

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Relación entre contaminación del aire por PM₁₀ e infección respiratoria aguda en la población menor de 5 años de Barrancabermeja, Santander, 2014-2016

Rosanna Camerano Ruiz

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Medicina, Departamento de Salud Pública
Bogotá, Colombia
2019

Relación entre contaminación del aire por PM₁₀ e infección respiratoria aguda en la población menor de 5 años de Barrancabermeja, Santander, 2014-2016

Rosanna Camerano Ruiz

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Salud Pública

Director:

Ph.D. Luis Jorge Hernández Flórez

Codirector:

Ph.D. Néstor Yezid Rojas Roa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Medicina, Departamento de Salud Pública
Bogotá, Colombia

2019

*A mis padres por su amor y apoyo
incondicionales*

Agradecimientos

A mis tutores Néstor y Luis Jorge.

A Ecopetrol, Secretaría de Ambiente de Barrancabermeja y Secretaría de Salud de Barrancabermeja.

Al Observatorio Nacional de Salud y al profesor Fernando De La Hoz.

Resumen

Se realizó un estudio ecológico de series de tiempo para explorar la relación entre la contaminación del aire por material particulado, PM_{10} y la infección respiratoria aguda en niños en Barrancabermeja, un municipio de gran interés por ser sede de la refinera de petróleo más grande de Colombia. Adicionalmente, se implementó la metodología de fuerzas motrices de Corvalán para buscar otros factores que pudieran estar involucrados en esta relación. Los datos de contaminación se obtuvieron de la red de monitoreo de calidad del aire de Ecopetrol y los eventos de infección de las vías respiratorias superiores se obtuvieron de los registros del sistema de vigilancia municipal. Se construyó una serie de tiempo que se ajustó por temperatura media y precipitación la cual mostró que los promedios de material particulado sí tenían relación estadísticamente significativa con el aumento de los eventos agudos de infección respiratoria. La metodología de Corvalán permitió ver que la contaminación del aire es solo una pequeña parte del problema medioambiental que la ciudad tiene debido al crecimiento urbano incontrolado, la dependencia económica de la producción de petróleo y la falta de cumplimiento de las leyes urbanas y ambientales.

Palabras clave: Material particulado, infecciones del sistema respiratorio, contaminación del aire, salud ambiental

Abstract

An ecological time series analysis was conducted to explore the relation between air pollution by particulate matter (PM₁₀) and acute respiratory infection in children in Barrancabermeja, a municipality of great influence for hosting the biggest industrial complex for oil production in Colombia. Additionally, Corvalan's health and environment cause-effect framework was used to seek for other factors that could be involved into this relation. Pollution data was collected from Ecopetrol's quality monitoring network and events of acute respiratory infection were from the records of the surveillance system. A time series was constructed with the data of the network and was adjusted by mean temperature and precipitation and showed a significant effect of air pollution in the increase of the acute events. Corvalan's methodology allowed us to see that air pollution is only a small part of the huge environmental problem that the city has due to uncontrolled urban growth, the economic dependence on oil and gas production and poor compliance with urban and environmental laws.

Keywords: Particulate matter, respiratory tract infections, air pollution, environmental health

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas.....	XIV
Definiciones	XV
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	5
1.1 Barrancabermeja.....	5
1.1.1 Características geográficas.....	6
1.1.2 Características demográficas	8
1.1.3 Características de salud.....	9
1.1.4 La refinería de Barrancabermeja	13
1.1.5 Monitoreo de la calidad del aire en Barrancabermeja	14
1.1.6 Contaminación del aire en Barrancabermeja	16
1.2 Aspectos normativos	18
1.3 Enfoque conceptual.....	20
2. Objetivos	25
2.1 Objetivo general.....	25
2.2 Objetivos específicos.....	25
3. Metodología	27
3.1 Análisis de los contaminantes criterio establecidos por la norma de calidad del aire y de las variables meteorológicas	28
3.2 Análisis de los eventos de morbilidad por IRA en la población menor de 5 años para los años 2014 a 2016	30
3.3 Modelo Aditivo Generalizado (GAM)	30
3.4 Enfoque del modelo de Determinantes Sociales de la Salud de la OMS	34
4. Resultados	35
4.1 Descripción de las áreas de influencia de las estaciones de monitoreo	35
4.1.1 Estación Rosario	36

4.1.2	Estación Policlínica	37
4.2	Análisis de los contaminantes criterio establecidos por la norma de calidad del aire y de las variables meteorológicas	38
4.2.1	PM ₁₀	38
4.2.2	NO ₂	42
4.2.3	SO ₂	45
4.2.4	Variables meteorológicas.....	48
4.3	Análisis de los eventos de morbilidad por IRA en menores de 5 años, 2014-2016	50
4.3.1	2014.....	50
4.3.2	2015.....	51
4.3.3	2016.....	51
4.4	Modelo Aditivo Generalizado (GAM)	52
4.5	Aproximación de la metodología de fuerzas motrices.....	53
5.	Discusión.....	57
5.1	Fortalezas y limitaciones del estudio, potenciales fuentes de error	64
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	65
6.1	Conclusiones	65
6.2	Recomendaciones	65
A.	Anexo: Mapas	67
B.	Anexo: Gráficas resumen de datos de las estaciones.....	70
C.	Anexo: Excedencias de PM₁₀ frente a las normas ambientales	76
D.	Anexo: Excedencias de NO₂ frente a las normas ambientales.....	78
E.	Anexo: Excedencias de SO₂ frente a las normas ambientales	80
F.	Anexo: <i>CalendarPlots</i> PM₁₀ con relación al ICA.....	82
G.	Gráficos <i>TimeVariation</i> PM₁₀.....	86
H.	Gráficos <i>TimeVariation</i> NO₂.....	88
I.	Gráficos <i>TimeVariation</i> SO₂	90
J.	Anexo: Gráficas resumen de las variables meteorológicas.....	92
K.	Anexo: Rosa de vientos	94
L.	Anexo: Ciclos anuales de temperatura y precipitación	97
M.	Anexo: Análisis estadístico	99
	Bibliografía	117

Lista de figuras

	Pág.
Ilustración 1-1 Distribución de la zona urbana por comunas	7
Ilustración 1-2 Pirámide poblacional Barrancabermeja	9
Ilustración 1-3 Tasa de mortalidad ajustada por edad para toda la población, 2005-2015	10
Ilustración 1-4 Tasa de mortalidad infantil, Barrancabermeja 2005-2015	11
Ilustración 1-5 Tasa de mortalidad por IRA en menores de 5 años, 2005-2015	12
Ilustración 1-6 Ubicación de las estaciones de monitoreo de los SVCA. Secretaría de ambiente (amarillo) y Ecopetrol (morado)	16
Ilustración 1-7 Histórico de los promedios mensuales de PM ₁₀ , 2011-2016	17
Ilustración 1-8 Modelo de Determinantes Sociales de la Salud, OMS	21
Ilustración 4-1 Señalización del área de influencia de monitoreo de las estaciones	36
Ilustración 4-3 Curva epidémica, 2014	50
Ilustración 4-4 Curva epidémica, 2015	51
Ilustración 4-5 Curva epidémica, 2016. (se encuentra a escala)	52
Ilustración 6-2 Histograma lineal y logarítmico para Policlínica	101
Ilustración 6-3 Datos por parejas de ira, pm10, rain, t_media	102

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1 Información geográfica de Barrancabermeja	6
Tabla 1-2 Características de las comunas	8
Tabla 1-3 Causas de mortalidad por subgrupo para toda la población, 2005-2015.....	10
Tabla 1-4 Límites permisibles recomendados por la OMS	18
Tabla 1-5 Norma nacional de calidad del aire	19
Tabla 4-1 Estadística descriptiva PM ₁₀ , 2014.....	39
Tabla 4-2 Estadística descriptiva PM ₁₀ , 2015.....	40
Tabla 4-3 Estadística descriptiva PM ₁₀ , 2016.....	42
Tabla 4-4 Estadística descriptiva NO ₂ , 2014	43
Tabla 4-5 Estadística descriptiva NO ₂ , 2015	44
Tabla 4-6 Estadística descriptiva NO ₂ , 2016	45
Tabla 4-7 Estadística descriptiva SO ₂ , 2014	45
Tabla 4-8 Estadística descriptiva SO ₂ , 2015	47
Tabla 4-9 Estadística descriptiva	48
Tabla 4-10 Estadística descriptiva, variables precipitación y temperatura media	49
Tabla 4-11 Aproximación de la metodología de fuerzas motrices	53

Definiciones

Aire: Es el fluido que forma la atmósfera de la tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición normal es de por lo menos 20% de oxígeno, 77% de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua en la relación volumétrica.

Análisis: Determinación directa de la presencia y/o concentración de contaminantes (gases o material particulado) en la muestra de aire que se hace pasar por el equipo; el análisis puede ser de tipo químico u óptico y permite conocer valores in situ y en tiempo real.

Área-fuente: Es una determinada zona o región, urbana, suburbana o rural, que, por albergar múltiples fuentes de emisión, es considerada como un área especialmente generadora de sustancias contaminantes del aire.

Carga de enfermedad: Es un conjunto de estimaciones de morbilidad y mortalidad en las poblaciones. Permite cuantificar de forma comparativa la pérdida del estado salud debido a distintas patologías, lesiones y factores de riesgo, según variables de persona, tiempo y lugar.

Contaminación atmosférica: Es la presencia de sustancias en la atmósfera en altas concentraciones, en un tiempo determinado, como resultado de actividades humanas o procesos naturales, que pueden ocasionar daños a la salud de las personas o al ambiente.

Contaminantes: Fenómenos físicos o sustancias, o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que, solos o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de éstas.

Emisión: Descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil.

Episodio o Evento: Es la ocurrencia o acaecimiento de un estado tal de concentración de

contaminantes en el aire que, dados sus valores y tiempo de duración o exposición, impone la declaratoria por la autoridad ambiental competente, de alguno de los niveles de contaminación, distinto del normal.

Fuente de emisión: Actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire.

Fuente fija: Fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.

Fuente fija puntual: Son aquellas que emiten contaminantes al aire por ductos o chimeneas debido a la magnitud de sus emisiones, o a la complejidad de los procesos que desarrollan, tales como las refinerías y las plantas termoeléctricas u otras industrias de cierta magnitud, se les considera en forma individual. Otras fuentes puntuales de menor magnitud agrupadas pueden ser consideradas como fuentes difusas.

Fuente fija artificial de contaminación del aire: Es todo proceso u operación realizada por la actividad humana o con su participación susceptible de emitir contaminantes.

Fuente fija dispersa o difusa: Aquella en que el foco de emisión de una fuente fija se dispersa en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión. Ejemplo: trituradoras, depósitos de materiales de construcción, minas, canteras, plantas de tratamiento de aguas residuales, rellenos sanitarios, quemas agrícolas controladas, etc.

Fuente móvil: Es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

Índice de calidad del aire (ICA) Resolución 2254 de 2017: Es un valor adimensional para reportar el estado de la calidad del aire en función de un código de colores al que están asociadas unos efectos generales que deben ser tenidos en cuenta para reducir la exposición a altas concentraciones por parte de la población.

- Puntos de corte para PM₁₀ (µg/m³ en 24 horas)
 - Buena: 0-12 (verde)
 - Aceptable: 13-27 (amarillo)
 - Dañina a la salud de grupos sensibles: 38-55 (naranja)
 - Dañina a la salud: 56-150 (rojo)
 - Muy dañina a la salud: 151-250. (morado)
 - Peligrosa: 251-500. (marrón)

Inmisión: Transferencia de contaminantes de la atmósfera a un “receptor”. Se entiende por inmisión la acción opuesta a la emisión. Aire inmiscible es el aire respirable a nivel de la troposfera.

Infección respiratoria aguda: conjunto de enfermedades que afectan el sistema respiratorio alto y bajo, con evolución menor a 15 días que afecta a toda la población, pero fundamentalmente, a los menores de 5 años y a las personas mayores de 65 años; puede cursar desde un resfriado común hasta complicación más severa como la neumonía e incluso puede ocasionar la muerte.

Muestreo: Acción de escoger muestras representativas de la calidad o condiciones medias del aire. Selección de una pequeña parte estadísticamente determinada, utilizada para inferir el valor de una o varias características del conjunto; para el caso de monitoreo de la calidad del aire las características a determinar hacen referencia a las concentraciones de los diversos contaminantes.

Nivel Normal (Nivel I): Es aquel en que la concentración de contaminantes en el aire y su tiempo de exposición o duración son tales, que no producen efectos nocivos, directos ni indirectos, en el medio ambiente o la salud humana.

Nivel de Prevención (Nivel II): Es aquel que se presenta cuando las concentraciones de los contaminantes en el aire y su tiempo de exposición o duración causan efectos adversos y manifiestos, aunque leves, en la salud humana o en el medio ambiente tales como irritación de las mucosas, alergias, enfermedades leves de las vías respiratorias o efectos dañinos en las plantas, disminución de la visibilidad u otros efectos nocivos evidentes.

Nivel de Alerta (III): Es aquel que se presenta cuando la concentración de contaminantes en el aire y su duración o tiempo de exposición puede causar alteraciones manifiestas en el medio ambiente o la salud humana y en especial alteraciones de algunas funciones fisiológicas vitales, enfermedades crónicas en organismos vivos y reducción de la expectativa de vida en la población expuesta.

Nivel de Emergencia (IV): Es aquel que se presenta cuando la concentración de contaminantes en el aire y su tiempo de exposición o duración puede causar enfermedades agudas o graves u ocasionar la muerte de organismos vivos, y en especial de los seres humanos.

Norma de emisión: Es el valor de descarga permisible de sustancias contaminantes, establecido por la Autoridad Ambiental competente, con el objeto de cumplir la norma de calidad del aire.

PST (Partículas Suspendidas Totales): Material particulado que incluye tanto a la fracción inhalable como a las mayores de 10 micras, que no se sedimentan en periodos cortos, sino que permanecen suspendidas en el aire debido a su tamaño y densidad.

PM₁₀ (Material Particulado menor a 10 Micras): Material particulado con un diámetro menor o igual a 10 micrómetros nominales. Se forma básicamente por medio de procesos mecánicos, como las obras de construcción, la re-suspensión del polvo de los caminos y el viento.

PM_{2.5} (Material Particulado menor a 2,5 Micras): Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros nominales. Es producto de la quema de combustibles fósiles.

Plan de gestión de la calidad del aire: Conjunto de procesos, procedimientos y normas cuyo propósito es reducir el impacto que ocasionan al ambiente atmosférico y la salud pública, diferentes tipos de fuentes, dentro de un marco de mejoramiento continuo.

Punto de descarga: Es el ducto, chimenea, dispositivo o sitio por donde se emiten los contaminantes a la atmósfera.

Sistemas de vigilancia de la calidad del aire (SVCA): Es un conjunto de procesos, herramientas e instrumentos que tienen como fin determinar los niveles de inmisión que se dan en un área determinada.

Tiempo de Exposición: Es el lapso de duración de un episodio o evento de contaminación.

Introducción

Las condiciones ambientales se constituyen en un aspecto fundamental de la calidad de vida y salud de la existencia humana, por lo que garantizarlas requiere de un esfuerzo conjunto de todos los sectores de la sociedad. La Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible establece 17 objetivos que tienen como meta la sostenibilidad económica, social y ambiental haciendo un llamado especial a cambiar el estilo de vida y las formas de producción para respetar el ambiente (1). La salud ambiental, definida como el campo de acción de la salud pública enmarcado en la interacción del ambiente y la salud, así como en los efectos que las condiciones del ambiente tienen sobre la salud individual y colectiva, es de gran importancia para alcanzar dichos objetivos (2).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el 23% de las muertes a nivel mundial están relacionadas con el medio ambiente. De acuerdo con el informe *Ambient Air Pollution* (3), la contaminación del aire es el factor de riesgo ambiental que genera mayor morbilidad y mortalidad a nivel mundial, siendo los países de ingresos bajos y medianos los que soportan la mayor carga de enfermedad y al que se le atribuyen 3 millones de muertes al año (4). Los efectos adversos pueden presentarse tras exposiciones breves (días) como prolongadas (años), principalmente a nivel respiratorio y cardiovascular. Hasta el momento no hay evidencia que indique un umbral por debajo del cual no se presenten efectos adversos en salud a la exposición a material particulado. Las afectaciones en salud asociadas a la contaminación atmosférica incrementan el ausentismo escolar, las incapacidades laborales y el gasto en medicinas y consultas médicas de las familias (5).

Existen cinco contaminantes principales o contaminantes criterio definidos por las normas ambientales que son: material particulado (**PM** por sus siglas en inglés) -menor a 10 micras y menor a 2.5 micras -, dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) y monóxido de carbono (CO). Estos contaminantes son generados principalmente como

producto de la combustión de combustibles fósiles, re-suspensión de polvos y explotación minera. Estos contaminantes han sido ampliamente estudiados y se conocen sus asociaciones tanto directas como indirectas en la salud de los seres humanos. Por lo tanto, las normas ambientales obligan a medirlos, con el fin de identificar zonas de alta contaminación en las que sea necesario generar medidas e intervenciones que los regulen y, así, conseguir una calidad del aire que proteja la salud de la población (6).

Entre los contaminantes criterio, se destaca el material particulado, formado por partículas en suspensión en el aire. Las partículas que tienen un tamaño (medido como diámetro aerodinámico) inferior a 10 micras (10^{-6} metros) tienen la capacidad de penetrar las vías respiratorias, por lo cual tienen el potencial de generar efectos negativos en la salud. La fracción de partículas gruesas entre 2.5 y 10 micras se deposita principalmente en las vías respiratorias superiores. De estas, las partículas con un tamaño inferior a 2,5 micras ($PM_{2.5}$), también llamadas “partículas finas” y las “partículas ultra finas”, con un tamaño inferior a 0,1 micras ($PM_{0.1}$), pueden penetrar las vías respiratorias inferiores y llegar hasta los alveolos, que son la unidad más pequeña del sistema respiratorio (7). Allí, las partículas ultrafinas pueden también penetrar a torrente sanguíneo y distribuirse por todo el cuerpo.

