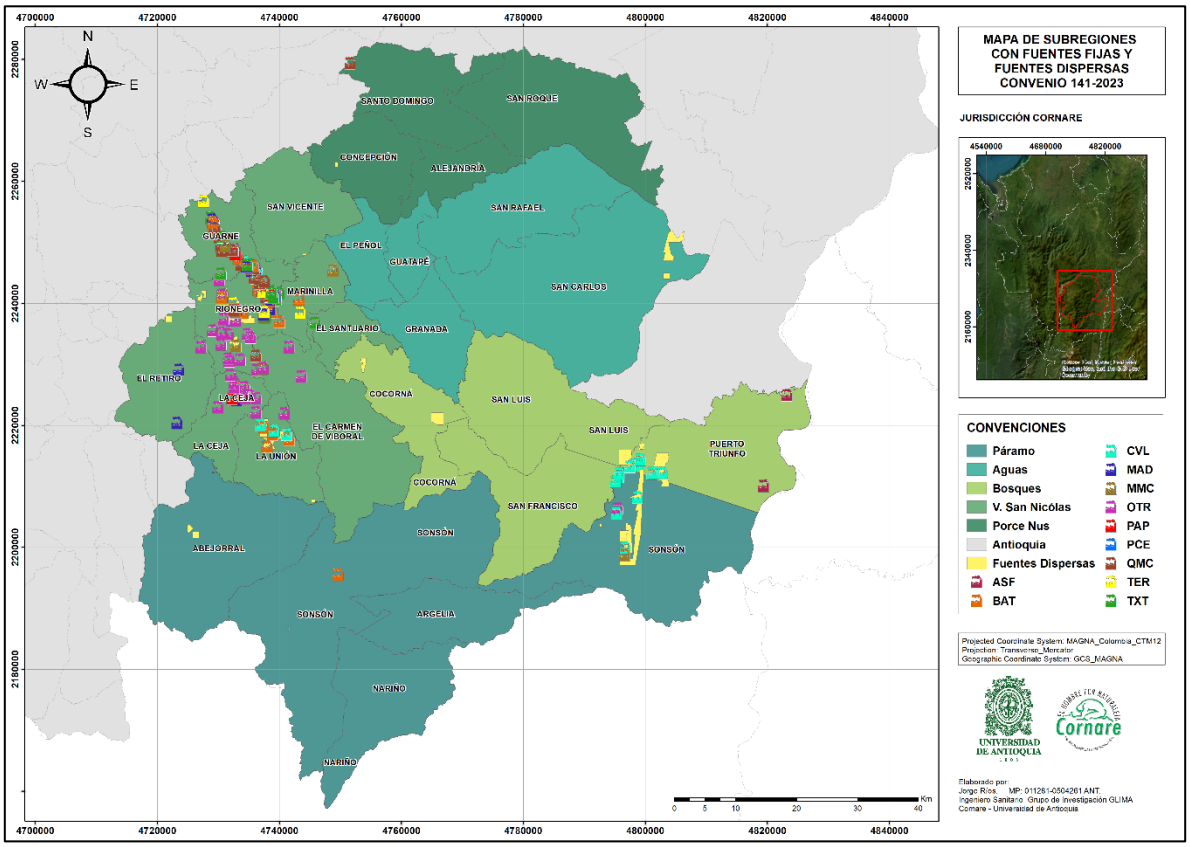


Figura 13. Empresas con fuentes fijas puntuales y fuentes difusas por subregión

5.4.4 Fuentes móviles

Las estimaciones de las emisiones de fuentes móviles se realizaron tomando como referencia las vías principales de la jurisdicción de la corporación (Puerto Triunfo - Bello y Sonsón – Medellín, abarcando las subregiones Valles de San Nicolás, Páramo y Bosques) y el tránsito promedio diario dado por 9 tramos en estas vías. Además, solo se incluyeron las emisiones generadas por vehículos diseñados para transitar en vías públicas, ya sea para transporte de carga o de pasajeros y se hizo uso de información de peajes y aforos elaborados por INVÍAS.

Los 9 tramos evaluados fueron: Medellín – Las Palmas, Las Palmas – Rionegro, Santuario – La Piñuela, Palmas – Escobero, Marinilla – Rionegro, Marinilla – Santuario, Acevedo – Guarne, Te de Aeropuerto – Marinilla, Guarne – Te de Aeropuerto. De estos tramos, el primero fue el que presentó el tránsito promedio diario más elevado, con un total de 43.189 vehículos diarios en promedio.

Se estima que alrededor del 80% de las emisiones totales de contaminantes criterio son de óxidos de nitrógeno (NOx), el 16% de monóxido de carbono (CO) y el 2% de Compuestos orgánicos volátiles (VOC), en menor proporción se encuentra el material particulado (PM) y óxidos de azufre (SOx) con aportes menores y cercanos al 1% de la emisión total regional estimada.

Por otro lado, los tramos Guarne – Te de Aeropuerto y Te Aeropuerto – Marinilla presentaron las emisiones más altas, descargando a la atmósfera aproximadamente 50.000 ton/año de contaminantes criterio cada tramo.

En relación con las emisiones de gases de efecto invernadero, se emiten 2.824.967 ton equivalentes de dióxido de carbono en todos los tramos de vía. Además, Se estima que las emisiones de Metano (CH_4) y Óxido nitroso (N_2O) totalizaron 158 ton/año de CH_4 y 264 Ton/año de NO_2.

Con respecto al tipo de combustible utilizado en los vehículos, se tiene que los motores que utilizan gasolina como combustible emiten el 51% de las descargas de gases de efecto invernadero, mientras que los vehículos cuyos motores funcionan a Diesel emitieron el 49% restante.

5.5 Modelación preliminar

La modelación de dispersión de los contaminantes se realizó con el siguiente dominio: la subregión de Valles de San Nicolás, la cual incluye los municipios de San Vicente, Guarne, Marinilla, Rionegro, El Retiro, La Ceja y El Carmen de Viboral, también se ha considerado la zona de La Calera, compuesta por Puerto Triunfo y Sonsón; y el municipio de La Unión, que por sus dinámicas sociales y climáticas se ha decidido modelar de forma independiente al Valle de San Nicolás, estos puntos fueron elegidos debido a que son los que tienen el mayor número de fuentes fijas que generan emisiones atmosféricas.

Dentro del inventario de emisiones atmosféricas año base 2022 de CORNARE se estimaron diversos grupos y especies de contaminantes, sin embargo, para la modelación de dispersión de contaminantes se seleccionaron únicamente los siguientes contaminantes criterio: dióxidos de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), material particulado grueso (PM_{10}), material particulado fino primario y secundario ($PM_{2.5}$) y partículas suspendidas totales (PST).

La meteorología utilizada para correr el modelo se dividió en nueve puntos estratégicos, en el presente informe se presenta el ciclo anual y horario de la velocidad del viento, sin

embargo, en el informe de la modelación se pueden revisar datos como: ciclo anual y horario de temperatura, precipitación y la capa límite planetaria (PBL).

Para el ciclo anual de la velocidad del viento, entre todos los puntos, el municipio de Rionegro es el que evidencia un comportamiento de la velocidad del viento creciente durante el año con un valor promedio de 4,1 m/s. Por su parte los municipios de La Ceja, El Carmen de Viboral y La Unión presentan dos picos marcados con unos máximos de 2,5 m/s, 2,8 m/s y 3 m/s respectivamente. Cocorná y La Danta presentan su velocidad más alta en julio con 2,4 m/s y 2,1 m/s correspondientemente. En Puerto Triunfo presenta los valores más altos en mayo y julio, y para Guarne los valores más altos fueron registrados en enero, marzo, noviembre y diciembre alrededor de 2,5 m/s. Finalmente, Marinilla presenta los valores más altos en abril, septiembre y noviembre alrededor de 2 m/s.

Para el ciclo horario de la velocidad del viento, el municipio de Rionegro y Marinilla presentan un pico pronunciado con un valor máximo de 2,6 m/s y 3 m/s respectivamente, ambos a las 3 de la tarde. Por su lado, La Ceja, El Carmen de Viboral, La Unión y Cocorná presentan tres picos marcados con unos valores máximos de 2,5 m/s (a las 2 de la tarde en La Ceja), 3 m/s (a las 6 de la tarde en El Carmen de Viboral), 4 m/s (a las 6 de la tarde en La Unión) y 2,8 m/s (a las 5 de la mañana en Cocorná). Por último, La Danta, Puerto Triunfo y Guarne presentan sus valores máximos en horas de la noche con 2,3 m/s, 3,3 m/s y 3,5 m/s respectivamente entre 6 y 7 de la noche.

5.5.1 Recomendaciones

- El dominio del Valle de San Nicolás y la Zona de La Calera presentan comportamientos diferenciados, en el dominio del Valle de San Nicolás las concentraciones más altas están dominadas por las fuentes fijas, mientras que en el dominio de la Zona de La Calera las concentraciones más altas están dominadas por la vía La Danta y las fuentes de área.
- Para la zona de las Caleras las principales fuentes aportantes de material particulado corresponden a las fuentes de área asociadas a la minería, con contribuciones altas cerca de las fuentes, mientras que las fuentes fijas presentan contribuciones menores, sin embargo, estas últimas pueden presentar aportes a largas distancias mientras que los aportes de las fuentes de área decaen rápidamente cerca de las fuentes.
- La implementación de acciones dirigidas a mitigar las emisiones de SO_2, especialmente en el municipio de Sonsón y sus zonas circundantes, se presenta

como una medida crítica para salvaguardar la salud pública y mejorar la calidad del aire en la región.

6 DISEÑO DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

Para conocer el tamaño de la población e iniciar con el diseño del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) fue necesario verificar el último reporte brindado por el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) y se encontró que para el año 2018 había 723.553 habitantes en la jurisdicción de Cornare según el Censo Nacional de Población y Vivienda [7]. Lo anterior con el fin de identificar el tipo de SVCA que le corresponde a la Corporación, cumpliendo con el criterio de tener entre 500.000 y 1.500.000 de habitantes el tipo de sistema que se debe diseñar es el Tipo III: Intermedio (Ver figura 3).

6.1 Escala, objetivos y tipo de SVCA

Para el diseño del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), fue necesario establecer la escala de monitoreo, donde identificamos que los 26 municipios de la jurisdicción tienen áreas rurales y urbanas, y está conformada por un área de 827.600 hectáreas, lo que equivale a 8276 km^2, por lo anterior el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) para la jurisdicción de la Corporación tendrá una escala de monitoreo regional.