Dentro de la población general, los grupos más vulnerables a los efectos de la contaminación del aire son: menores de 5 años, adultos mayores de 60 años, personas con algún grado de inmunosupresión, personas con enfermedades crónicas de base y gestantes. De estos, los menores de 5 años son el grupo poblacional más afectado por la contaminación del aire, ya que manejan frecuencias respiratorias más altas, la inmadurez de su sistema inmune y respiratorio, por tener vías respiratorias más estrechas y ser más susceptibles a reacciones de tipo inflamatorio (8,9). Adicionalmente, se ha visto que la exposición a contaminantes no tiende a ser diferente entre sexos y es relativamente constante ya que los niños tienen a permanecer en un mismo lugar (casa o jardín infantil) la mayor parte del tiempo.

El estudio de Carga de enfermedad ambiental en Colombia, del Observatorio Nacional de Salud (10), estimó que durante el año 2016 se presentaron 17.549 muertes atribuibles a factores de riesgo ambiental; donde las mayores pérdidas de vida saludable se debieron a contaminación del aire por material particulado y la principal causa de muerte fue la enfermedad isquémica del corazón. Factores como la inequidad en el acceso a servicios públicos, la falta de ingresos, el crecimiento acelerado del sector industrial y la poca

regulación ante su huella ambiental y del control de emisiones, incrementan los niveles de vulnerabilidad y exposición de la población y su impacto negativo genera significativos niveles en la carga de enfermedad (9).

La preocupación por los desenlaces en salud relacionados con la contaminación del aire, llevó a que, en el año 1995, el Ministerio de Ambiente emitiera el decreto 948, que tuvo como objeto dar las pautas acerca de la normativa de calidad del aire, promover la instalación de redes de monitoreo de calidad del aire como principal herramienta para la lectura de concentración de los contaminantes, establecer los niveles permitidos establecidos para los contaminantes criterio y en relación con los sistemas de vigilancia en salud pública, establecer que brinden la información necesaria para que los tomadores de decisiones tomen acciones frente a esta problemática. El decreto 601 de 2006 y las posteriores modificaciones establecidas en el decreto 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente establecieron la norma de calidad del aire para todo el territorio nacional y los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio, contaminantes no convencionales y umbrales para sustancias generadoras de olores ofensivos, la elaboración de los programas de reducción de la contaminación y la declaración de los niveles de prevención alerta y emergencia. Finalmente, la resolución 2254 de 2017 definió la nueva norma de calidad del aire, ajustó los niveles máximos permisibles de los contaminantes y entró en vigencia en 2018.

En esta investigación se estudiará el caso del Municipio de Barrancabermeja, Santander, municipio conocido por ser la sede de la refinería de petróleo más grande del país y por su gran actividad industrial. Se realizará un estudio analítico, de tipo ecológico, de la calidad del aire para conocer cómo se comporta la asociación entre la exposición permanente de los habitantes a la contaminación y la morbilidad por infección respiratoria aguda. Se tomarán como base los promedios diarios de PM_{10} como referencia de exposición y la población menor de 5 años porque la infección respiratoria aguda es una de las principales causas de morbimortalidad y consulta a servicios de salud en este grupo de edad y se ve agravado por causas medioambientales. Adicionalmente, este grupo se puede considerar como una población homogénea en términos de desplazamientos y exposición a diferentes factores de riesgo por lo que facilita la medición de los efectos a causa de la contaminación del aire.

1. Antecedentes

1.1 Barrancabermeja

El municipio de Barrancabermeja pertenece al departamento de Santander, ubicado al occidente, al margen derecho del río Magdalena. Cuenta con una ubicación estratégica como punto central hacia los principales centros urbanos del país: Bogotá, Medellín y Barranquilla, con corredores estratégicos entre el norte y el sur del país y además entre la región Pacífica y Venezuela (11).

Se constituyó como municipio oficial el 26 abril de 1922. Solía ser un importante sitio de tránsito comercial, pero desde 1916, la explotación de petróleo la convirtió en una ciudad productiva-extractiva que desarrolló un sector terciario distorsionado. En el Magdalena Medio se encontraron los primeros pozos productivos. El inicio de los trabajos implicó diferentes tipos de acciones: adecuación de las vías de acceso (fluviales y terrestres), el desmonte de la selva para la construcción de carreteras, campamentos, bodegas, talleres, limpieza de las vías navegables, red de caminos para acceder a los pozos y la gente comenzó a desplazarse hacia la zona en busca de empleo y de esta forma comenzó a crecer el municipio y la población de forma acelerada (12).

Es la ciudad petrolera del país, donde se encuentra ubicada la refinería más grande de Ecopetrol. El territorio en que se localiza este municipio está conformado por dos tipos de organización de su asentamiento poblacional. Tiene un área central que ha sido la base de su desarrollo histórico, con un crecimiento moderado en la actualidad y un área periférica que ha tenido que ver con el desarrollo de la minería petrolera, principal actividad de la ciudad. Entre otros atractivos económicos se encuentran grandes fuentes hídricas

por la presencia de ciénagas y la llegada de afluentes de varios ríos, terrenos fértiles para la producción de cacao y palma de aceite, y también ganadería bovina y bufalina (13).

1.1.1 Características geográficas

La Tabla 1-1, muestra la información geográfica, climática e hidrográfica del municipio:

Tabla 1-1 Información geográfica de Barrancabermeja

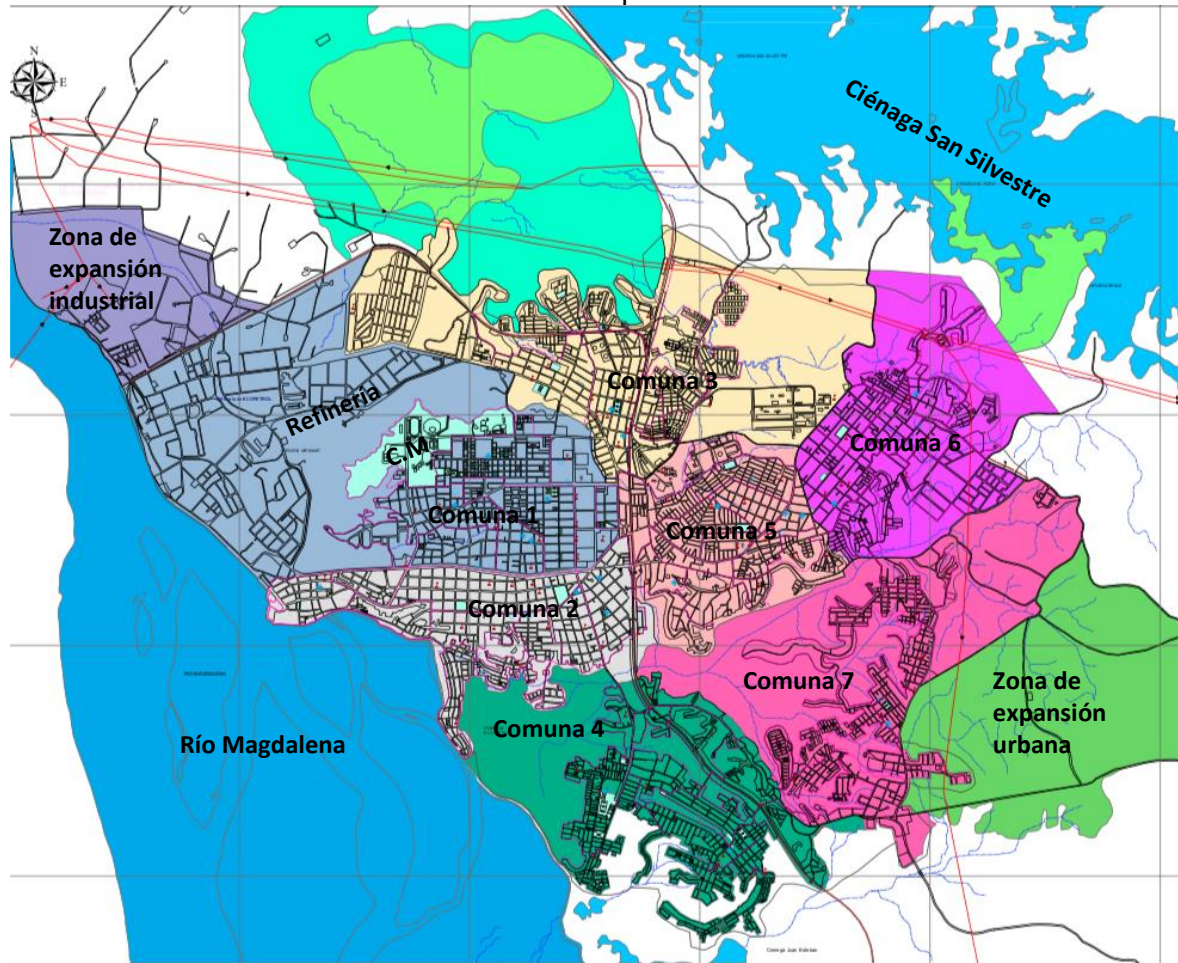
BARRANCABERMEJA		
Extensión Total	1.154 Kilómetros ²	
Área Urbana	26 Kilómetros ² , equivalente al 2,24%	
Área Rural	1.128 Kilómetros ² , equivalente al 97,76%	
Altura sobre el nivel del mar	Mínima	75.94 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)
	Máxima	150 m.s.n.m.
Límites	Norte	Municipio de Puerto Wilches
	Sur	Municipio de Puerto Parra, Simacota y San Vicente de Chucurí.
	Oriente	Municipio de San Vicente de Chucurí y Girón
	Occidente	Río Magdalena
Temperatura media anual y límites	Media	27,6° C
	Mínima	24° C
	Máxima	37° C
Evaporación Potencial	Mínima	0,50 – 2.000 mm
	Máxima	0,75 – 2.200 mm
Precipitación media anual	Mínima	2.000 mm/año
	Máxima	4.000 mm/año
	Periodos de lluvia	Marzo-junio y agosto-noviembre.
Actividad económica agrícola	Productos	Frutas tropicales, cítricos, plátano, ganadería bovina y bufalina
Coordenadas	Latitud	7° 03' 48" Norte
	Longitud	73° 51' 50" Oeste
Cuerpos de agua	Ciénagas	San Silvestre, El Llanito, Zapatero, Juan Esteban, Opón, Rosario, Miramar. Humedales: campo Galán y Berlín, Castillo.
	Caños y Quebradas	Lavanderas, Camelias, El Llanito, Cremosa, Zarzal, Vizcaína. Caños: San Silvestre, El Llanito y el Tigre.
Corregimientos		El Centro, La Fortuna, El Llanito, Meseta de San Rafael,

Fuente: ASIS municipal 2017, elaboración propia

Barrancabermeja está conformado por siete comunas y seis corregimientos. Cada una de las comunas está conformada por un número variable de barrios. La ubicación geográfica de las comunas, en el contexto global de Barrancabermeja se muestra en la Ilustración 1-1 y en la Fuente: Plan de desarrollo municipal 2016-2019

Tabla 1-2, el número de barrios por comuna y algunas características generales.

Ilustración 1-1 Distribución de la zona urbana por comunas



Fuente: Plan de desarrollo municipal 2016-2019

Tabla 1-2 Características de las comunas

Comuna	Descripción	Características	Número de barrios legalizados
1	Sector comercial	Colinda con la refinería de Ecopetrol. La más próxima al Río Magdalena. Sede del gobierno municipal, la fuerza pública, autoridades civil y eclesiástica, la casa de la cultura, la cámara de comercio, las cooperativas y el sector solidario. Más del 60% del comercio local.	24
2	Sector residencial	Amplia zona verde. Ciénaga Miramar Frente a la refinería	12
3	Sector residencial y parte de la zona industrial	Parte de la zona industrial de Ecopetrol	43
4	Barrios informales	Proyectos de vivienda de interés social e invasiones.	42
5	Sector residencial y parte de la zona industrial		31
6	Barrios informales		24
7	Barrios informales		30

Fuente: Plan de desarrollo municipal 2016-2019

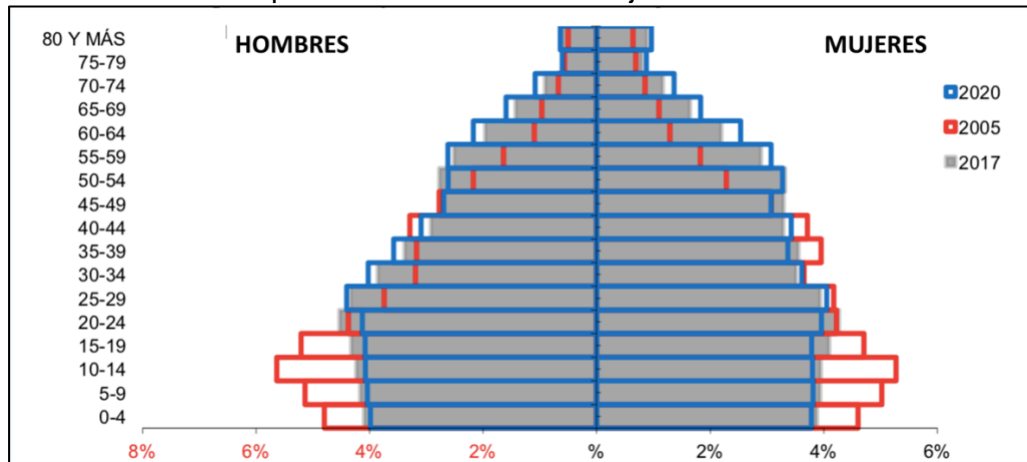
1.1.2 Características demográficas

La población de Barrancabermeja ha crecido desde el 2005, mayoritariamente hacia el área urbana, atribuido al aumento de la migración de la población en búsqueda de mejores oportunidades laborales o como consecuencia del desplazamiento forzado por el conflicto armado. El crecimiento poblacional se ve reflejado en el grado de urbanización del municipio que para el 2017 correspondió al 90,5% (173.380 habitantes) y una densidad poblacional de 166 habitantes por km². Para el 2019 las proyecciones del DANE estimaron una población total de 191.494 habitantes.

La Ilustración 1-2 muestra la pirámide poblacional, la cual tiene características de “pirámide de transición demográfica” que tiene un angostamiento progresivo de la base por la reducción en la natalidad y el aumento en la esperanza de vida – hombres 72,9 años,

mujeres 78,5 años -. La mayoría de la población se concentra entre los grupos de edad 20 a 24 años y 25 a 29 años y el 50,6% de la población son mujeres. La población menor de 5 años ha descendido de 11,3% en 2005 a 9,6% en 2017 (14).

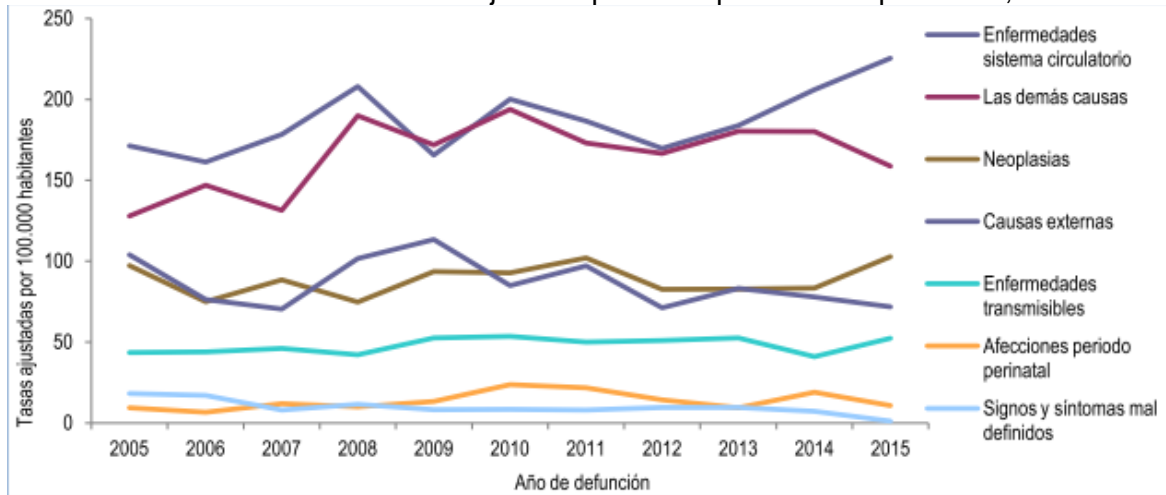
Ilustración 1-2 Pirámide poblacional Barrancabermeja



Fuente: ASIS municipal, 2017

1.1.3 Características de salud

La Ilustración 1-3 muestra la tasa de mortalidad general ajustada por edad para toda la población entre los años 2005-2015, en la que predominan las enfermedades del sistema circulatorio con una tasa ajustada de 225,4 muertes por 100.000 habitantes. Al comparar las tasas ajustadas por sexo hubo mayor mortalidad en los hombres durante el mismo período, representando un 63% y las enfermedades del sistema circulatorio fueron la primera causa de muerte correspondiendo a 278,5 muertes por 100.000 hombres y 183,5 muertes por 100.000 mujeres.

Ilustración 1-3 Tasa de mortalidad ajustada por edad para toda la población, 2005-2015

Fuente: ASIS municipal, 2017

La Tabla 1-3 muestra las causas de mortalidad por subgrupo para toda la población y los dos principales enfermedades por cada uno.

Tabla 1-3 Causas de mortalidad por subgrupo para toda la población, 2005-2015

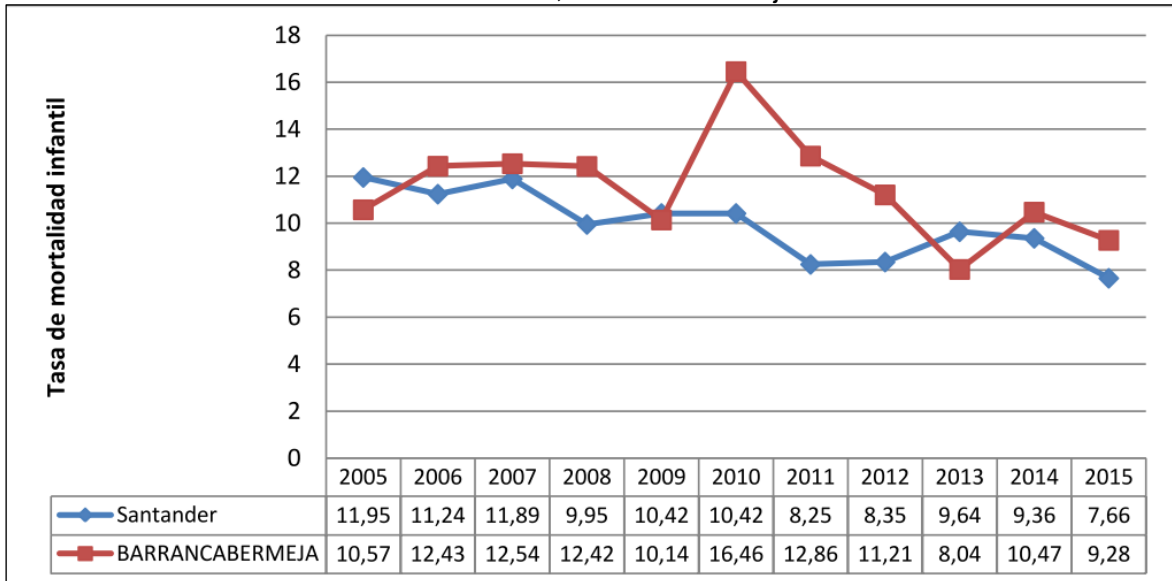
Subgrupo	Enfermedades
Enfermedades transmisibles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Infecciones respiratorias agudas ▪ Enfermedad producida por VIH/SIDA
Neoplasias	<ul style="list-style-type: none"> ▪ “Tumores malignos de otras localizaciones y de las no especificadas” ▪ “Tumor maligno de los órganos digestivos y del peritoneo, excepto estómago y colon”
Enfermedades del sistema circulatorio	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enfermedad isquémica del corazón. ▪ Enfermedad cerebrovascular.
Causas externas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agresiones (homicidios). ▪ Accidentes de transporte terrestre.
Todas las demás enfermedades	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores. ▪ Diabetes mellitus.

Fuente: ASIS municipal 2017, elaboración propia

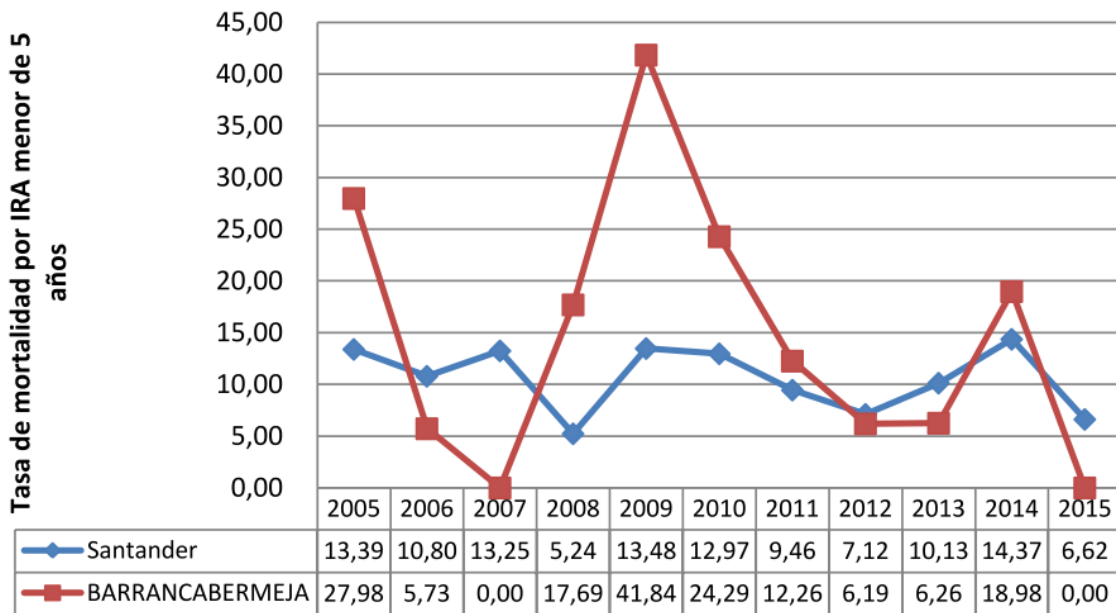
La Ilustración 1-4 muestra la tasa de mortalidad infantil durante los años 2005 a 2015 la cual ha presentado una disminución progresiva pero que continúa siendo superior a la tasa

departamental. En niños menores de 1 año la primera causa de muerte fue “ciertas afecciones originadas en el periodo perinatal”, en el grupo de 1-4 años la principal causa de muerte fue por “tumores (neoplasias)” y en menores de 5 años la primera causa de defunción fue por “malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas”. Respecto a la mortalidad por IRA en menores de 5 años, la Ilustración 1-5 muestra la tasa de mortalidad infantil por 100.000 menores de 5 años que, en el 2005 y entre los años 2008 y 2010 fue significativamente superior a la tasa departamental. No hubo muertes en 2015.

Ilustración 1-4 Tasa de mortalidad infantil, Barrancabermeja 2005-2015



Fuente: ASIS municipal 2017

Ilustración 1-5 Tasa de mortalidad por IRA en menores de 5 años, 2005-2015

Fuente: ASIS municipal 2017

Respecto a la morbilidad atendida, para el 2016 en el grupo de edad menores de 5 años las principales causas fueron:

- Condiciones transmisibles y nutricionales: 38,97%
- Enfermedades no transmisibles: 38,38%
- Condiciones mal clasificadas: 17,11%
- Lesiones: 4,3%
- Condiciones materno-perinatales: 0,72%

A comparación del 2014, las enfermedades no transmisibles tuvieron un aumento de 3,04% en el número de consultas mientras que las condiciones transmisibles y nutricionales se redujeron en 1,96%.

Dentro de la morbilidad por subgrupos, en el subgrupo de condiciones transmisibles y nutricionales la principal causa fueron las infecciones respiratorias que tuvieron un incremento del 1,04% para el año 2016 con relación al año 2015.

1.1.4 La refinería de Barrancabermeja

En 1920 comenzó la construcción de un complejo industrial por la compra de la Tropical Oil Company por parte de la Standard Oil Company. Se amplió el número de pozos perforados, se elaboró una red de oleoductos, se construyeron grandes tanques de depósito y se ensambló una pequeña refinería, se ensanchó la red de caminos y se construyó una línea de ferrocarril para unir Barrancabermeja con El Centro. El aumento de mano de obra para la realización de estos trabajos requirió un mayor número de campamentos y obras de saneamiento inaplazables (acueducto y alcantarillado), casinos y servicios de salud.

La Tropical Oil Company, influyó en la creación del municipio para tener ventajas administrativas sobre la explotación de petróleo, influyendo en la vida del municipio y se convirtió en la sede de la refinería más grande del país y de importante industria petroquímica, así como cruce de oleoductos, poliductos y gasoductos. No se ha podido aprovechar todo el potencial de este sector económico en Colombia, ya que los beneficios se fueron fundamentalmente para el extranjero y el centro del país. El estado falló porque nunca supo utilizar el gran papel del petróleo para aprovechar su demanda de bienes y servicios para impulsar la industria colombiana.(12)

La refinería de petróleo de Barrancabermeja es la más grande de Colombia y pertenece a la empresa estatal Ecopetrol, esta comenzó a funcionar hace 95 años y gran parte de la economía de la ciudad gira en torno a la industria petroquímica. En este complejo industrial laboran 1.695 personas, opera un área de 300 hectáreas en donde se realizan procesos de transformación de crudo en productos valiosos, cuenta con 49 unidades de proceso, 290 tanques de almacenamiento y nueve unidades de servicios industriales que lo convierten en el principal proveedor energético nacional y de abastecimiento interno de combustibles derivados del país (13,15). Hasta hace 16 años la refinería únicamente procesaba crudos livianos, pero a consecuencia del mayor hallazgo de crudos pesados y extrapesados en Colombia, ahora estos se procesan con mayor cantidad, aproximadamente 250.000 barriles de petróleo al día. Adicionalmente, luego de la instalación de una planta de hidrot ratamiento para gasolina y diésel ahora se producen combustibles con menor contenido de azufre.

Sin embargo, la estructura de la refinería fue diseñada para el procesamiento de crudos livianos, por lo que se necesitaba un plan de modernización, pero con la baja del precio del crudo estos planes fueron suspendidos y como consecuencia de esto se ha reducido su eficiencia y hay mayores problemas de contaminación por la emisión de sustancias tóxicas que contaminan el aire y las fuentes hídricas del municipio.

1.1.5 Monitoreo de la calidad del aire en Barrancabermeja

Un sistema de vigilancia de la calidad del aire (SVCA) consiste en un conjunto de equipos de monitoreo instalados que tienen como objetivo determinar las concentraciones ambientes o nivel de inmisión de contaminantes atmosféricos de determinadas regiones o áreas en un periodo de tiempo determinado (16).

En Colombia, casi el 50% de la población vive en zonas urbanas de más de 100.000 habitantes, lo cual produce sustanciales efectos agregados en la salud que están relacionados principalmente con el material particulado (17). A pesar de conocer estas consecuencias, existen 204 estaciones de monitoreo ubicadas en 91 municipios de 22 departamentos de las cuales únicamente 87 cumplen con los criterios de medir la calidad del aire el 75% de los días del año (18). Las concentraciones de contaminantes deben ser medidos en lugares sometidos a vigilancia que sean representativos de la exposición de la población.

Barrancabermeja cuenta con un SVCA tipo II – básico indicado para poblaciones de entre 150.000 a 500.000 habitantes que monitorea los contaminantes criterio establecidos por la resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente. Este sistema tiene como objetivos:

1. Determinar el cumplimiento de las normas nacionales de calidad del aire.
2. Evaluar las estrategias de control de las autoridades ambientales.
3. Observar las tendencias a mediano y largo plazo.
4. Evaluar el riesgo para la salud humana.
5. Determinar los posibles riesgos para el medio ambiente.
6. Activar los procedimientos de control en situaciones de emergencia.
7. Estudiar fuentes e investigar quejas concretas.

8. Soportar investigaciones científicas.

En las estaciones se monitorean los contaminantes criterio (PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO , O_3) establecidos por la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente y sensores meteorológicos, entre ellos dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, radiación solar, presión barométrica y pluviometría; el monitoreo meteorológico es de gran ayuda por la influencia que tiene el clima en la dispersión y concentración de los contaminantes (19).

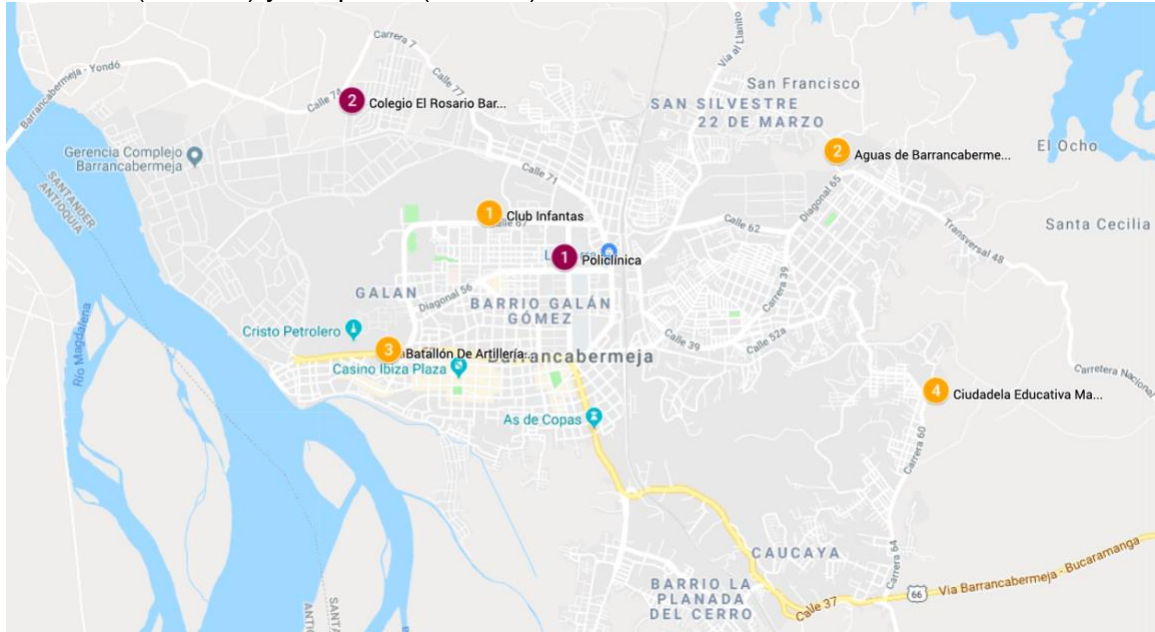
Entre los años 2011 y 2013 el monitoreo de la calidad del aire estuvo a cargo de la Secretaría de Ambiente. En ese entonces el SVCA contaba con 3 estaciones fijas automáticas (Club Infantas, Aguas de Barrancabermeja y BAEV 7: Batallón especial energético y vía) y una estación móvil (ubicada en la Ciudadela Educativa del Magdalena Medio) que monitoreaban SO_2 , NO_2 , CO , O_3 , hidrocarburos, material particulado y sensores meteorológicos (dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, radiación solar, presión barométrica y pluviometría). Este SVCA dejó de funcionar por falta de presupuesto para el mantenimiento de las estaciones, pero con la asignación de \$351 millones de pesos por parte de la Corporación Autónoma de Santander (CAS), se reactivará el SVCA para el cual ya inició el diagnóstico (20).

Entre los años 2014 y 2016 Ecopetrol efectuó el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en el área de influencia de sus operaciones también con un SVCA tipo II – Básico. Este SVCA es automático y la frecuencia de monitoreo es diaria. Cuenta con dos estaciones fijas para el monitoreo de PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO , O_3 (Colegio El Rosario, Centro de atención local Policlínica), el monitoreo de las variables meteorológicas para el 2014 continuó a cargo de la Secretaría de Ambiente, pero para los años 2015 y 2016 fue efectuada por Ecopetrol. La información generada se transmite a una central de almacenamiento de información, luego se realiza el procesamiento de los datos y finalmente se validan para ser enviados a la autoridad ambiental.

Adicionalmente, se localizan las estaciones meteorológicas del IDEAM en los siguientes puntos: Aeropuerto Yariguies, Corregimiento El Centro, Chucurí y La Putana. Las estaciones Aeropuerto Yariguies y corregimiento El Centro disponen de información de velocidad y dirección del viento y precipitación. Las estaciones de Chucurí y La Putana

solo tienen información pluviométrica. La información de calidad del aire no se encuentra disponible en el SISAIRE.

Ilustración 1-6 Ubicación de las estaciones de monitoreo de los SVCA. Secretaría de ambiente (amarillo) y Ecopetrol (morado)



Fuente: Google Maps, elaboración propia

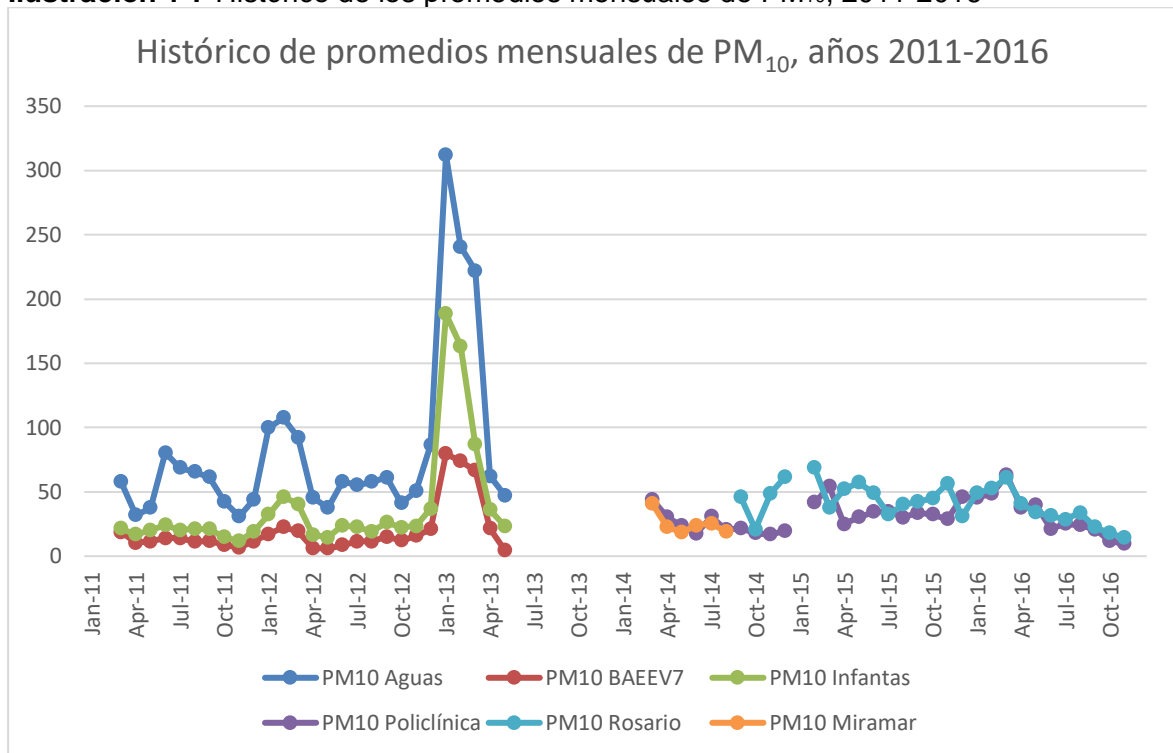
1.1.6 Contaminación del aire en Barrancabermeja

El problema de la calidad del aire en Barrancabermeja se ha dado a conocer principalmente a través de los noticieros y emisoras. Los habitantes consideran, sin ninguna prueba de carácter científico, que la composición y calidad del aire es percibida por los malos olores en el medio ambiente, supuestamente causadas por las emisiones de la Refinería de Ecopetrol, además de la quema de potreros y residuos, de las emisiones producidas por carros, motos y lanchas. En épocas de verano, los olores aumentan ya que las ciénagas y el río disminuyen su nivel de agua (21), lo que dificulta saber el origen del mayor contaminante.