Posteriormente se definieron los objetivos para el sistema de vigilancia, teniendo en cuenta que un SVCA puede tener uno o varios objetivos conforme a sus problemáticas identificadas. Los objetivos deben plantearse en coherencia con la disponibilidad técnica y económica de la Corporación, de acuerdo con esto los objetivos pueden ser planteados a corto, mediano y largo plazo. Los objetivos del SVCA en la jurisdicción de la Corporación serán los siguientes:

1. Determinar el cumplimiento de las normas nacionales de la calidad del aire.
2. Observar las tendencias a mediano y largo plazo.
3. Evaluar el riesgo para la salud humana.
4. Activar los procedimientos de control en episodios de contaminación.

De acuerdo con los objetivos planteados anteriormente, la duración del SVCA debe ser igual o mayor a 5 años, cumpliendo así con los primeros 2 objetivos del SVCA y siguiendo

las recomendaciones del Manual de Diseño del SVCA.

En la siguiente Tabla 7, se presenta la descripción de las características que debe tener el SVCA Tipo III Intermedio. Es importante tener en cuenta que pueden ser definidos otros contaminantes o parámetros a medir, a partir del inventario de emisiones, campañas de monitoreo, información existente o el modelo de dispersión; así mismo cada estación podrá contar con varios equipos y medir uno o más parámetros.

Característica	Parámetro
Tecnología de medición	Pasivo Activo Automático
Tiempo de monitoreo	Permanente
Periodicidad del monitoreo	Permanente
Parámetros a medir	PM_{10} $PM_{2.5}$ Ozono
Número de estaciones	Mínimo 3 estaciones de PM_{10} Mínimo 1 estación de $PM_{2.5}$ Mínimo 1 estación de Ozono
Tipos de estaciones	Fondo Fondo urbana Indicativas EPE
Ubicaciones estaciones	De acuerdo con el diseño específico descrito en el diseño detallado
Periodicidad del muestreo	Muestreadores activos cada tercer día. Para muestreadores pasivos: tres series de un mes de duración cada dos años Para analizadores **automáticos: permanente**
Instrumentos meteorológicos	Pluviómetros automáticos Estaciones meteorológicas automáticas portátiles Estación meteorológica de alta precisión

Tabla 7. Descripción del SVCA Tipo III Intermedio.

Las estaciones se deben ubicar alineadas con los siguientes objetivos, determinar:

1. Las concentraciones más altas en el dominio del SVCA
2. Las concentraciones típicas de zonas densamente pobladas
3. El impacto en la calidad del aire de fuentes significativas
4. Las concentraciones generales de fondo
5. Un soporte a estudios epidemiológicos

6.2 Ubicación de las estaciones del SVCA

6.2.1 Estaciones fijas

El Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) Tipo III Intermedio según el Manual de Diseño de SVCA requiere como mínimo tener:

- 3 estaciones de PM_{10}
- 1 estación de $PM_{2.5}$
- 1 estación de Ozono

6.2.1.1 Estaciones fijas de PM_{10}

Para este tipo de SVCA se debe tener mínimo tres estaciones fijas de PM_{10} ubicadas con los siguientes criterios:

- Una estación de fondo (objetivo 1 y 4): esta estación se debe ubicar según la rosa de vientos de la zona, vientos arriba de la región, además es la estación donde se esperan más concentraciones de PM_{10}. En este caso, la estación La Danta presentó 3 excedencias a la norma de calidad del aire en la campaña de monitoreo que se hizo entre 2022 y 2023 durante 4 meses, por eso se recomienda ubicar la estación de fondo de PM_{10} vientos arriba (de la dirección de mayor magnitud que es la este-sudeste) de la estación La Danta (ver Figura 14).