Al hacer una revisión de los boletines mensuales de la Secretaría de Ambiente de Barrancabermeja a los que se tuvo acceso, correspondientes a los años 2011 y 2012, se destaca que los contaminantes que solían tener mayores excedencias eran el PM₁₀ y el PM_{2.5} casi todas justificadas por el mal estado de las vías.

La Ilustración 1-7 muestra el histórico de los promedios mensuales del PM₁₀ de las dos redes de monitoreo del municipio. Se puede observar que existen valores mucho más altos registrados por la red de monitoreo de la Secretaría de Ambiente, especialmente los datos que fueron captados por la estación Aguas de Barrancabermeja (estación amarilla No. 2 de la Ilustración 1-6) durante el 2012.

Ilustración 1-7 Histórico de los promedios mensuales de PM₁₀, 2011-2016



Fuente: elaboración propia a partir de los datos de las fuentes de monitoreo

Los artículos de prensa del periódico regional Vanguardia y otros medios de comunicación de cobertura nacional han informado sobre la contaminación del aire y las denuncias que han hecho los habitantes acerca de emisiones provenientes principalmente de la refinería en forma de “catalizador”, que durante el arranque de la planta después de una parada, que se presenta casi siempre en las noches o cuando llueve. Esto se da en las plantas de “craqueo catalítico” que producen gasolina en la refinería local. Esta emisión consiste en material particulado de catalizador que no es humo sino un polvillo blanco. Este polvillo blanco recubre las superficies y genera molestias inmediatas como congestión nasal, irritación de los ojos y la garganta y tos (22).

1.2 Aspectos normativos

Las Guías de Calidad del Aire de la OMS actualizadas por última vez en el 2005, recomendaron unos niveles máximos permisibles para cuatro contaminantes comunes del aire (Tabla 1-4) que tienen efectos en la salud y, por lo tanto, adquieren relevancia dentro de la salud pública. Estos límites se encuentran sujetos a modificaciones por parte de los gobiernos de cada país, ajustándolos a las condiciones locales propias (6).

Tabla 1-4 Límites permisibles recomendados por la OMS

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	20	Anual
	50	24 horas
PM _{2.5}	10	Anual
	25	24 horas
O ₃	100	8 horas
NO ₂	40	Anual
	200	Hora
SO ₂	20	24 horas
	500	10 minutos

Fuente: Adaptado de la guía de calidad del aire OMS (2005)

Cuadro 1-1 Normatividad relacionada con calidad del aire en Colombia

Decreto 02 de 1982	Por el cual se reglamentan parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979 y el Decreto Ley 2811 de 1974, en cuanto a emisiones atmosféricas.
Decreto 2206 de 1983	Por el cual se sustituye el Capítulo XVI de la vigilancia, el control y las sanciones, del Decreto No. 02 de 1982 sobre emisiones atmosféricas.
Decreto 948 de 1995	Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire, de alcance general, y aplicable a todo el territorio nacional.
Decreto 979 de 2006	Por el cual se modifican los artículos 7,10, 93, 94 y 108 del Decreto 948 de 1995.
Resolución 601 de 2006	Establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, con el propósito de garantizar un ambiente sano y minimizar los riesgos sobre la salud humana que puedan ser causados por la concentración de contaminantes en el aire ambiente.
Resolución 610 de 2010	Establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. Ajustes a la resolución 601 de 2006.

Resolución 651 de 2010	Crear el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE como fuente principal de información para el diseño, evaluación y ajuste de las políticas y estrategias nacionales y regionales de prevención y control de la contaminación del aire.
Resolución 2154 de 2010	Modifíquese el Protocolo del Monitoreo y Seguimiento de Calidad del Aire, adoptado a través de la Resolución 650 de 2010.
Resolución 2254 de 2017	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire con nuevos niveles permisibles para los contaminantes criterios y se dictan otras disposiciones. Vigente desde julio de 2018.

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)

La Tabla 1-5 indica los niveles máximos permisibles de los contaminantes criterio establecidos por la norma nacional de calidad del aire.

Tabla 1-5 Norma nacional de calidad del aire

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM₁₀	50	Anual
	75	24 horas
PM_{2.5}	25	Anual
	37	24 horas
SO₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO₂	60	Anual
	200	1 hora
O₃	100	8 horas
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Fuente: Resolución 2254 de 2017, MADS

En el año 2017, la resolución 2254 del Ministerio de ambiente, estableció unos nuevos niveles máximos permisibles para un tiempo de exposición de 24 horas PM₁₀ (75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y PM_{2.5} (37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) que entraron en vigencia el 1 de julio de 2018.

1.3 Enfoque conceptual

El proceso salud-enfermedad puede ser abordado a partir de diferentes modelos conceptuales. El modelo de la OMS es un modelo explicativo-interpretativo que pretende buscar causalidad, pero también visibilizar y explicar las inequidades, reconociendo jerarquías y responsabilidades diferenciales importantes (23).

Define los determinantes sociales de la salud como las circunstancias en que las personas nacen, crecen, trabajan, viven y envejecen, incluido el conjunto más amplio de fuerzas y sistemas que influyen sobre las condiciones de la vida cotidiana. Idealmente, estas circunstancias encaminarían a las sociedades hacia un desarrollo sostenible que influya positivamente en la cobertura y acceso universal de la salud (24).

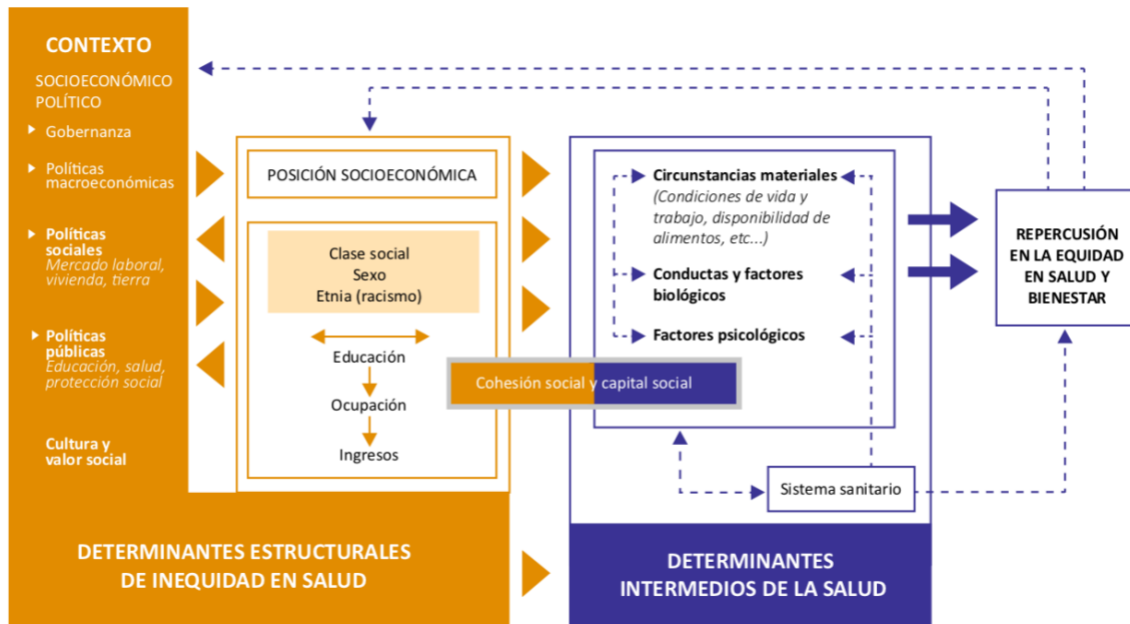
La mayoría de los problemas de salud trascienden al sector salud y se originan desde problemas sociales, económicos, estructurales y ambientales. Por esta razón, el modelo de determinantes se considera que es una manera sumamente eficaz de abordar los problemas en salud desde un enfoque intersectorial.

El sistema de salud colombiano se constituye en la actualidad, en el modelo de determinantes sociales y ambientales de la OMS como un determinante intermedio, es decir, está dado y explicado por un modelo de desarrollo económico, social y político.

En el 2005, la OMS creó la Comisión sobre Determinantes Sociales de la Salud, con el objetivo de influir a través de políticas y programas, sobre aquellos determinantes que fomentan la equidad sanitaria, además para mitigar las desigualdades y la injusticia social que de forma directa o indirecta tiene un impacto sobre la salud y calidad de vida de las personas.

Los componentes básicos del marco conceptual de los determinantes sociales de la salud reconocen una jerarquía de procesos como lo muestra la Ilustración 1-8 e incluyen (23):

Ilustración 1-8 Modelo de Determinantes Sociales de la Salud, OMS



Fuente: Informe Desigualdades sociales en salud en Colombia, ONS

- **Determinantes estructurales:** Tienen su origen en el contexto político y socioeconómico, el escenario en el que se definen los mecanismos que generan, configuran y reproducen los sistemas de estratificación social. Está dado por la posición social de la persona, la macroeconomía, etnicidad, normas culturales, ingresos, educación y ocupación.
- **Determinantes intermedios:** Proviene de la configuración de estar bajo una estratificación social y a su vez, determinan las diferencias en la exposición y vulnerabilidad de la salud que compone las condiciones. Se incluyen los recursos materiales, factores psicosociales, factores conductuales, biológicos y servicios sanitarios.
Dado por las exposiciones y vulnerabilidades diferenciales de los grupos poblacionales como el familiar, escolar, laboral o social de la persona, el cual trata de las condiciones materiales en las que viven los individuos, familias y comunidades.
- **Determinante proximal:** representado por factores de riesgo individual, como las morbilidades de base, la edad, carga genética, el sexo y la etnia. Sin embargo, el sexo o el género también pueden ser determinantes estructurales, en la medida que modifiquen la posición social de la persona y se traduzcan en una desventaja social o en el acceso y utilización de los servicios de salud.

Los determinantes ambientales son entendidos como las interacciones entre el ser humano y su entorno, han sido considerados como uno de los más importantes determinantes de la salud poblacional, tanto por los impactos que producen como por su dimensión. Se considera que las condiciones ambientales se ubican en los niveles estructurales, intermedios y proximales y que éstos corresponden jerárquicamente con diferentes niveles poblacionales, o sea, a nivel de la sociedad (modos de vida), a nivel de comunidades (condiciones de vida) y a nivel de los individuos (estilos de vida) (25).

Dentro del modelo de determinantes sociales se incluye la metodología de fuerzas motrices, de Corvalán et. al (26) para abordar los factores que influyen en la relación ambiente-salud desde la estructura jerarquizada y ofrece acciones en cada uno de los niveles de la cadena causal que tienen desenlace a nivel individual y poblacional, principalmente a través de la política pública. Representan las cuestiones más generales que están por detrás del modelo de desarrollo adoptado por la sociedad y que propician las actividades de contaminación o degradación (27). Se considera que el ambiente se encuentra dentro de los tres niveles que plantea el modelo de la OMS y jerarquizar su abordaje permite una mejor comprensión de la relación ambiente y salud y salud/enfermedad ambiental.

La metodología de fuerzas motrices propone los siguientes factores:

1. Fuerza motriz: son las condiciones de carácter tanto sociales como económicas, como demográficas, que afectan las condiciones ambientales en un territorio específico.
2. Presiones: son las manifestaciones concretas de las fuerzas motrices o el cómo se expresan las fuerzas motrices. Por ello, hacen referencia a las fuerzas económicas y sociales que de manera explícita se aplican en un territorio concreto. Se pueden identificar dos tipos de presiones, las antrópicas y las naturales.
3. Estado: es la condición y la calidad del ambiente. Específicamente se refiere a la situación del capital natural que resulta de las presiones que los procesos de desarrollo imponen sobre la contaminación concreta del aire, agua y suelo.
4. Exposición: se refiere a las vías, rutas y modos a través de los cuales entra en contacto el riesgo ambiental con el ser humano y, además, da cuenta de la frecuencia y la intensidad de dicho contacto.

5. **Efecto:** se refiere a las consecuencias en la salud de la población, que se expresan en la morbilidad, mortalidad evitable, afectaciones, discapacidad o letalidad.
6. **Acciones:** identificación de políticas y medidas efectivas para controlar y prevenir los desenlaces en salud interviniendo en cada uno de los niveles.

En Colombia, factores como la inequidad en el acceso a servicios públicos, la falta de ingresos, el crecimiento acelerado del sector industrial y la poca regulación de la huella ambiental incrementan los niveles de vulnerabilidad los cuales generan una exposición diferencial a los efectos que tiene la contaminación del aire sobre la salud de los seres humanos, que se ve marcada negativamente por la posición social, los modos de vida, representando aumento significativo de la carga de enfermedad por causas ambientales (9).

Sumado a esto, el índice Gini de 0,51 para 2015 y de 0,508 para 2016, expresa la marcada desigualdad que existe y que sienta un precedente en la necesidad de generar acciones en cada uno de los niveles de fuerzas motrices que sean efectivos para controlar y prevenir los desenlaces en salud y que permitan garantizar las mejores condiciones de salud para la población.

Diferentes estudios epidemiológicos han demostrado que el tiempo que los individuos están expuestos a contaminantes, aunado a sus patrones de conducta y los microambientes en los que se desenvuelven, en el trabajo o en el hogar, constituyen factores que pueden provocar enfermedades y muertes prematuras. La exposición en cada microambiente es el producto de la concentración del contaminante en particular por el tiempo que la persona permanece en dicho espacio y los promedios de concentración ambiental diaria es una aproximación a la exposición real de la persona. Estas afectaciones dependerán también de sus vulnerabilidades, tales como predisposición genética, edad, estado nutricional, o presencia de padecimientos cardíacos y respiratorios (5,27).

La necesidad de tomar acciones integradas en todos los niveles del modelo de fuerzas motrices, están dirigidas a reducir las fuerzas que generan daño ambiental y amenazas en salud. Estas acciones benefician tanto la protección ambiental como la salud de los seres humanos de acuerdo con lo planteado en los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Identificar la posible relación entre la contaminación del aire por PM₁₀ e infección respiratoria aguda en la población menor de 5 años de Barrancabermeja, Santander, entre los años 2014 y 2016, con base en los datos registrados por la red de monitoreo de calidad del aire de Ecopetrol y la notificación de morbilidad por infección respiratoria aguda en ese grupo de edad.

2.2 Objetivos específicos

1. Evaluar la calidad de los datos de contaminación del aire por PM₁₀ monitoreados.
2. Describir los datos para infección respiratoria aguda notificados a la Secretaría de Salud de Barrancabermeja, solicitados para el grupo de edad menores de 5 años, entre enero de 2014 y noviembre de 2016 y analizar su tendencia en el tiempo y su relación con otras variables.
3. Determinar cómo se comporta la relación entre contaminación del aire por PM₁₀ e infección respiratoria e interpretar los resultados con base en el modelo de determinantes sociales de la salud de la OMS.

3. Metodología

Este es un estudio ecológico y analítico desarrollado en el municipio de Barrancabermeja, Santander, enfocado en la población menor de 5 años entre 2014 y 2016.

El Cuadro 3-1 contiene las variables de estudio, sus características principales y fuentes de los datos. La información se obtuvo de fuentes secundarias.

Cuadro 3-1 Caracterización de las variables de estudio

Variable	Características
Valores de contaminantes criterio monitoreados por las dos estaciones de Ecopetrol durante los años 2014-2016.	<ul style="list-style-type: none">▪ Independiente.▪ Cuantitativa, continua.▪ Expresa la concentración promedio del contaminante ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en un periodo de 24 horas.▪ Fuente de los datos: RMCA Ecopetrol.
Variables meteorológicas	<ul style="list-style-type: none">▪ Independiente.▪ Cuantitativa continua.▪ Expresan las variaciones de temperatura, velocidad y dirección del viento, y precipitación.▪ Fuente de los datos: RMCA Ecopetrol e IDEAM.

Casos de IRA notificados para el grupo de “menores de 5 años” durante los años 2014-2016.	<ul style="list-style-type: none">▪ Dependiente.▪ Cuantitativa, discreta, de conteo.▪ Expresa el número de casos de IRA que se presentan por cada semana epidemiológica.▪ Fuente de los datos: SIVIGILA.
---	---

Antes de realizar el análisis de los contaminantes y los eventos de IRA se seleccionó un área de influencia para cada estación de monitoreo a partir de un radio de 1 kilómetro a la redonda con *Google Earth*, con el fin de identificar fuentes de contaminación, localización de las UPGD y otras condiciones del territorio que pudieran influir en la contaminación.

3.1 Análisis de los contaminantes criterio establecidos por la norma de calidad del aire y de las variables meteorológicas

El contaminante principal de este estudio es el PM₁₀, pero al revisar la información suministrada por Ecopetrol, las bases de datos de la RMCA también contenían información de los promedios diarios de los siguientes contaminantes: SO₂, NO₂, O₃ y CO y variables meteorológicas por lo que se decidió hacer el análisis descriptivo de todas y así proporcionar información más completa del estado de la calidad del aire del municipio. Ecopetrol informó que todos los valores de los contaminantes criterio se encontraban reportados según las condiciones de referencia de presión y temperatura (25 °C y 760 mm Hg) tal como lo indica la resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente y estaban registrados desde el 27 de febrero de 2014 hasta el 30 de noviembre de 2016 con algunos días sin registros.

Las variables meteorológicas tienen dos efectos en la contaminación del aire. Por un lado, la temperatura, humedad, presión y altitud provocan condiciones atmosféricas inestables, con presencia de inversiones térmicas que hacen que las partículas a nivel del suelo se concentren por más tiempo, afectando la calidad del aire de las zonas urbanas. Por otro

lado, la lluvia arrastra las partículas gruesas y solubles, reduciendo parcialmente la contaminación del aire y trasladando las partículas al suelo y otras superficies.

Las variables meteorológicas: temperatura, velocidad y dirección del viento, presión barométrica, humedad y precipitación provenían solo de la estación Policlínica y el monitoreo se encontraban registrados cada media hora desde el 29 de enero de 2015 hasta el 21 de noviembre de 2016.