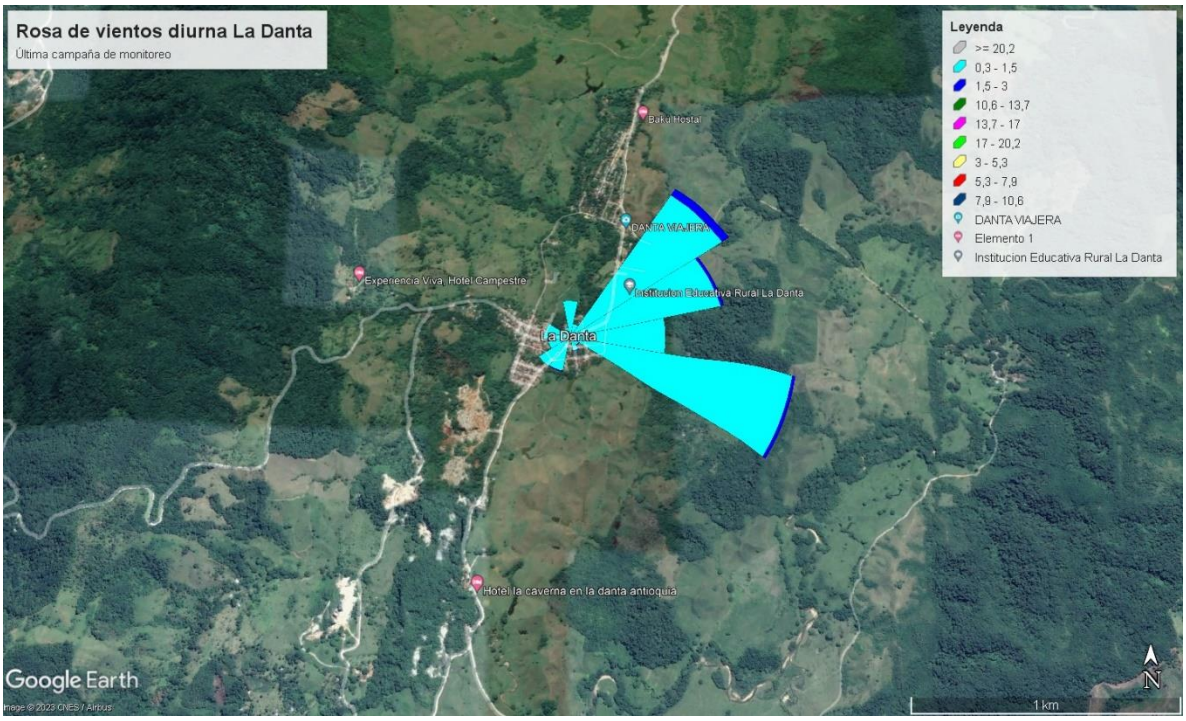


Figura 14. Rosa de vientos diurna en la estación La Danta

- Una estación de punto crítico o hot spot (objetivos 3 y 5). La ubicación de esta estación se basa en los resultados de la modelación. Las representaciones de la modelación identifican a las fuentes fijas como el principal contribuyente, destacándose especialmente aquellas ubicadas en el corredor de guarne. Es particularmente notable la influencia de las fuentes fijas ubicadas en el corredor de guarne, esto concuerda con los resultados obtenidos en el inventario de emisiones atmosféricas, en el cual se encontró que la mayor cantidad de las emisiones asociadas a partículas en la subregión valles de san Nicolás se dan asociadas a las fuentes fijas puntuales ubicadas en Guarne, Marinilla Y Rionegro.

Las tecnologías para este tipo de estaciones serán de muestreo activo (manuales semiautomáticos)

- Estaciones localizadas para determinar concentraciones típicas de zonas densamente pobladas. La ubicación de esta estación se define, de acuerdo con los análisis del inventario de emisiones, campaña de monitoreo y la modelación realizados en la etapa de diagnóstico, con esta estación se complementa el SVCA

cumpliendo los objetivos 2 y 3 (las concentraciones típicas de zonas densamente pobladas y el impacto en la calidad del aire de fuentes significativas).

Esta estación se recomienda ubicar en la subregión Valles de San Nicolás, por ser la subregión con mayor número de habitantes (482.040) y con una extensión del casco urbano de 4025.75 Hectáreas, específicamente el municipio de Rionegro es el que tiene una mayor extensión en su casco urbano.

6.2.1.2 Estaciones fijas de $PM_{2.5}$

Como mínimo debe haber una estación de $PM_{2.5}$ en el punto donde se determinen las mayores concentraciones de PM_{10}. Esta estación de $PM_{2.5}$ puede ir en la misma ubicación que la estación de PM_{10} que espera las concentraciones más altas específicamente en La Danta.

6.2.2 Estaciones indicativas

Las estaciones mencionadas a continuación son indicativas aquellas que monitorean el contaminante por un período específico, los métodos de medición a usar en estas estaciones no son necesariamente de referencia.

6.2.2.1 Estaciones indicativas de PM_{10}

En caso que el SVCA esté conformado por las tres estaciones mínimas, se podrán realizar mediciones indicativas en otros puntos que respondan a los objetivos de ubicación 2 y 3 (las concentraciones típicas de zonas densamente pobladas y el impacto en la calidad del aire de fuentes significativas).

Las estaciones indicativas tienen las siguientes condiciones particulares:

a) Durante el primer año las estaciones permanecerían en cada punto por un periodo mínimo de 3 meses antes de cambiar su ubicación.
b) A partir del segundo año debe permanecer por un periodo mínimo de un año en cada punto antes de cambiar su ubicación.
c) En caso de encontrarse, durante la evolución del SVCA mediciones de PM_{10} donde se cumplan condiciones de área fuente moderada se deberá ubicar una estación fija en el punto respectivo.

En este caso se evaluará las emisiones más altas de PM_{10}, las excedencias al límite máximo permisible y el ICA, en el municipio de Sonsón es donde converge lo mencionado anteriormente las emisiones más elevadas con 3425 ton/año de PM_{10}, las excedencias a la norma y un ICA que indica que la calidad del aire puede causar daños a la salud humana (ver Tabla 8.

Subregión	Municipio	Criterio	Emisiones
Páramo	Sonsón (La Danta)	Inventario de emisiones de fuentes difusas o dispersas	3425 ton/año PM_{10}
Valle de San Nicolás	Rionegro		153 ton/año PM_{10}
Bosques	Puerto Triunfo		105 ton/año PM_{10}
Páramo	Sonsón (La Danta)	Campaña de monitoreo	3 excedencias al límite máximo permisible (75 µg/m^3) en un período de 24 horas establecido por la Resolución 2254 del 2017 con concentraciones de 92.9 µg/m^3, 98.8 µg/m^3 y 122.5 µg/m^3
			Por su parte, al evaluar PM_{10} solamente la estación La Danta tuvo un ICA “Aceptable” (55-154 µg/m^3) con un 27.8% de los días monitoreados.

Tabla 8. Puntos críticos de emisiones del contaminante criterio PM_{10}

6.2.2.2 Estaciones indicativas de $PM_{2.5}$

En la siguiente Tabla 9 se presentan los puntos con mayores emisiones de $PM_{2.5}$ con los que se pueden definir ubicaciones para las estaciones indicativas dependiendo del presupuesto y la priorización de las problemáticas presentadas en la jurisdicción.

Subregión	Municipio	Criterio	Emisiones
Páramo	Sonsón (estación La Danta)	Campaña de monitoreo	Al evaluar $PM_{2.5}$, se encontró que el 60% de los días el ICA fue "Aceptable" (15,5-40,4 $\mu g/m^3$) en las estaciones Guarne y Jerusalén, para la estación Marinilla tuvo un 50% de los días un ICA "Aceptable", y por último en La Danta tuvo el 45% de los días un ICA "Aceptable".
Páramo	**Sonsón**	**Inventario de emisiones de fuentes difusas o dispersas**	**516 ton/año $PM_{2.5}$**
Valle de San Nicolás	Rionegro		20 ton/año $PM_{2.5}$
Bosques	Puerto Triunfo		13 ton/año $PM_{2.5}$

Tabla 9. Puntos críticos del contaminante criterio $PM_{2.5}$

6.2.2.3 Estaciones indicativas para gases

Para las mediciones de SO_2, NO_2 y O_3 se usarán métodos automáticos de medición de referencia o equivalentes. En el caso de SO_2, el municipio de Rionegro presenta las emisiones más altas con 255 ton/año de SO_2 proveniente de fuentes fijas puntuales, por su parte las emisiones más elevadas de NOx se presentan en el tramo de vía Guarne-Te de Aeropuerto mediante fuentes móviles con 41754 ton/año de NOx (ver Tabla 10).

Contaminantes		Subregión	Municipio	Criterio	Emisiones
Contaminantes Criterio	**SO_2**	Valles de San Nicolás	Rionegro	Inventario de fuentes fijas puntuales	255 ton/año
			Guarne		171 ton/año
			Marinilla		164 ton/año

Contaminantes		Subregión	Municipio	Criterio	Emisiones
			vía Guarne-Te de Aeropuerto	Inventario de fuentes móviles	35,62 ton/año.
	NOx (precursor de ozono)	Valles de San Nicolás	Rionegro	Inventario de fuentes fijas puntuales	174 ton/año
			Guarne		110 ton/año
			Marinilla		87 ton/año.
			vía Guarne-Te de Aeropuerto	Inventario de fuentes móviles	41754,49 ton/año

Tabla 10. Emisiones de los contaminantes criterio SO_2 y NO_2

6.2.2.4 Precursores de Ozono

De nuevo se menciona que el análisis de los precursores de ozono se realiza con el objetivo de ubicar la estación a una distancia entre 16 y 48km de las zonas densamente pobladas y según las condiciones meteorológicas de la zona de interés para ubicar una o más estaciones indicativas de ozono. En la siguiente Tabla 11, se evidencia que hay un punto en el que convergen las emisiones más altas de dos precursores de ozono, de CO y NO_x, específicamente en el tramo de vía Guarne-Te de Aeropuerto con 8106 ton/año y 41754 ton/año.

Contaminantes		Subregión	Municipio	Criterio	Emisiones
Precursores de Ozono	**VOC (CC)**	Valles de San Nicolás	Marinilla	Inventario de emisiones de fuentes fijas puntuales	8308 ton/año
	CO (CC)	Valles de San Nicolás	vía Guarne-Te de Aeropuerto	Inventario de fuentes móviles	8106,50 ton/año

Contaminantes		Subregión	Municipio	Criterio	Emisiones
	NOx (CC)	Valles de San Nicolás	vía Guarne-Te de Aeropuerto	Inventario de fuentes móviles	41754,49 ton/año
	CH_4 (GEI)	Valles de San Nicolás	vía Te Aeropuerto-Marinilla	Inventario de fuentes móviles	58.05 ton/año

Tabla 11. Puntos críticos de precursores de ozono.

Además, este punto coincide con una zona densamente poblada que es Rionegro y con un punto crítico de alta densidad de fuentes fijas y dispersas que también está ubicado en el municipio de Rionegro como se observa en la Figura 15, donde se muestra los puntos con densidades altas y bajas de fuentes fijas y dispersas.