Al no disponer de ningún dato para el año 2014, se solicitó al IDEAM la información de precipitación y temperatura media para los tres años con el fin de obtener información completa que proviniera desde una sola fuente.

Con base en el documento Implementación del paquete *Openair* del software estadístico R (28), se tomaron los mismos criterios de depuración de información para obtener un análisis más acertado:

1. Selección de las estaciones de la RMCA que se encuentran activas, en este caso las estaciones Rosario y Policlínica de Ecopetrol.
2. Periodo histórico de las estaciones seleccionadas, correspondiente a los años donde hay una adecuada coincidencia entre ellas en el volumen de información para realizar los comparativos.
3. Porcentaje de captura mayor al 75% para la concentración de contaminantes, de tal manera que exista una cantidad representativa de información por año.
4. Recomendaciones de la Guía práctica para la validación de datos en los Sistemas de Vigilancia de Calidad del aire – SVCA existentes en Colombia -GPSV para análisis de contaminantes del IDEAM.

La estadística descriptiva de las variables se calculó con un nivel de confianza del 95% y el número de excedencias respecto al límite en 24 horas establecido por las normas nacionales – Resolución 610 de 2010 y Resolución 2254 de 2017 - y OMS se hizo con Excel. Para analizar la tendencia de los contaminantes, visualizar los días con mayores niveles de contaminación y la rosa de vientos, se usó el paquete estadístico *Openair* de R (29). Las funciones usadas fueron:

- *SummaryPlot*: generó las gráficas donde se muestran los valores estadísticos más importantes de los datos analizados, la franja azul clara indica los valores captados por la estación y la franja roja indica los valores faltantes. Las gráficas que se encuentran a la derecha corresponden a los histogramas de los datos.
- *WindRose*: Graficó la rosa de vientos por meses y anual.
- *Timevariation*: permitió ver la tendencia del PM₁₀ por días de la semana y por meses. Normaliza los valores de las medias de los datos y los estima con una confiabilidad del 95%.
- *Calendarplot*: muestra en un calendario el promedio diario de concentraciones de PM₁₀ y resalta las excedencias de PM₁₀ con respecto al índice de calidad del aire (ICA) del IDEAM. Las convenciones del ICA se definieron previamente.

3.2 Análisis de los eventos de morbilidad por IRA en la población menor de 5 años para los años 2014 a 2016

Para analizar los eventos de morbilidad por IRA en el grupo de edad “menores de 5 años” para los años 2014 a 2016, se solicitó la información a la Secretaría de salud de Barrancabermeja que cuenta con las bases de datos de SIVIGILA que se reportan con base en la ficha de notificación Morbilidad por IRA - Código INS 995. Al revisar las bases de datos se verificó que todos los años tuvieran datos diligenciados para todas las semanas epidemiológicas y que los datos de cada variable correspondieran con los de la ficha. SIVIGILA es el sistema oficial de vigilancia que certifica la calidad de los datos.

Se utilizó el programa estadístico R versión 3.6 para analizar y depurar las bases de datos. Primero se hizo filtro para obtener: semana epidemiológica, notificación por tipo de consulta y por grupo de edad ya que debía formar una única variable sumando los grupos de edad (menores de 1 año, 1 año y 2 a 4 años), luego se hizo la suma del total de casos por semana epidemiológica. Se hizo el análisis estadístico, se elaboraron las curvas epidémicas para cada año y se graficaron las tendencias de los casos por mes con Excel.

3.3 Modelo Aditivo Generalizado (GAM)

Las series de tiempo son modelos de regresión que miden las variables dependientes e independientes en el tiempo, con el propósito de modelar la relación existente entre estas variables y son la metodología indicada para estudiar las relaciones complejas entre exposiciones ambientales y desenlaces en salud.

Existen distintos modelos de series de tiempo, dentro de estos, los modelos aditivos generalizados (GAM por sus siglas en inglés), representa un método para ajustar la relación fluida entre dos o más variables y son útiles para correlaciones complejas que no se ajustan fácilmente con modelos estándar lineales. Una de las principales ventajas del GAM es que ofrece una gran flexibilidad para representar las relaciones entre la variable dependiente y las variables explicativas.

Los GAM son una extensión de los modelos lineales generalizados en donde la distribución de la variable dependiente o variable respuesta se relaciona con la combinación lineal de las covariables y reemplaza las funciones de dependencia lineal por funciones no lineales más flexibles y las dependencias generalmente se presentan mediante funciones de suavizado no paramétricas. Con este tipo de modelo también es posible introducir factores de confusión medidos y no medidos, que podrían confundir la relación entre el resultado y los predictores.

Consta de tres componentes: el componente aleatorio de la variable respuesta que sigue una distribución de la familia exponencial; el componente sistemático que son las variables explicativas y una función de enlace que relaciona la variable respuesta con las explicativas. En nuestro caso la función de enlace fue el logaritmo natural o neperiano, base e, que en R se simboliza como *log*. Las distribuciones de la familia exponencial que surgen de la forma general son: normal, binomial, gamma, poisson, geométrica, binomial negativa y exponencial, las que son obtenidas por el reemplazo adecuado de los parámetros en la función. El suavizado consiste en crear una función polinomial que resuma la tendencia de los datos, le dé continuidad a la función en sus dos primeras derivadas y genere una aproximación suave. Los métodos de suavización resultan ser los más adecuados cuando la distribución de una variable no sigue una tendencia lineal y para aproximar cualquier función particular a partir de una base de funciones que superpuestas o sumadas genere la función deseada. Por esta razón, para poder predecir valores futuros

se requiere hacerlo directamente con el software y no a través de una función matemática explícita.

No se incluye toda la explicación matemática del modelo porque se sale del alcance del presente trabajo, no obstante, el software R contiene los programas que ejecutan las operaciones necesarias para modelar los datos, por lo que no es necesario hacer operaciones previas para aplicar el modelo. Para el lector interesado se citan las referencias. (30–33).

Construcción del modelo:

1. Las variables que se incluyeron en el modelo hacen referencia a la misma unidad de tiempo: semana epidemiológica.
2. Obtención de los datos y transformación de variables:
 - **IRA:** Se obtuvieron de la base de datos del SIVIGILA que fue solicitada a la Secretaría de Salud de Barrancabermeja. La base de datos tenía la información completa y correctamente diligenciada para todas las semanas epidemiológicas según la ficha de la ficha de notificación Morbilidad por IRA - Código INS 995. Unidad de tiempo: semana epidemiológica.
 - **PM₁₀:** Se obtuvieron los promedios diarios del contaminante de dos estaciones, Policlínica y Rosario. Para la estación Policlínica había datos registrados desde el 27 de febrero de 2014 hasta el 30 de noviembre de 2016 y para la estación Rosario desde el 30 de enero de 2015 hasta el 30 de noviembre de 2016.
Inicialmente se había considerado combinar los datos de las dos estaciones con el promedio, pero como la estación Rosario tenía muchos datos faltantes y pocos datos totales solo se utilizaron los de la estación Policlínica. Los datos de las dos estaciones de monitoreo no tenían relación geográfica con los casos de IRA, debido a que se contrastaron con los mismos valores de IRA sin discriminar la posición espacial. Los valores diarios se pasaron a promedios semanales por semanas epidemiológicas teniendo como referencia las fechas que indicaban los calendarios epidemiológicos para cada año.
 - **Precipitación y temperatura media:** Los datos de estas dos variables se obtuvieron de la estación meteorológica del aeropuerto de Barrancabermeja a través del IDEAM. Para temperatura se encontraban los valores máximos y mínimos por día, por lo que

se promediaron por día y después se promediaron por semana epidemiológica de la misma forma que el PM_{10} .

La variable de precipitación se transformó a semana epidemiológica como los acumulados por semana.

3. La variable dependiente (respuesta) son los casos de IRA, la cual sigue una distribución Poisson, $P(\lambda)$, donde el parámetro λ corresponde al número de casos notificados por semana epidemiológica, representa el componente aleatorio de la variable respuesta, en donde los casos de IRA no todos dependen de las variables predictoras que hemos escogido para el análisis. El otro componente de la variable IRA es función de las covariables o variables predictoras. Este doble carácter de la respuesta IRA es el que permite la utilización del modelo GAM.
4. Variables explicativas o predictoras: son los promedios semanales de PM_{10} , temperatura media y precipitación. Las variables de ajuste, temperatura y precipitación se tomaron porque se ha observado en diferentes estudios una relación entre éstas y las infecciones respiratorias agudas; además, de haber presentado correlación en el ajuste del modelo, tal como se muestra en el anexo estadístico.
5. Se incluyó la variable tiempo, en este caso la semana epidemiológica, porque permite reducir el sesgo causado por variables confusoras que no se tienen en cuenta en el modelo (por ejemplo, epidemia de influenza, exposición a humo de cigarrillo y otras).
6. Método de suavizado: spline cúbico. Ofrece mejor continuidad en los límites de la ranura lo que constituye una ventaja ya que el ajuste dado por el spline de regresión presenta una gran variación alrededor de los límites. No se utilizaron funciones explícitas para las funciones cúbicas, sino funciones básicas finitas provenientes de una base que al superponerlas generan las funciones cúbicas. Normalmente se hace por eficiencia computacional.
7. La estimación del efecto de rezago se tomó como una semana. Se consideró el efecto que tiene la variable predictora PM_{10} sobre la IRA, no solo de la semana correspondiente a la medición, sino también los valores de la semana anterior. Se supuso que la variable presenta una histéresis con efectos retardados sobre el IRA. Los resultados mostrados en el anexo muestran la bondad de este procedimiento.
8. Se corrió el modelo con PM_{10} suavizado para la estación Policlínica, que fue la utilizada en el análisis. La razón para ello fue explicada anteriormente. El PM_{10} medido en la misma semana y la semana anterior de la medición de los eventos de IRA fueron los

valores tenidos en cuenta. Se eliminaron los datos faltantes para un total de 138 semanas.

9. El análisis estadístico se realizó con el programa R versión 3.6, paquete *mgcv*.

3.4 Enfoque del modelo de Determinantes Sociales de la Salud de la OMS

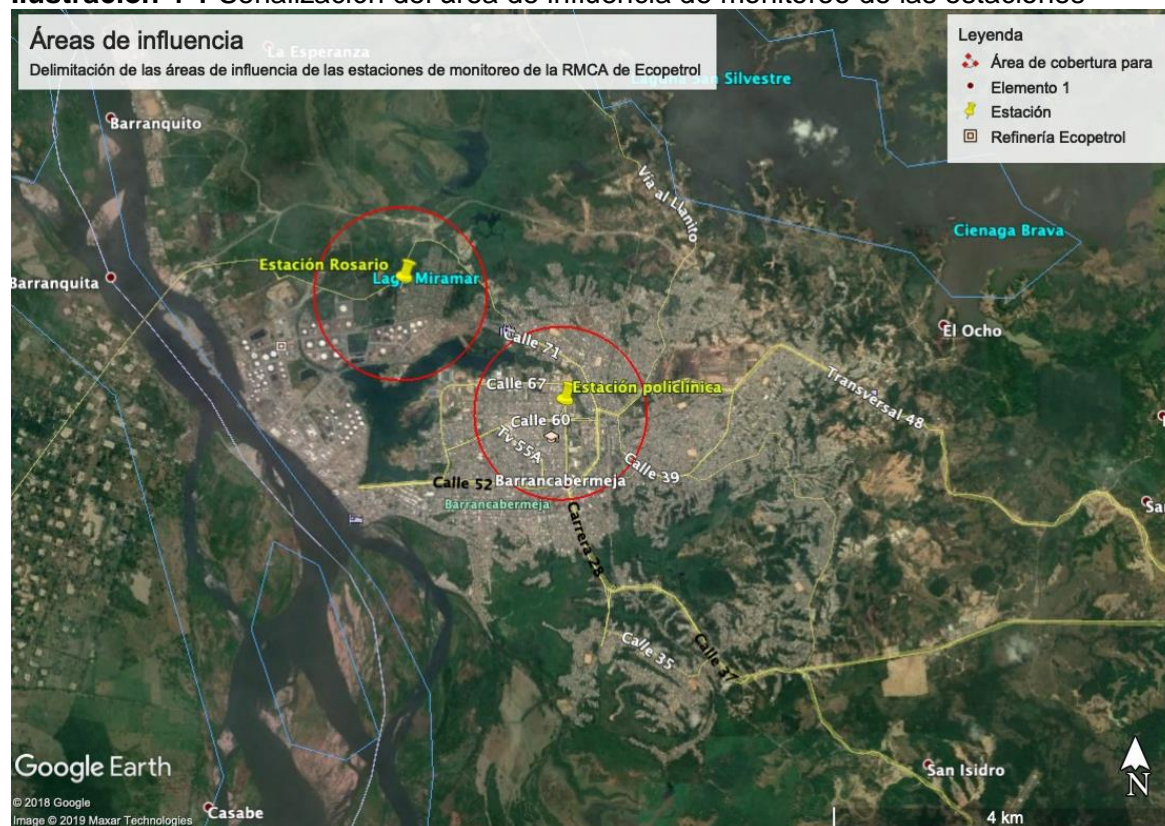
Se realizó una revisión documental para identificar qué otros factores influían en la relación ambiente-salud. Aunque esta metodología se propone como una herramienta para abordar dichos factores, principalmente a través de política pública, no se realizará un análisis de la política pública ya que no se encuentra dentro de los objetivos de esta investigación.

4.Resultados

4.1 Descripción de las áreas de influencia de las estaciones de monitoreo

La **Error! Reference source not found.** muestra el área de influencia de las dos estaciones de monitoreo, cada círculo rojo delimita un área de 1 kilómetro a la redonda. El círculo de la izquierda corresponde a la estación Rosario y el otro a la estación Policlínica.

Ilustración 4-1 Señalización del área de influencia de monitoreo de las estaciones



Fuente: Google Earth, elaboración propia

4.1.1 Estación Rosario

El área de influencia de la estación Rosario abarca principalmente la refinería de Ecopetrol. Como se mencionó en la sección 1.1.4, ésta opera dentro de un área de 300 hectáreas en donde se realizan procesos de transformación de crudo en combustibles (gasolina, diésel, diésel marino, jet), petroquímicos (parafina, polietileno, aromáticos), azufre y asfalto para uso industrial.

Las unidades residenciales que se encuentran dentro de la refinería están distribuidas en 3 barrios: Rosario, Yariguies y 25 de agosto, y tienen un trazado similar al de los barrios estadounidenses con vías en buen estado, espacio público y zonas verdes; con viviendas exclusivas para los directivos de Ecopetrol. Estos predios son propiedad de la empresa.

Dentro del barrio Rosario se encuentra el Colegio El Rosario, donde estudian los hijos de los trabajadores de Ecopetrol y donde se encuentra la estación de monitoreo. Hacia el extremo norte de la refinería pasa la carretera que va hacia Yondó la cual comunica la

región del Magdalena Medio con el departamento de Antioquia y facilita la comunicación del país con la Costa Atlántica. Durante los días de semana hay paso recurrente de vehículos de transporte pesado, durante los fines de semana hay paso restringido para este tipo de vehículos.

Hacia el extremo sur la estación alcanza a abarcar parte de la Ciénaga Miramar, un humedal urbano clave en la preservación de la fauna y flora municipal, en la regulación del control de las cuencas hidrográficas y en la mejoría de la calidad del agua. Históricamente se ha visto impactada negativamente por el crecimiento urbanístico y la acelerada industrialización que han causado interrupciones en el equilibrio ecológico. Estudios de la calidad del agua de esta ciénaga han detectado carga de fósforo y nitrógeno, presencia de metales pesados, elementos químicos y bacterias, los cuales han afectado las especies vegetales y peces principalmente que además actúan como reservorio de estas sustancias (34,35).

4.1.2 Estación Policlínica

El área de influencia de esta estación abarca principalmente a la comuna 2, también parte de las comunas 1 y 3 y parte de la Ciénaga Miramar, que corresponde a la zona occidental del municipio y también la que se encuentra más cerca a la refinería. La comuna 2 es la más pequeña, es en donde se empezaron a poblar los primeros sectores del municipio y donde se formaron los primeros barrios que inicialmente alojaban a los trabajadores de Ecopetrol. Es considerada una de las comunas con mayores problemas de contaminación del aire por catalizador y ozono por varias razones: encontrarse más cerca de la refinería, junto con la comuna 1 concentran la mayor parte del sector comercial que implica mayores fuentes fijas de emisiones (anexo), contaminación por ruido y alto flujo vehicular; además se encuentra rodeada por algunas de las avenidas principales del municipio, entre esas la Avenida Circunvalar que bordea la Ciénaga Miramar.

Esta mitad del municipio (zona occidental) que se encuentra separada de la zona oriental por la avenida del Ferrocarril, tiene una mayor organización territorial que implica mayor cobertura de servicios públicos y control del orden público. Hacia la zona oriental, principalmente las comunas 5, 6 y 7 tienen gran cantidad de barrios informales que se han

formado por las migraciones forzadas al municipio desde la zona rural. Este crecimiento urbano desorganizado ha traído problemas como la ausencia de planificación territorial, bajos niveles en la provisión de servicios y equipamientos sociales básicos. Frente a esto, las organizaciones comunales y ediles han impulsado la legalización de predios y el reconocimiento de barrios para propender el acceso a infraestructura básica y el mejoramiento del espacio público (36,37).

Otro de los contrastes entre las dos mitades del municipio es el número de centros asistenciales. Al revisar las UPGD de las bases de datos de SIVIGILA, se identificaron en total 33, 15 centros de salud corresponden a la Empresa Social del Estado (11 en el área urbana y 4 en el área rural). De los que se encuentran en el área urbana la mayoría se localizan entre las comunas 1 y 2 como se puede ver en el mapa del anexo.

4.2 Análisis de los contaminantes criterio establecidos por la norma de calidad del aire y de las variables meteorológicas

Luego de aplicar los criterios descritos en la sección 3.1, se analizaron los promedios diarios de PM₁₀, SO₂ y NO₂. No existe claridad acerca de si para los contaminantes O₃ y CO, que de acuerdo con la norma deben tener monitoreo cada 8 horas, se hizo sólo el promedio diario o si se hicieron las 3 mediciones por día y solo reportaron una.