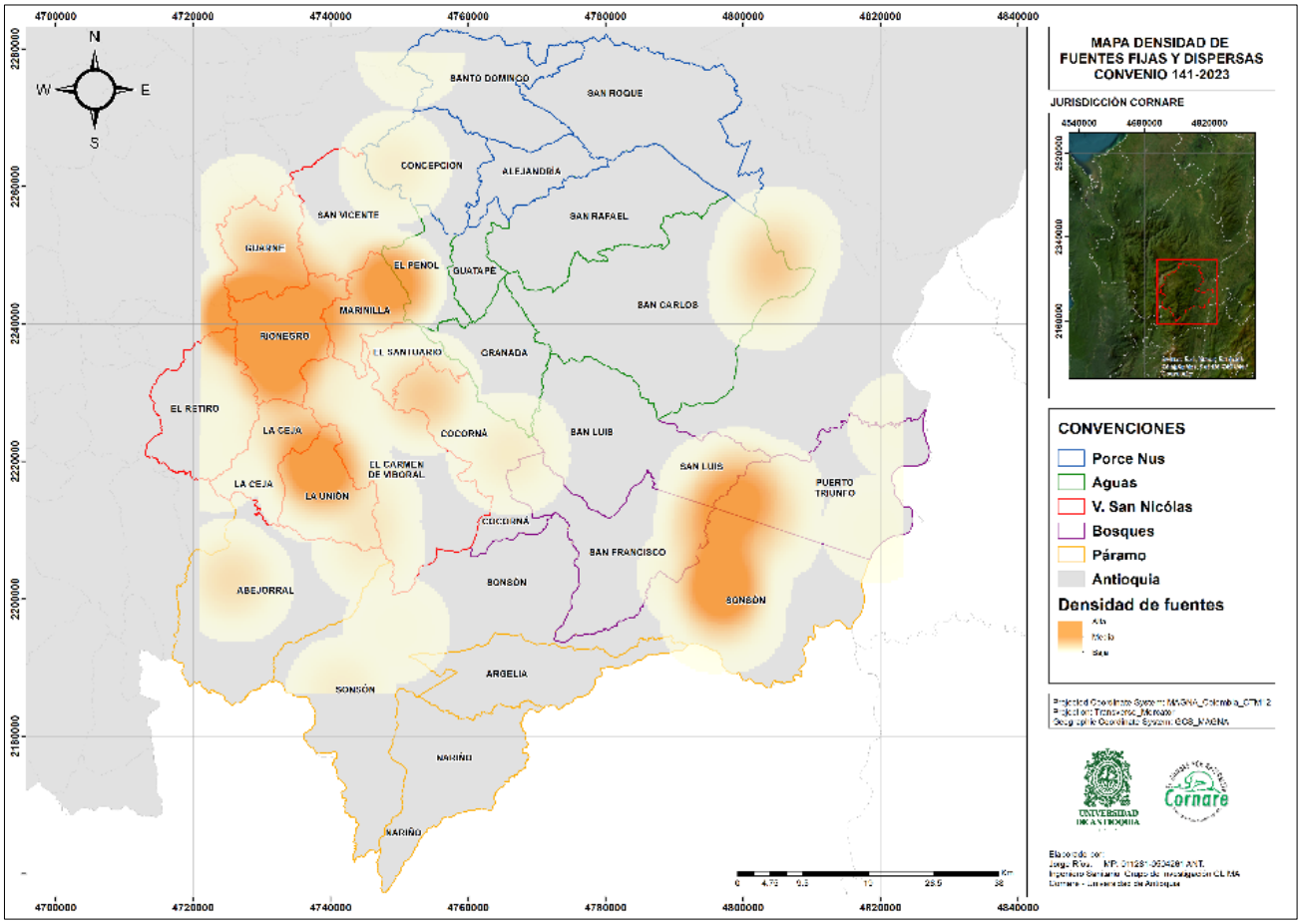


Figura 15. Densidad de fuentes fijas y dispersas

6.2.3 Equipos de medición

En el Manual de Diseño del SVCA, clasifican de 1 a 3 indicando la utilidad de la metodología de medición según el objetivo de vigilancia de la calidad del aire, siendo el número 3 la tecnología más recomendada de acuerdo al objetivo propuesto para el SVCA. Las casillas que no tienen ningún valor significan que la tecnología no se recomienda para cumplir con el dicho objetivo (ver Tabla 12). También se mencionan las ventajas y desventajas de los equipos pasivos, activos manuales y semiautomáticos, de los analizadores automáticos y los sensores remotos (ver Tabla 13).

Objetivos	Técnicas de medición				
	Muestreador pasivo	Muestreador activo	Analizador automático	Sensor remoto	Bio-indicador
Vigilar el cumplimiento de las normas de calidad del aire	1	3	**3**	1	
Rastreo de tendencias temporales de calidad de aire	2	1	**3**	3	1
Medición de concentraciones de fondo	3	2	1	3	

Tabla 12. Metodologías de medición recomendadas para el SVCA

Técnicas de medición	Ventajas	Desventajas
Pasivos	Muy bajo costo. Muy simples. Útiles para estudios de base.	No probado para algunos contaminantes. En general sólo proveen promedios semanales y mensuales. Requieren análisis de laboratorio
Activos manuales y semiautomáticos	**Costo medio.** **Fáciles de operar.** **Confiables en operación y funcionamiento.** **Historia de bases de datos.** **Bajos costos de inversión y de operación.**	Proporciona concentraciones promedio. Resolución limitada. **Los equipos manuales requieren logística a veces compleja para la operación, aspecto mejorado con los semiautomáticos.** Requieren análisis de laboratorio. No se tienen datos en tiempo real.
Analizadores automáticos	**Mediciones precisas.** **Datos horarios.** **Información en línea y bajos costos directos de operación.**	Operación compleja. Costosos. Requieren técnicos calificados. Altos costos de repuestos durante operación. Necesitan equipos auxiliares como calibradores, generadores de aire cero y cabinas acondicionadas.
Sensores remotos	Proporcionan patrones de resolución de datos. Útiles cerca de fuentes y para mediciones verticales en la atmósfera. Mediciones de multicomponentes.	Muy complejos y costosos. Personal especializado para operar, calibrar y validar. No son siempre comparables con los analizadores convencionales.

Tabla 13. Ventajas y desventajas de las técnicas de medición para el SVCA

Para las estaciones fijas (las estaciones indicativas no requieren equipos que usen métodos de referencia), el Manual de Diseño del SVCA menciona que los equipos de medición deben ser de método equivalente o de referencia, también cabe mencionar que deben ser de medición activa. A continuación, se presentan los métodos de referencia que recomienda el Manual de Diseño del SVCA:

- US–EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY)
- EEA (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY)

6.2.4 Consideraciones especiales de este tipo de SVCA

- El monitoreo de CO, NO_2 o SO_2 no es obligatorio excepto en los casos en los que se presenten problemas de calidad del aire asociados a estos contaminantes.
- Se deberá revisar el diseño de este tipo de SVCA cada 3 años y realizar los ajustes en caso de ser necesario.
- Cada estación fija deberá tener un pluviómetro automático
- Se deberá implementar una estación meteorológica de alta precisión, la cual mide velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación global, humedad relativa, precipitación, y presión.
- Se deberá implementar el uso de una o varias estaciones meteorológicas portátiles tipo II, la cual mide parámetros de velocidad y dirección de viento, temperatura (con estándar NIST), radiación solar, humedad relativa, pluviometría (con estándar NIST) y presión barométrica.