Para el año 2014 solo se analizaron los datos de la estación Policlínica y para el 2015 y 2016 los datos de las estaciones Policlínica y Rosario. El soporte gráfico de los resultados del análisis de los contaminantes criterio y de las variables meteorológicas se encuentra en los Anexos.

4.2.1 PM₁₀

El porcentaje de captación de la estación Policlínica fue del 83%. La tendencia del PM₁₀ para el año 2014 en comparación con el promedio de concentración diario establecido por las normas nacionales del 2010 y 2017 y por la norma OMS, solo presentó excedencias frente a la norma OMS y correspondió a un 5,23% del total de datos. Llama la atención

encontrar un valor mínimo de 1,90 teniendo en cuenta que la estación de monitoreo se encuentra en una zona urbanizada y concurrida.

La variación mensual de PM₁₀ indicó que el mes en el que se presentaron los valores medios de contaminación más altos fue en marzo y la variación por días de semana indica que los lunes y los miércoles se registraron los niveles más altos y los sábados y domingos fueron los días con menores niveles de PM₁₀.

Respecto al ICA, la mayoría de los días tuvieron un índice “bueno” y los días que tuvieron índice “moderado” predominaron durante marzo. Un índice “moderado” indica que pueden presentarse efectos en salud con exposiciones de corta duración en grupos susceptibles.

La Tabla 4-1 contiene las medidas de tendencia central y de variabilidad del PM₁₀ durante el 2014.

Tabla 4-1 Estadística descriptiva PM₁₀, 2014

Policlínica - PM10	
Medidas de tendencia central	
Media	24,48
Moda	21,55
Valor máximo	68,61
Valor mínimo	1,90
Intervalo de confianza	
	IC95% (23,10-25,86)
Medidas de variabilidad	
Varianza	149,04
Desviación estándar	12,21
Coeficiente de variación	49,9%
p25	17,09
Mediana	22,00
p75	28,52

Fuente de los datos: Bases de datos de RMCA de Ecopetrol

En el año 2015 el porcentaje de captación de la estación Policlínica y de la estación Rosario fue de 91,8%. La tendencia de los promedios diarios y en comparación con las normas ambientales indica que el porcentaje de excedencias respecto a la norma OMS de la estación Policlínica fue 18,45% y de la estación Rosario 39,58% siendo 148,47 el valor más alto registrado. En relación con las normas nacionales, respecto a la norma de 2010 el porcentaje de excedencias de los promedios diarios de PM₁₀ fue 0 para la estación Policlínica y de la estación Rosario de 1,79; respecto a la norma de 2017, el porcentaje de

excedencias registradas en la estación Policlínica fue 3,57% y de la estación Rosario 15,18%.

La variación mensual y diaria de PM₁₀ de la estación Policlínica indica que marzo, febrero y diciembre fueron los meses en los que se presentaron los valores medios de contaminación más altos. La variación por días de semana indica que los lunes y los miércoles se registraron los niveles más altos de PM₁₀ y los sábados y domingos los días con menores niveles de PM₁₀.

Respecto al ICA por día de la estación Policlínica, la mayoría de los días tuvieron un índice “bueno” y los días que tuvieron índice “moderado” fueron a finales de febrero, la mayoría de los días de marzo y entre 1 y 6 días durante el resto de los meses del año.

La variación mensual de la estación Rosario indica que marzo, febrero, junio y diciembre fueron los meses en los que se presentaron los valores medios de contaminación más altos. La variación por días de semana indica que de lunes a viernes los niveles de PM₁₀ se mantienen a niveles similares y que el valor medio es más alto que el de Policlínica. Los sábados y domingos fueron los días con menores niveles.

Respecto al ICA de la estación Rosario, hubo un mayor número de días que presentaron un índice “moderado” a comparación de la estación Policlínica durante el 2015 y que predominaron durante la primera mitad del año, especialmente durante febrero y marzo. La Tabla 4-2 muestra las medidas de tendencia central y variabilidad del contaminante para el año 2015. La media de PM₁₀ fue mayor para la estación Rosario y el coeficiente de variación por año fue similar en ambas estaciones.

Tabla 4-2 Estadística descriptiva PM₁₀, 2015

Policlínica - PM10		Rosario - PM10	
Medidas de tendencia central		Medidas de tendencia central	
Media	35,51	Media	48,92
Moda	41,72	Moda	N/A
Valor máximo	97,12	Valor máximo	148,48
Valor mínimo	0,44	Valor mínimo	0,19
Intervalo de confianza	IC95% (33,69-37,33)	Intervalo de confianza	IC95% (46,41-51,44)
Medidas de variabilidad		Medidas de variabilidad	

Varianza	286,61	Varianza	549,17
Desviación estándar	16,93	Desviación estándar	23,43
Coefficiente de variación	47,7%	Coefficiente de variación	47,90%
p25	31,40	p25	31,86
Mediana	31,69	Mediana	44,03
p75	62,57	p75	62,31

Fuente de los datos: Bases de datos de RMCA de Ecopetrol

Para el año 2016 el porcentaje de captación de ambas estaciones fue de 89,1%. La tendencia de los promedios diarios de PM₁₀ muestra que en relación con la norma OMS, el porcentaje de excedencias de promedios diarios de PM₁₀ de ambas estaciones fue del 17,96%. En relación con las normas nacionales, respecto a la norma de 2010 el porcentaje de excedencias de los promedios diarios de PM₁₀ fue 0 para la estación Policlínica y de la estación Rosario de 0,3%; respecto a la norma de 2017, el porcentaje de excedencias registradas en la estación Policlínica fue 3,3% y de la estación Rosario 5%.

La variación mensual de la estación Policlínica durante el 2016 indica que en marzo se presentaron los valores medios de contaminación más altos y en los meses siguientes tienden a decrecer gradualmente los promedios. La variación por días de semana indica que los lunes se registraron los niveles más altos de PM₁₀ y estos decrecieron a medida que avanzaba la semana hasta llegar a los menores niveles de PM₁₀ registrados los domingos. Respecto al ICA de la estación Policlínica, la mayoría de los días tuvieron un índice “bueno” y los días que tuvieron índice “moderado” predominaron durante el primer trimestre del año, siendo su mayoría durante marzo.

La variación mensual de la estación Rosario es similar a la de la estación Policlínica e indica que en marzo se presentaron los valores medios de contaminación más altos. La variación por días de semana indica que los lunes y los jueves los niveles de PM₁₀ fueron más altos, y los sábados y domingos fueron los días con menores niveles. Respecto al ICA de la estación Rosario los días con un índice “moderado” se presentaron durante febrero y abril, siendo su mayoría durante marzo.

La Tabla 4-3 muestra las medidas de tendencia central y variabilidad del contaminante para el año 2016. La media de PM₁₀ fue mayor para la estación Rosario y el coeficiente de variación fue mayor para la estación Policlínica.

Tabla 4-3 Estadística descriptiva PM₁₀, 2016

Policlínica - PM ₁₀		Rosario - PM ₁₀	
Medidas de tendencia central		Medidas de tendencia central	
Media	31,70	Media	35,96
Moda	55,30	Moda	22,64
Valor máximo	91,23	Valor máximo	116,73
Valor mínimo	4,50	Valor mínimo	6,01
Intervalo de confianza	IC95% (29,61-33,78)	Intervalo de confianza	IC95% (33,94-37,99)
Medidas de variabilidad		Medidas de variabilidad	
Varianza	374,26	Varianza	354,51
Desviación estándar	19,35	Desviación estándar	18,83
Coeficiente de variación	61%	Coeficiente de variación	52,35%
p25	21,59	p25	22,01
Mediana	31,69	Mediana	32,33
p75	45,31	p75	45,06

Fuente de los datos: Bases de datos de RMCA de Ecopetrol

4.2.2 NO₂

El porcentaje de captación de la estación Policlínica fue del 83%. La tendencia del NO₂ para el año 2014 únicamente se comparó frente a los promedios diarios de la norma nacional del 2010, ya que la norma del 2017 y norma OMS manejan promedios horarios y anual. Frente a esta norma no hubo excedencias. Se presentaron dos picos de contaminación que no parecen realistas y pueden ser debidos a errores de medición, pero no se removieron porque son datos que fueron reportados por Ecopetrol luego de haber seguido el protocolo para remoción de datos antes de compartirlos. Además, se pretende mostrar la calidad de los datos que tiene la autoridad ambiental.

La variación mensual de NO₂ indica que en marzo y octubre se presentaron los valores medios de contaminación más altos, y la variación por días de semana indica que los sábados se registraron los niveles más altos.

La **Tabla 1-1** **Error! Reference source not found.** contiene las medidas de tendencia central y de variabilidad del NO₂ durante el 2014.

Tabla 4-4 Estadística descriptiva NO₂, 2014

Policlínica - NO₂	
Medidas de tendencia central	
Media	5,28
Moda	4,67
Valor máximo	65,35
Valor mínimo	4,18
Intervalo de confianza	IC95% (5,15- 5,41)
Medidas de variabilidad	
Varianza	17,60
Desviación estándar	4,20
Coefficiente de variación	79,5%
p25	4,52
Mediana	4,69
p75	5,29

Fuente de los datos: Bases de datos de RMCA de Ecopetrol

En el año 2015 el porcentaje de captación de la estación Policlínica y de la estación Rosario fue de 91%. La tendencia de los promedios diarios durante este año y en comparación con la norma de 2010 indica que no hubo excedencias en ninguna de las estaciones.

La variación mensual de la estación Policlínica indica que marzo, agosto y diciembre fueron los meses en los que se presentaron los valores medios de contaminación más altos. La variación por días de semana indica que los lunes, jueves y viernes se registraron los niveles más altos.

La variación mensual de la estación Rosario indica que marzo, mayo, junio y agosto fueron los meses en los que se presentaron los valores medios de contaminación más altos. La variación por días de semana indica que de domingo a viernes los niveles de NO₂ se mantienen a niveles similares y que el valor medio es más bajo que el de Policlínica.

La **Error! Reference source not found.** contiene las medidas de tendencia central y de variabilidad del NO₂ durante el 2015. La media de NO₂ fue mayor en la estación Policlínica y el coeficiente de variación por año también fue mayor en esta estación.

Tabla 4-5 Estadística descriptiva NO₂, 2015

Policlínica - NO ₂		Rosario - NO ₂	
Medidas de tendencia central		Medidas de tendencia central	
Media	3,53	Media	3,22
Moda	N/A	Moda	N/A
Valor máximo	20,62	Valor máximo	23,58
Valor mínimo	0,40	Valor mínimo	0,09
Intervalo de confianza	IC95% (3,19-3,87)	Intervalo de confianza	IC95% (2,95-3,49)
Medidas de variabilidad		Medidas de variabilidad	
Varianza	10,01	Varianza	6,15
Desviación estándar	3,16	Desviación estándar	2,48
Coficiente de variación	89,7%	Coficiente de variación	77,01%
p25	1,65	p25	1,67
Mediana	2,46	Mediana	2,14
p75	4,32	p75	4,06

Fuente de los datos: Bases de datos de RMCA de Ecopetrol

Para el año 2016 el porcentaje de captación de ambas estaciones fue de 91,3%. La tendencia de los promedios diarios de NO₂ muestra que en relación con la norma 2010 no hubo excedencias en ninguna de las dos estaciones.

La variación mensual de la estación Policlínica durante el 2016 indica que en marzo, abril y octubre se presentaron los valores medios de contaminación más altos. Hay muy poca variación entre los días de semana.

La variación mensual de la estación Rosario es similar a la de la estación Policlínica e indica que en marzo en marzo, abril y octubre se presentaron los valores medios de contaminación más altos. La variación por días de semana indica que los lunes, miércoles y jueves se presentaron los niveles más altos.

La **Error! Reference source not found.** contiene las medidas de tendencia central y de variabilidad del NO₂ durante el 2016. La media de NO₂ fue mayor en la estación Rosario y el coeficiente de variación por año también fue mayor en esta estación.

Tabla 4-6 Estadística descriptiva NO₂, 2016

Policlínica - NO ₂		Rosario - NO ₂	
Medidas de tendencia central		Medidas de tendencia central	
Media	2,55	Media	2,71
Moda	1,66	Moda	1,66
Valor máximo	12,34	Valor máximo	15,82
Valor mínimo	1,62	Valor mínimo	1,61
Intervalo de confianza	IC95% (2,38-2,72)	Intervalo de confianza	IC95% (2,52-2,90)
Medidas de variabilidad		Medidas de variabilidad	
Varianza	2,50	Varianza	3,09
Desviación estándar	1,58	Desviación estándar	1,76
Coeficiente de variación	62%	Coeficiente de variación	65%
p25	1,66	p25	1,66
Mediana	1,69	Mediana	1,79
p75	2,80	p75	3,09

Fuente de los datos: Bases de datos de RMCA de Ecopetrol

4.2.3 SO₂

El porcentaje de captación de la estación Policlínica fue del 83%. La tendencia del SO₂ para el año 2014 en comparación con el promedio de concentración diario establecido por las normas nacionales del 2010 y 2017 y por la norma OMS, no se presentaron excedencias frente ninguna.

La variación mensual indica que los niveles más bajos se presentan en el primer trimestre del año y a partir de abril hay un aumento progresivo de los niveles de SO₂ que desciende en diciembre. La variación por días de semana indica que los lunes y martes se registraron los niveles más altos.

La **Error! Reference source not found.** contiene las medidas de tendencia central y de variabilidad del SO₂ durante el 2014.

Tabla 4-7 Estadística descriptiva SO₂, 2014

Policlínica - SO ₂	
Medidas de tendencia central	
Media	9,18
Moda	8,63

Valor máximo	13,49
Valor mínimo	6,5
Intervalo de confianza	IC95% (9,05-9,32)
Medidas de variabilidad	
Varianza	1,34
Desviación estándar	1,16
Coefficiente de variación	12,6%
p25	8,63
Mediana	9,05
p75	9,72

Fuente de los datos: Bases de datos de RMCA de Ecopetrol

En el año 2015 el porcentaje de captación de la estación Policlínica y de la estación Rosario fue de 92,1%. La tendencia de los promedios diarios durante este año y en comparación con las normas OMS y nacionales de 2010 y 2017 indica que no hubo excedencias en relación con la norma OMS, el porcentaje de excedencias de promedios diarios de SO₂ de la estación Policlínica fue 5,95% y de la estación Rosario 8,93%. En relación con las normas nacionales, respecto a la norma de 2010 el porcentaje de excedencias de los promedios diarios de SO₂ fue 0 para las dos estaciones; respecto a la norma de 2017, el porcentaje de excedencias registradas en la estación Policlínica fue 0 y de la estación Rosario 0,3% presentándose el pico más alto en diciembre.

La variación mensual de SO₂ de la estación Policlínica indica que entre marzo y mayo y en noviembre fueron los meses en los que se presentaron los valores medios de contaminación más altos. La variación por días de semana indica que los sábados y domingos se presentan los niveles más altos y entre martes y jueves los niveles más bajos. La variación mensual de la estación Rosario indica que, entre marzo y mayo, agosto y noviembre fueron los meses en los que se presentaron los valores medios de contaminación más altos. La variación por días de semana indica que los viernes se presentan los niveles más altos.

La Tabla 4-8 muestra las medidas de tendencia central y variabilidad del contaminante para el año 2015. La media de SO₂ fue mayor para la estación Rosario y el coeficiente de variación por año también fue mayor para esa estación.

Tabla 4-8 Estadística descriptiva SO₂, 2015

Policlínica - SO ₂		Rosario - SO ₂	
Medidas de tendencia central		Medidas de tendencia central	
Media	9,40	Media	10,70
Moda	N/A	Moda	N/A
Valor máximo	36,43	Valor máximo	85,43
Valor mínimo	0	Valor mínimo	0,61
Intervalo de confianza	IC95% (8,72-10,07)	Intervalo de confianza	IC95% (9,77-11,64)
Medidas de variabilidad		Medidas de variabilidad	
Varianza	39,22	Varianza	74,56
Desviación estándar	6,26	Desviación estándar	8,63
Coefficiente de variación	66,7%	Coefficiente de variación	80,67%
p25	4,90	p25	4,94
Mediana	7,86	Mediana	8,87
p75	13,79	p75	14,05

Fuente de los datos: Bases de datos de RMCA de Ecopetrol

Para el año 2016 el porcentaje de captación de ambas estaciones fue de 91,3%. La tendencia de los promedios diarios de SO₂ muestra que en relación con la norma OMS, el porcentaje de excedencias de promedios diarios de SO₂ de la estación Policlínica fue 5,97% y de la estación Rosario 15,52%. En relación con las normas nacionales, respecto a la norma de 2010 el porcentaje de excedencias de los promedios diarios de SO₂ fue 0 para las dos estaciones; respecto a la norma de 2017, el porcentaje de excedencias registradas en la estación Policlínica fue 0,6% y de la estación Rosario 1,8%, donde se registró el pico más alto (230 µg/m₃) en el mes de abril.

La variación mensual de la estación Policlínica durante el 2016 indica que en febrero, abril y julio se presentaron los valores medios de contaminación más altos. La variación entre los días de semana indica que los fines de semana se registraron los valores de contaminación más altos.

La variación mensual de la estación Rosario es similar a la de la estación Policlínica e indica que en marzo y abril se presentaron los valores medios de contaminación más altos. La variación por días de semana indica que los lunes se presentaron los niveles más altos y en el resto de la semana hay poca variación.

La **Error! Reference source not found.** muestra las medidas de tendencia central y de variabilidad del contaminante para el año 2016. La media de SO₂ fue mayor para la estación Rosario.