6.2.5 Diseño SVCA

Estaciones	Tipo de estación	Contaminante a medir	Frecuencia	Localización aproximada	Tecnología apropiada
Fijas	De fondo	PM10/PM2.5	Permanente	Vientos arriba de la estación La Danta	Muestreo activo. Semiautomático o automático.
	De punto crítico	PM10	Permanente	Guarne	Semiautomático o automático.
	De zona densamente poblada	PM10	Permanente	Casco urbano de Rionegro	Semiautomático o automático.
Indicativas		PM10	3 meses el primer año, 1 año el segundo año, evaluar si posterior a este período cumple como área fuente y es necesario convertirla en una estación fija	Sonsón, Páramo	Semiautomático o automático.
		PM2.5		La Danta	Semiautomático o automático.
		SO2		Rionegro	Automático.
		NOx		Vía Guarne-Te de Aeropuerto	Automático.
		Ozono		Vía Guarne-Te de Aeropuerto	Automático.

Tabla 14. Diseño SVCA

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «IDEAM,» [En línea]. Available: http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire. [Último acceso: 4 Septiembre 2023].

[2] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «IDEAM,» 1 Noviembre 2017. [En línea]. Available: http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f. [Último acceso: 4 Septiembre 2023].

[3] G. R. M. Espeleta, «Repositorio UTB,» 2016. [En línea]. Available: https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/1268/0069851.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 4 Septiembre 2023].

[4] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «IDEAM. Desarrollado por el SIAC,» SIAC, [En línea]. Available: http://www.ideam.gov.co/web/siac/monitoreoaire. [Último acceso: 4 Septiembre 2023].

[5] IDEAM, «ANDI,» 11 12 2023. [En línea]. Available: https://www.andi.com.co/Uploads/InformeCalidadAire_2019_637558019472758451.pdf .

[6] D. S. S. Moreno, «Universidad de Antioquia,» 15 Abril 2021. [En línea]. Available: https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/generales/interna/!ut/p/z1/1VRJl5pAEP4rzoEj9gaKuSESd3EZx5HLvLZpsROgGUAd_32aOMmLMy7Jm-QQLt1V9dXS9RUFfPAI_ITuREgLIRMaKXnp156shoORbcBBe9pzoF1zbLc-exhgC4PFKQD2kQntiTse3XvOuNXDwFfm0cR0EXbgwHMmLWijDkLYmk67M-PVH174bPh7. [Último acceso: 4 Septiembre 2023].

[7] Corporación Autónoma Regional Rionegro-Nare, Cornare, «Cornare,» Marzo 2020. [En línea]. Available: https://www.cornare.gov.co/PlanAccion/2020-2023/Proyecto_Plan_de_Accion_Institucional_2020-2023.pdf. [Último acceso: 4 Septiembre 2023].

[8] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, «minambiente,» Octubre 2010. [En línea]. Available: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Diseno.pdf. [Último acceso: 4 Septiembre 2023].

[9] Universidad Católica de Oriente, «Repositorio de la Universidad Católica de Oriente,» 2018. [En línea]. Available: https://repositorio.uco.edu.co/bitstream/20.500.13064/272/9/2019%20El%20mercado%20laboral%20en%20el%20Oriente%20Antioque%c3%b1o%20una%20caracterizaci%c3%b3n%20de%20la%20oferta%20laboral%20en%20seis%20municipios.pdf. [Último acceso: 9 Septiembre 2023].

[10] Municipio de La Unión, «La Unión, Antioquia,» 2020. [En línea]. Available: https://launionantioquia.micolombiadigital.gov.co/sites/launionantioquia/content/files/000 0478/23859_pdm--la-union-en-buenas-manos-20202023-v2-1.pdf. [Último acceso: 20 Septiembre 2023].

[1] UdeA, IDEA, Gobernación de Antioquia, Davivienda, «udea,» 2021. [En línea]. Available: https://www.udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/01f804f9-afc9-49c0-8685-b9afb1ff1864/RIONEGRO+2022.pdf?MOD=AJPERES&CVID=o04z964. [Último acceso: 18 Septiembre 2023].

[2] Alcaldía de San Vicente de Ferrer, «Alcaldía Municipal de San Vicente de Ferrer Antioquia,» 30 Mayo 2020. [En línea]. Available: http://www.sanvicente-antioquia.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-san-vicente-ferrer-vive-la-renovacion. [Último acceso: 20 Septiembre 2023].

[3] Cornare, «Sistema de Información Ambiental Regional, SIAR,» [En línea]. Available: https://www.cornare.gov.co/SIAR/REFERENTES_AMBIENTALES/INFORMES-POR-MUNICIPIOS/VALLES-DE-SAN-NICOLÁS/Rionegro.pdf. [Último acceso: 17 Septiembre 2023].

[4] Alcaldía de Guarne, «Alcaldía Municipal de Guarne,» 2023. [En línea]. Available: https://www.guarne-antioquia.gov.co/Ciudadanos/Documents/1.%20Anuario_Estad%C3%ADstico_Guarne_2023.pdf. [Último acceso: 18 Septiembre 2023].