Tabla 4-9 Estadística descriptiva

Policlínica - SO ₂		Rosario - SO ₂	
Medidas de tendencia central		Medidas de tendencia central	
Media	8,42	Media	11,17
Moda	1,17	Moda	1,59
Valor máximo	54,06	Valor máximo	230,10
Valor mínimo	1,16	Valor mínimo	1,16
Intervalo de confianza	IC95% (7,46-9,38)	Intervalo de confianza	IC95% (9,33-13,02)
Medidas de variabilidad		Medidas de variabilidad	
Varianza	79,68	Varianza	293,78
Desviación estándar	8,93	Desviación estándar	17,14
Coeficiente de variación	106%	Coeficiente de variación	153,38%
p25	3,34	p25	3,38
Mediana	5,147	Mediana	5,83
p75	10,01	p75	12,05

Fuente de los datos: Bases de datos de RMCA de Ecopetrol

4.2.4 Variables meteorológicas

La estación Policlínica no realizó monitoreo para las variables meteorológicas durante el 2014. Para el año 2015, la captación de datos de las variables meteorológicas fue menor al 50% y la mayor cantidad de datos faltantes fueron hacia la primera mitad del año.

Con los datos obtenidos, se pudo generar la rosa de vientos que muestra una orientación y velocidad variable desde donde provienen los vientos, predominó la dirección

normordeste que fue mayor al 10%. Al haber tantos datos faltantes no fue posible desagregar más esta información.

En el 2016 el porcentaje de captación de datos fue superior al 80% para todas las variables y los datos faltantes corresponden a finales de noviembre y diciembre. La rosa de vientos anual también mostró una gran variabilidad de la orientación y proveniencia de los vientos y predominó la dirección sursureste que fue mayor al 15%. La desagregación mensual de la rosa de vientos indica que entre los meses marzo y abril predomina la orientación sursureste, entre mayo y agosto hay mucha variabilidad de orientación y velocidad, y octubre y noviembre predomina la orientación norte.

Se mencionó en la sección 3.1 que se habían solicitado los datos de precipitación y temperatura media para los tres años a los que corresponde este estudio y se mencionan las características más relevantes a continuación y la Tabla 4-10 contiene la estadística descriptiva de las dos variables:

- Precipitación: el ciclo anual de precipitación de los años 2014, 2015 y 2016 muestra que en abril-mayo y en el trimestre septiembre-octubre-noviembre se presentaron las temporadas lluviosas y las temporadas secas entre diciembre y marzo y entre junio y agosto.
- Temperatura media: El ciclo anual de temperatura media de los años 2014, 2015 y 2016 muestra que en el año 2015 se presentaron las temperaturas más altas y en el 2014 las más bajas. Los meses con temperaturas más altas coinciden con las temporadas secas.

Tabla 4-10 Estadística descriptiva, variables precipitación y temperatura media

Medidas de tendencia central - Precipitación		Medidas de tendencia central – Temperatura media	
Media	6,74	Media	28,15
Moda	0	Moda	28,5
Valor mínimo	0	Valor mínimo	23,7
Valor máximo	129,9	Valor máximo	34,75
Intervalo de confianza	IC95% (5,78- 7,69)	Intervalo de confianza	IC95% (272,65- 312,34)

Medidas de variabilidad		Medidas de variabilidad	
Desviación estándar	16,09	Desviación estándar	1,40
Varianza	258,96	Varianza	1,96
Coeficiente de variación	3,67	Coeficiente de variación	-0,06
p25	0	p25	27,2375
Mediana	0,2	Mediana	28,2
p75	4,375	p75	29

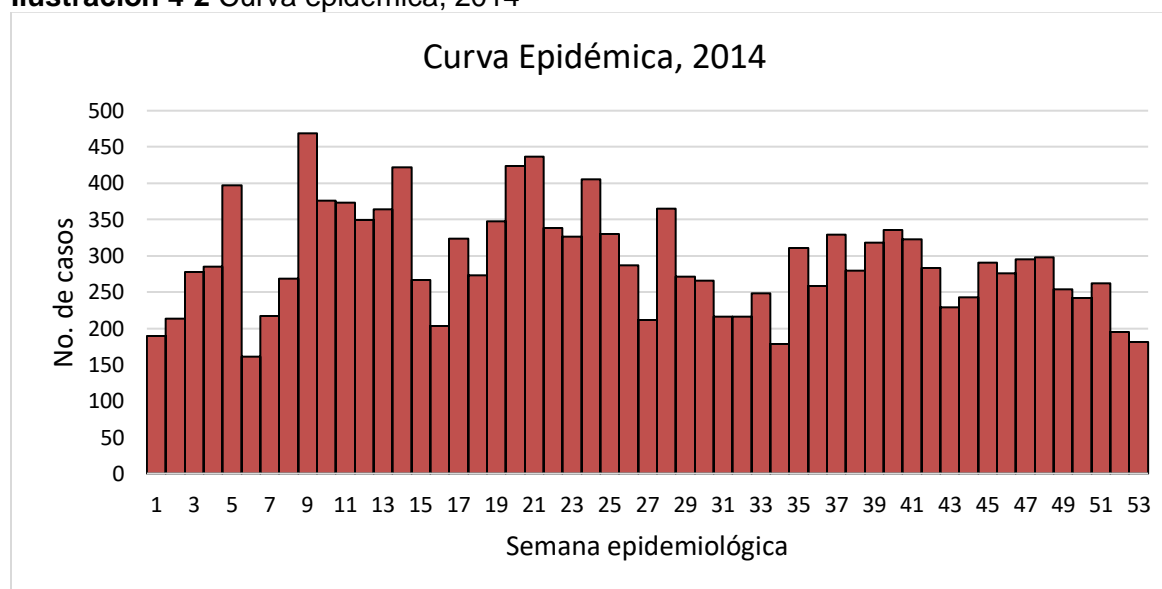
Fuente: IDEAM

4.3 Análisis de los eventos de morbilidad por IRA en menores de 5 años, 2014-2016

4.3.1 2014

La Ilustración 4-2 muestra la curva epidémica de los eventos de morbilidad por IRA durante el 2014. Se notificaron en total de 15.502 casos de los cuales 14.445 (93,18%) fueron reportados en consulta, 1.046 (6,75%) en hospitalización y 11(0,07%) en la unidad de cuidados intensivos. Se observa que los picos más altos se presentaron durante la primera mitad del año siendo marzo el mes que más casos reportó.

Ilustración 4-2 Curva epidémica, 2014



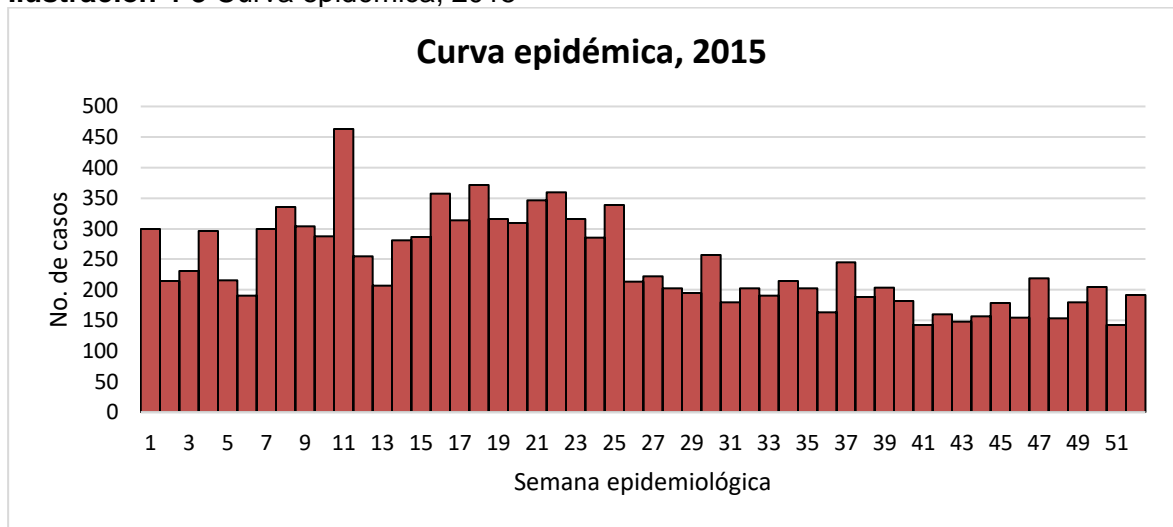
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
No. Casos	1363	1116	1884	1067	1547	1560	1118	1212	1263	1078	1414	880

Fuente: SIVIGILA

4.3.2 2015

La Ilustración 4-3 corresponde a la curva epidémica de los casos notificados de morbilidad por IRA en el año 2015. Se notificaron en total 12.570 casos de los cuales 11.797 casos (93,85%) fueron reportados en consulta externa, 769 (6,1%) fueron reportados en hospitalización y 4 casos (0,03%) en la unidad de cuidados intensivos. Se puede observar que la mayoría de los casos se concentran durante la primera mitad del año y un pico en la semana epidemiológica 11.

Ilustración 4-3 Curva epidémica, 2015

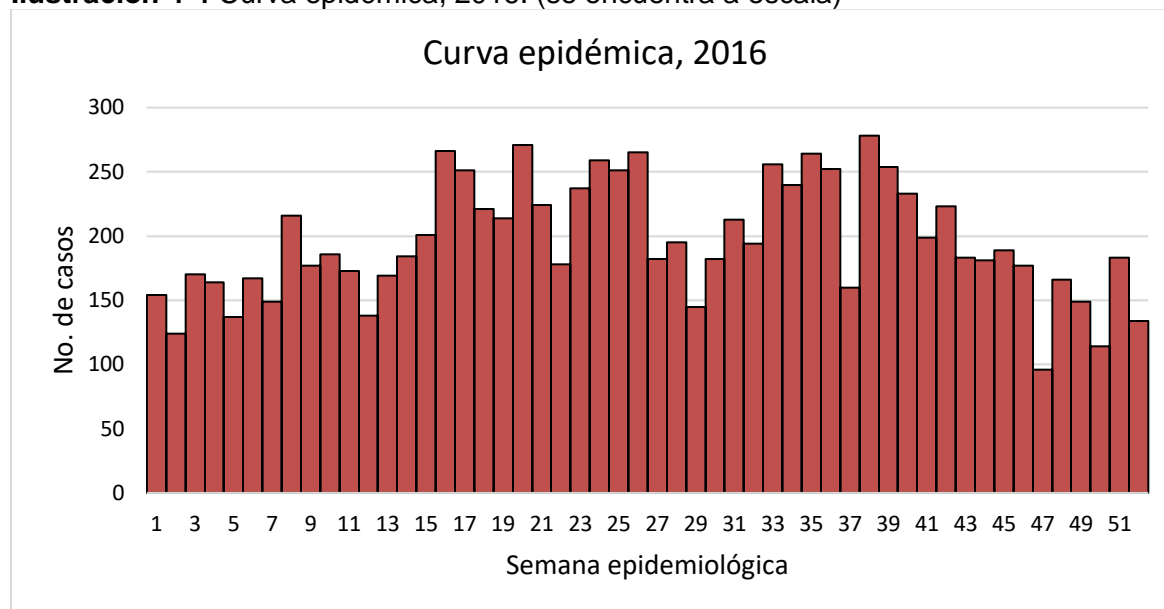


	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
No. Casos	1040	1042	1516	1238	1703	1153	876	989	799	632	863	719

Fuente: SIVIGILA

4.3.3 2016

La Ilustración 4-4 muestra la curva epidémica de los eventos de morbilidad por IRA durante el 2016. Se notificaron en total 10.188 casos de los cuales 9.264 casos (90,93%) fueron reportados en consulta externa, 910 (8,9%) fueron reportados en hospitalización y 14 casos (0,13%) en la unidad de cuidados intensivos. Es el año en el que se reportaron más casos en la unidad de cuidados intensivos. La curva tiene picos irregulares durante todo el año, pero se concentran más entre las semanas epidemiológicas 16 y 18 y los meses con más casos notificados fueron mayo, junio y octubre.

Ilustración 4-4 Curva epidémica, 2016. (se encuentra a escala)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
No. Casos	749	709	666	902	1108	1012	917	954	944	1019	628	580

Fuente: SIVIGILA

4.4 Modelo Aditivo Generalizado (GAM)

El impacto de las variables predictoras sobre la variable respuesta (IRA) fueron estadísticamente significativos para los datos suministrados por la estación Policlínica, cuando se suavizaron las variables predictoras PM₁₀, precipitación, temperatura y la unidad de tiempo (semana) con función cúbica por ranuras. Las probabilidades asociadas a la hipótesis nula resultaron mucho menores que 0,05, valor bastante pequeño lo que indica que la función estimada en el modelo es correcta.

La probabilidad indica que por un incremento de 10 μ g/m³ de PM₁₀, los casos de IRA aumentarán en 8 (IC95% 6,42-9,68) y que por el aumento en un grado centígrado de la temperatura media se genera un aumento de 53 casos de IRA (IC95% 48,62-57,88).

Cuando se introdujo un retardo de una semana (lag1), el rezago genera p-valores adecuados para las variables predictoras precipitación y temperatura media, la correlación ajustada es superior al 80%. En el caso de PM₁₀, el p-valor está muy cercano al límite (p=0,06) y puede deberse a que el número de datos no es suficiente para inferir el impacto

en valores futuros de IRA. No se encontró variación en el número de casos de IRA con lag0 y lag1.

El proceso completo que se llevó a cabo para la obtención de estos resultados se encuentra en el Anexo M.

4.5 Aproximación de la metodología de fuerzas motrices

Después de estudiar la relación entre IRA y PM₁₀ a través de un método cuantitativo, a continuación, se hace una aproximación de la metodología de fuerzas motrices a través de información documental constituida por documentos municipales y complementada con artículos de prensa y trabajos publicados. (14,21,35,38,39)

La metodología de Fuerzas Motrices en el marco de la Dimensión de Salud Ambiental del Plan Decenal menciona que la mejoría de la calidad del aire no se traduce en reducción de la exposición en los residentes de áreas urbanas, hay que tener en cuenta la composición de las partículas, la presencia de otras partículas y la influencia de las variables meteorológicas y sociodemográficas. En el caso de Colombia, la salud ambiental debe asumir retos importantes. Por un lado, debe atender los problemas que se han producido a partir de deudas históricas aún no saldadas, tales como el acceso a agua potable y el saneamiento básico. Por otro lado, debe ocuparse de los llamados “riesgos modernos” producidos por el rápido crecimiento urbano y el consumo insostenible y, hasta cierto punto, incontinente de los bienes naturales (25).

Tabla 4-11 Aproximación de la metodología de fuerzas motrices

Categoría	Descripción
Fuerza Motriz	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="505 1486 1422 1598">▪ Actividad petrolera como principal fuente económica del municipio: es el municipio que mayor aporta al PIB del departamento y aporta a la economía local el 70%. <li data-bbox="505 1598 1422 1675">▪ Fuentes de empleo dependientes del sector industrial (directos e indirectos) <li data-bbox="505 1675 1422 1824">▪ Grandes migraciones, algunas de ellas voluntarias y otras forzadas como consecuencia de la explotación petrolera o por el conflicto armado. El 32% de la población del municipio corresponde a víctimas del conflicto armado. Estructuras de poder legal e ilegal.

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Crecimiento urbanístico de la ciudad, grado de urbanización del 90,5% y densidad de 166 habitantes/km²
Presiones Conflictos ambientales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Debilidad para regular el desarrollo urbano: urbanización por fuera del ordenamiento jurídico, sobre zonas de alto riesgo, sobre inmuebles fiscales, espacio público o en suelos de propiedad particulares ▪ No hay protección ni conservación de suelos ni regulación de cuencas hidrográficas. ▪ Explotación de materiales de construcción para relleno de áreas asociadas a la actividad industrial y al crecimiento urbanístico de la ciudad que ocupan zonas de conservación de quebradas, caños y ciénagas. ▪ Asentamientos en zonas de alto riesgo de desastre por inundaciones y deslizamientos debido a la ubicación en terrenos no aptos para urbanizar. ▪ Actividades de perforación-producción y mantenimiento para la explotación de hidrocarburos. ▪ Riesgos antrópicos de fallas tecnológicas en los sistemas de transporte de hidrocarburos y en los sistemas de almacenamiento de combustibles que pueden producir explosiones y contaminación por lixiviados líquidos y gaseosos.
Estado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Generación de residuos por las actividades de explotación de hidrocarburos que contaminan los suelos y fuentes hídricas. ▪ Red vial municipal en aceptable estado, muchas vías sin pavimentar, esto genera emisión de material particulado. ▪ Derrames de crudo en fuentes hídricas, los más recientes fueron el de La Lizama y de la vereda Planta Nueva, corregimiento El Centro. ▪ Erosión producto de la deforestación en las diferentes cuencas hidrográficas y por material con que se forman los rellenos. ▪ Uso de caños y quebradas como colectores de aguas servidas de uso doméstico e industrial. ▪ Descargas de desechos orgánicos y aguas servidas que llegan a los caños, constituyen la principal fuente de contaminación de las ciénagas provenientes de aguas residuales de uso doméstico y otras derivadas de la industria de hidrocarburos que afectan las cadenas bióticas. ▪ Ciénaga Miramar: la más contaminada, la capa superior de sedimento corresponde a material en descomposición y residuos plásticos y metálicos. ▪ Ciénaga Juan Esteban: receptora de aguas residuales provenientes de los campos de Ecopetrol, hidrocarburos, residuos sólidos

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ciénaga San Silvestre: afectada por procesos de sedimentación, contaminación orgánica producto de las descargas residuales con alta materia orgánica putrescible. ▪ Fuentes hídricas: variación de los caudales, contaminación por cargas orgánicas e inorgánicas y riesgo de desecación.
Exposición	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Excedencias frente a los límites permisibles para material particulado establecidos por las normas ambientales que generan alertas en salud de tipo “moderado” principalmente en el mes de marzo. ▪ Liberación de catalizador y gases emitidos por la refinería. ▪ Olores ofensivos. ▪ Descarga incontrolada de residuos domésticos e industriales sobre superficies desprotegidas por los lixiviados. ▪ IRCA 2017: 3,4, urbano 2,7 y rural 18,2.¹ ▪ Invasión de predios urbanos por basureros improvisados en diferentes sitios de la ciudad. Residuos con altas concentraciones de materia orgánica putrescible, de agentes patógenos, metales pesados y sales e hidrocarburos. ▪ Quemadas abiertas de residuos sólidos.
Efecto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ A corto plazo se pudo determinar que por cada aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de PM_{10} se aumentaban en 8 los casos de IRA para la población menor de 5 años. ▪ Las causas más frecuentes de morbilidad atendida en urgencias son de origen respiratorio: resfriado común y bronquitis. ▪ Las infecciones respiratorias agudas son la principal causa de muerte dentro del subgrupo de enfermedades infecciosas.