[5] Cornare, «Sistema de Información Ambiental Regional,» 2019. [En línea]. Available: https://www.cornare.gov.co/referentes-ambientales/. [Último acceso: 18 Septiembre 2023].

[1] Municipio de El Santuario, «Alcaldía Municipal de El Santuario en Antioquia,» 31 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://www.elsantuario-antioquia.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-con-la-gente-por-el-santuario. [Último acceso: 18 Septiembre 2023].

6
]

[Concejo y Alcaldía Municipal de Marinilla, «Alcaldía de Marinilla, Antioquia,» 2020. [En
1 línea]. Available: https://www.marinilla-antioquia.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-
7 nuestro-compromiso-eres-tu-2020-2023. [Último acceso: 19 Septiembre 2023].
]

[S. D. Gleave, «Rionegro,» 30 Diciembre 2016. [En línea]. Available:
1 https://rionegro.gov.co/wp-
8 content/uploads/2021/06/161230_Indicadores_de_movilidad_V2.pdf. [Último acceso: 15
] Septiembre 2023].

[Departamento Nacional de Planeación, DNP, «Territata, Sistema de Estadísticas
1 Territoriales,» [En línea]. Available: https://territata.dnp.gov.co/index-
9 app.html#/comparaciones. [Último acceso: 12 Septiembre 2023].
]

[Alcaldía Municipal San Carlos Antioquia, «San Carlos Antioquia,» 2020. [En línea].
2 Available: https://www.sancarlos-
0 antioquia.gov.co/Transparencia/PLANDEDESARROLLOSANCARLOSSOMOSTODOS/
] Documentos%20compartidos/PLAN%20DESARROLLO%20SAN%20CARLOS%20SO
MOS%20TODOS.pdf. [Último acceso: 22 Septiembre 2023].

[Alcaldía de Guatapé, «Alcaldía de Guatapé,» 24 Julio 2020. [En línea]. Available:
2 https://www.municipiodeguatape.gov.co/documentos/90/plan-de-desarrollo/. [Último
1 acceso: 22 Septiembre 2023].
]

[22] Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres, CMGRD, «Repositorio Unidad Nacional Para La Gestión del Riesgo de Desastres,» 2014. [En línea]. Available: https://www.elpenol-antioquia.gov.co/ciudadanos/ProyectosNormatividad/PROYECTO%20DE%20ACUERDO%20PLAN%20DE%20DESARROLLO%202020%20-%202023.pdf. [Último acceso: 21 Septiembre 2023].

[23] Municipio de San Rafael Antioquia, «Concejo Municipal San Rafael Antioquia,» 17 Junio 2020. [En línea]. Available: http://www.concejo-sanrafael-antioquia.gov.co/noticias/documento-plan-de-desarrollo-20202023-aprobado. [Último acceso: 22 Septiembre 2023].

[24] Alcaldía Municipal Granada Antioquia, «Granada Antioquia,» 2020. [En línea]. Available: https://granadaantioquia.micolombiadigital.gov.co/sites/granadaantioquia/content/files/000162/8060_plan-de-desarrollo--24062020-dt.pdf. [Último acceso: 21 Septiembre 2023].

[25] Municipio de San Luis, Antioquia, «Alcaldía Municipal de San Luis, Antioquia,» 18 Junio 2017. [En línea]. Available: http://www.sanluis-antioquia.gov.co/normatividad/acuerdo-no-04--2017-eot. [Último acceso: 25 Septiembre 2023].

[26] Alcaldía de Cocorná, «Alcaldía de Cocorná,» 27 Mayo 2020. [En línea]. Available: https://www.cocorna-antioquia.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-cocorna-es-esperanza-20202023. [Último acceso: 22 Septiembre 2023].

[27] Alcaldía Municipal San Francisco Antioquia, «Concejo San Francisco,» 28 Mayo 2020. [En línea]. Available:

[7] https://concejosanfrancisco.micolombiadigital.gov.co/normatividad/plan-de-desarrollo-municipal. [Último acceso: 25 Septiembre 2023].

[28] Alcaldía Municipal de Argelia , «Alcaldía Argelia Antioquia,» 8 Junio 2020. [En línea]. Available: https://www.argelia-antioquia.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-argelia-el-desarrollo-es-pa-todos-661173. [Último acceso: 25 Septiembre 2023].

[29] Concejo Municipal de Nariño Antioquia, «Alcaldía Municipal de Nariño en Antioquia,» 12 Junio 2020. [En línea]. Available: http://www.narino-antioquia.gov.co/normatividad/acuerdo-n004. [Último acceso: 25 Septiembre 2023].

[30] Municipio de Concepción, «Alcaldía Municipal de Concepción en Antioquia,» 20 Mayo 2020. [En línea]. Available: https://www.concepcion-antioquia.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-20202023. [Último acceso: 25 Septiembre 2023].

[31] DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, DANE, «DANE,» [En línea]. Available: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018. [Último acceso: 7 Septiembre 2023].

[32] Cornare, «SIAR,» 2014. [En línea]. Available: https://www.cornare.gov.co/SIAR/aire/CALIDAD_DE_AIRE/CONTENIDO/INDICE_DE_CALIDAD_DEL_AIRE._ICA-2014.pdf. [Último acceso: 14 Noviembre 2023].

[IDEAM, «SISAIRE,» [En línea]. Available: http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-3 web/consultas.xhtml. [Último acceso: 2023].
3
]