¹ Estado de la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en Colombia, 2017.

5. Discusión

El análisis de la contaminación del aire realizado en esta investigación evidenció que dentro de los contaminantes criterio el PM₁₀ fue el que registró un mayor número de excedencias frente a las normas ambientales tanto nacionales como OMS. Dentro de las tendencias anuales de los tres años, durante el 2015 ocurrió el mayor número de excedencias, principalmente reportadas por la estación Rosario.

El índice de calidad del aire arrojó alertas para la salud de tipo “moderado” principalmente durante el mes de marzo para los tres años y para las dos estaciones de monitoreo. Esta alerta indica que dichos niveles de contaminación son los que más pueden afectar la salud de grupos sensibles como lo son niños, ancianos y personas con problemas respiratorios. Estos resultados también son relevantes en el sentido de que quienes se encuentran más expuestos de acuerdo con el área de influencia son las familias que viven dentro de la refinería, los trabajadores de planta y los estudiantes del colegio El Rosario.

Dentro de estos hallazgos hay dos puntos que resultan llamativos. El primer punto es que, aunque los valores reportados por la RMCA de Ecopetrol estén ajustados con base a la norma ambiental nacional, llama la atención que dentro del registro de todos los años existan valores inferiores a 1 µg/m³ en 24 horas, poniendo en duda la calidad de algunos registros y la correcta calibración de los instrumentos de medición, desconociendo si realmente no se presentaron más excedencias.

El segundo punto es que al observar que la mayoría de las excedencias y alertas en salud de tipo “moderada” se presentaron en el mes de marzo, no se encuentra información de boletines oficiales ni en los medios de comunicación acerca del estado de la calidad del aire municipal, situación que va en contra de los objetivos principales de los sistemas de vigilancia de calidad del aire como lo son: evaluar el riesgo para la salud humana, evaluar

las estrategias de control de las autoridades ambientales y activar los procedimientos de control en situaciones de emergencia. En algunas ciudades del país como lo son Bogotá, Medellín y Bucaramanga, los sistemas de vigilancia han establecido alertas para la comunidad por la baja calidad del aire. Cabe resaltar que la mayoría de las alertas ambientales también se han presentado durante el primer trimestre del año, principalmente en marzo, mes en el que se registran los niveles de contaminación más altos, temperatura media alta y al final del mes es el momento en el que ocurre la transición de la época seca a la época de lluvia en nuestro país.

Respecto a los otros dos contaminantes analizados, el NO₂ no registró excedencias frente a las normas ambientales, pero se observó que en el 2014 presentó dos picos aislados que posiblemente hayan correspondido a errores de medición. El SO₂ presentó algunas excedencias frente a las normas ambientales, pero en menor cantidad que el PM₁₀. Las variaciones mensuales de estos dos contaminantes también registraron en su mayoría picos durante el mes de marzo.

Los hallazgos de los diagramas de *Timevariation* por año y por estación ilustran que los días en que se presentan los mayores niveles de contaminación son de lunes a viernes. Esta variación se relaciona con las actividades humanas como la industria, el desplazamiento de personas desde las poblaciones vecinas hacia la cabecera municipal para actividades comerciales y el movimiento vehicular los cuales son considerados las principales fuentes de emisión de material particulado que, en conjunto con factores meteorológicos y topográficos, hacen que el comportamiento de PM₁₀ varíe temporalmente de manera irregular en la atmósfera. Una de las medidas de las actividades humanas está asociada al día de la semana, puesto que el tráfico vehicular aumenta durante los días laborales (40). Revisar cómo es el comportamiento horario permitiría detectar picos de contaminación en momentos específicos del día y si estos coinciden con las horas pico de tráfico vehicular en el municipio, fenómenos de inversión térmica o aumento de las emisiones de la refinería como lo reportan los habitantes. Cuando las fuentes industriales y vehiculares emiten material particulado a la atmósfera en condiciones de inversión térmica, los niveles de concentración se elevan y generan episodios de contaminación que ponen en riesgo a la salud humana.

Las implicaciones que tiene comparar los promedios diarios de PM₁₀ con las normas ambientales son: un promedio por debajo de la norma no indica que no hubo episodios o

picos de exposición y que un promedio que logra superar la norma de calidad del aire indica que se presentaron muchos valores altos que lograron influenciar el promedio. El contraste entre los valores establecidos por la norma difiere mucho del nivel de concentración de contaminante a partir del cual comienzan a manifestarse los síntomas agudos a dicha exposición; por otro lado, el nivel de exposición diaria de una persona dependerá de la sumatoria de sus exposiciones dentro de los microambientes donde se desplaza y que puede variar a lo largo del día. La cuantificación de la exposición consiste en determinar la magnitud, frecuencia y duración de las exposiciones de los individuos miembros de la población, por lo que se han considerado los promedios diarios y anuales como indicadores de exposición poblacional (27).

Respecto a las variaciones en las curvas epidemiológicas con relación al monitoreo de PM₁₀ y las variaciones anuales de temperatura y precipitación se observó lo siguiente: Para el año 2014, la mayoría de los casos notificados de IRA se presentaron durante la primera mitad del año y en marzo se presentó el mayor número. Aunque durante este año no se registraron excedencias de PM₁₀ frente a la norma nacional, en marzo el ICA emitió varias alertas en salud de tipo “moderado” y la temperatura media fue más alta durante el primer semestre.

En el año 2015 se notificó el mayor número de casos de IRA en el primer semestre entre marzo y mayo. Fue el año con más excedencias frente a todas las normas ambientales principalmente en el primer semestre y también el que presentó temperaturas medias más altas entre la variación anual de los tres años. El ICA de la estación Policlínica presentó alertas en salud de tipo “moderada” en marzo y la estación Rosario durante todo el año siendo más marcados los meses febrero, marzo, junio y diciembre que coinciden con las temperaturas medias más altas de la variación anual y baja precipitación.

Aunque la estación Rosario registró los valores más altos de contaminación, no se puede concluir que la fuente de toda la contaminación provenga de la refinería ya que existen otras fuentes de contaminación como lo son: las fuentes móviles, el uso de combustibles diésel, la quema de basuras y el tráfico de vehículos de carga pesada en las cercanías y del estudio realizado no se puede saber en qué proporción participan cada una de las posibles fuentes de contaminación. Se desconoce si se han presentado procesos internos dentro de la refinería que también hayan influido en el fenómeno de la contaminación del

aire, sin embargo, indagar sobre este aspecto no está dentro del alcance de esta investigación.

En el 2016 la mayoría de los casos de IRA se notificaron en mayo, junio y octubre. En cuanto a las variaciones en la contaminación, las excedencias de PM₁₀ frente a las normas ambientales se presentaron durante el primer semestre del año y el ICA mostró alertas en salud de tipo “moderado” especialmente en el mes de marzo. En cuanto a las variaciones mensuales de precipitación, este año tuvo mayor precipitación acumulada en comparación al 2014 y el 2015 y octubre fue el mes con mayor precipitación acumulada. Respecto a la variación mensual de temperatura media febrero y marzo tuvieron las temperaturas medias más altas.

Al estudiar la relación entre IRA y contaminación del aire por PM₁₀ aplicando el modelo aditivo generalizado, logró establecerse que sí existía una relación estadísticamente significativa entre la contaminación por material particulado y los eventos de infección respiratoria aguda y que el aumento de los eventos agudos por incremento de cada 10 µg/m³ en la concentración del PM₁₀ aumentaba en 8 casos de IRA en el grupo de edad menores de 5 años. La temperatura tiene un efecto que también es estadísticamente significativo en el aumento de los casos de IRA la cual coincide con las temporadas secas que conllevan a mayores niveles de material particulado y de suspensión de este. Al aplicar el rezago, no se encontró variación en el efecto de la contaminación de la semana previa a la notificación de los casos de IRA y el p-valor de PM₁₀. Con una base de datos mucho mayor de mediciones, el resultado debería mejorar dada la estabilidad estadística y la relación objetiva entre la IRA y la variable predictora PM₁₀. Desde el punto de vista de la salud pública es importante destacar que, aunque la magnitud del impacto en salud es pequeña, la proporción atribuible a la contaminación atmosférica es importante, dado que toda la población está expuesta a sus consecuencias.

Al comparar con estudios de series de tiempo, hay que tener en cuenta la diferencia entre los países que se encuentran en el trópico y los que están hacia los hemisferios ya que en estos los brotes de infección respiratoria aguda por virus tienden a aparecer durante el otoño y el invierno, y en primavera las IRA de predominio alto por la circulación de alérgenos como el polen; mientras que en los países del trópico dichos brotes tienden a aparecer durante las temporadas de lluvia (41).

Rodríguez-Villamizar et. al (42), condujeron un estudio de series de tiempo multi-ciudad en Colombia entre 2011 y 2014 para estimar los efectos a corto plazo de la contaminación del aire por NO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, SO₂, CO y O₃ en admisiones a servicios de urgencia por enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Las enfermedades respiratorias representaron aproximadamente el 95% de las visitas a servicios de urgencias, siendo la infección respiratoria el diagnóstico más común. Aunque las concentraciones de los contaminantes variaron entre ciudades, los efectos más significativos fueron por NO₂, PM₁₀, PM_{2,5}. En el grupo de edad de 5-9 años el NO₂ produjo una variación de 10,59% en enfermedades respiratorias (IC95% 8,87-12,33), el PM₁₀ de 8,32% (IC95% 6,69-9,98) y el PM_{2,5} de 8,23% (IC95% 6,62-9,86). Este estudio, además, reafirma que los límites permisibles establecidos por la norma ambiental, si bien son la aproximación más cercana a la exposición poblacional, continúan muy por encima del umbral al que se han determinado que comienzan los efectos en salud por la contaminación del aire y que el material particulado es el contaminante que más se ve asociado a efectos secundarios en salud de tipo respiratorio y cardiovascular.

En otro estudio de series de tiempo desarrollado en Córdoba, Argentina, se tomaron los datos de consultas con códigos CIE-10 correspondientes a infecciones respiratorias altas y bajas en menores de 6 años, comprendidos entre los años 2005-2008, como exposición se tomaron los promedios diarios de PM₁₀ y se ajustó el modelo por las variables meteorológicas y día de semana. Se encontró una asociación significativa entre las infecciones respiratorias y el material particulado que, al adicionar las variables meteorológicas produjo un porcentaje de incremento en infecciones respiratorias altas de 4,49% (IC95% 3,93-5,05) y de infecciones respiratorias bajas de 5,61% (4,87-6,35). Mirando la estacionalidad de los casos las infecciones respiratorias altas se presentaron más en otoño, invierno y primavera y las infecciones respiratorias bajas principalmente en primavera (43).

Aunque esta investigación no tuvo en cuenta las variables sociodemográficas porque el tipo de notificación de los eventos de IRA, al ser semanal no permite discriminar la información por sexo, no tiene identificación de los pacientes para identificar re-consultas ni información sociodemográfica de los casos. Partir del supuesto de que la mayoría de las consultas sean al centro de atención más cercano tendría un sesgo porque la mayoría de

estos se concentran hacia la zona occidental del municipio. Sin embargo, dentro de los hallazgos de la revisión documental para aplicar la metodología de fuerzas motrices, se encontró que los asentamientos urbanos en suelos no residenciales tienen una cobertura insuficiente de servicios públicos y un índice de necesidades insatisfechas del 22,3% no tenían cobertura de acueducto ni alcantarillado y que el municipio atraviesa por una crisis de recolección de basuras que ha contaminado las fuentes hídricas y obliga a hacer quemas.

Estos factores y su relación con la prevalencia de síntomas respiratorios deberían ser estudiados más adelante porque estudios como el de Quiroz et. al (44), realizado en 5 municipios carboníferos del Cesar para establecer la prevalencia de enfermedad respiratoria y síntomas respiratorios en niños menores de 12 años y sus factores asociados según la concentración promedio anual de PM₁₀ durante el último año, encontró que dentro de las variables socioeconómicas, los niños que habitaban en viviendas en las cuales se cocinaba con leña se encontró una mayor frecuencia de diagnóstico de bronconeumonía en el último año (OR 1,63 IC95% 1,03-2,56), tos seca nocturna (OR 1,34 IC95% 1,05-1,71) y sibilancias durante el ejercicio (OR 1,45 IC95% 1,04-2,04). El porcentaje de ausentismo escolar fue de 17% y también se encontró que la falta de acueducto parecía no estar asociada con una mayor frecuencia de reporte de enfermedades y síntomas respiratorios, pero la ausencia de alcantarillado se asoció con una mayor frecuencia de asma (OR 2,0 IC95% 0,6-1,9), dermatitis alérgica (OR 1,4 IC95% 0,5-1,1) y sibilancias nocturnas (OR 1,4 IC95% 1,05-1,71), y la falta de recolección de basuras se asoció con los mismos efectos ($p < 0,05$).

El estudio de cohortes de Hernández et. al (45), siguió a 600 niños de dos localidades de Bogotá expuestos a diferentes niveles de PM₁₀ encontrando que los que se estaban en la zona de mayor exposición tuvieron mayor prevalencia de tos, expectoración, sibilancias, ojos rojos, fiebre y ausentismo escolar. Fue más alto en la localidad que tenía mayor exposición y que hay una asociación entre contaminación del aire por PM₁₀ y ausentismo por enfermedad respiratoria aguda (RR 1,70 IC95% 1,26-2,89), y también con los grupos de síntomas “tos y flemas” (RR 1,1 IC95% 1,0-1,3) y “expectoración y silbidos” (RR 1,6 IC95% 1,3-1,9). Las principales fuentes de contaminación eran las que se encontraban a menos de 100 metros de distancia.

Este estudio permite dar una aproximación a la magnitud del problema ambiental que atraviesa Barrancabermeja. Aunque el objetivo general era únicamente demostrar la posible relación entre contaminación del aire por PM₁₀ e infección respiratoria aguda, la aproximación desde la metodología de fuerzas motrices permitió revelar que la contaminación del aire es solo una de las aristas del problema ambiental del municipio porque los cuerpos de agua y los suelos también han sido enormemente afectados por las actividades antrópicas.

Las normas urbanísticas no han sido suficientes para proteger las fuentes hídricas ni para controlar los asentamientos urbanos que se han ido formando en suelo rural el cual no es apto para vivienda por no tener cobertura de acueducto, alcantarillado, de recolección de basuras ni cobertura de gas que impulsa el uso de combustibles de biomasa y la quema de basuras. Adicionalmente, los materiales de construcción utilizados en este tipo de viviendas son de mala calidad aumentando el riesgo de derrumbes y accidentes. La contaminación de las fuentes hídricas genera intoxicaciones, malos olores, criaderos de vectores que transmiten enfermedades infecciosas, y los lugares donde se sitúan estas viviendas generalmente son cerca de carreteras en mal estado o que se encuentran sin pavimentar. Esta situación resalta el gran problema de segregación espacial y las marcadas diferencias en el índice de pobreza y de necesidades básicas insatisfechas en el municipio. (21,36)

El pasado 11 de julio de 2019 Barrancabermeja fue declarada Distrito Especial. Esto permitirá que los recursos de la nación al municipio sean girados prioritariamente a fondos especiales para el desarrollo de proyectos. Los distritos especiales pretenden fomentar el desarrollo de la región mediante la mejora de los medios de transporte, sistema vial, inversiones para la ejecución de proyectos, mejora de los servicios públicos, la educación, la salud y la calidad de vida. Con lo anterior se garantiza la inversión de capital privado, la explotación de los bienes y servicios producidos por la población, la creación de empleo, paliar la pobreza y generar riqueza, mejorar las condiciones ambientales autónomamente.² Se aspira que, con esta declaración, se puedan llevar a cabo las acciones que propenden por el mejoramiento de la calidad de vida y del ambiente de Barrancabermeja.

² <http://ieu.unal.edu.co/noticias-del-ieu/item/que-son-y-para-que-existen-los-distritos-en-colombia>

5.1 Fortalezas y limitaciones del estudio, potenciales fuentes de error

Este es el primer estudio de calidad del aire que se realiza en Barrancabermeja, teniendo en cuenta la importancia que este municipio tiene dentro del sector económico e industrial de nuestro país. La información que proporciona esta investigación abre la posibilidad de generar nuevas preguntas de investigación e hipótesis sobre la relación ambiente-salud.

Encontramos como limitaciones del estudio:

- El tipo de notificación de los eventos de IRA genera algunas limitaciones ya que al ser semanal no permite discriminar la información por sexo, no tiene identificación de los pacientes para identificar re-consultas ni información sociodemográfica de los casos.
- Las variables tienen escalas de tiempo diferente y al tener que promediar por días y semanas para poder analizar las variables en conjunto hace que disminuya la precisión y calidad de la información.
- Aunque los hallazgos del análisis de series de tiempo muestran una influencia estadísticamente significativa de las variables independientes sobre la variable respuesta, promediar los niveles de contaminación a semana redujo notablemente el número de datos para correr adecuadamente el GAM.
- Al ser un estudio ecológico puede caer dentro de la falacia ecológica porque no se puede asumir que todos los habitantes estén igualmente expuestos a los niveles de contaminación.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

El PM₁₀ es el contaminante que presenta mayor número de excedencias frente a los otros contaminantes y los niveles de contaminación registrados mostraron que los picos más altos de concentraciones están, casi siempre, hacia la primera mitad del año. Este hallazgo coincide con las alertas ambientales que se han generado en los últimos años en otras ciudades del país, principalmente durante el mes de marzo que es donde ocurre el paso de temporada seca a lluviosa que generan alteraciones atmosféricas que impiden el adecuado flujo de corrientes de aire y fenómenos de inversión térmica que concentran los contaminantes en el ambiente.

Existe una relación estadísticamente significativa entre la contaminación por material particulado y los casos de infección respiratoria aguda, aunque el efecto de rezago no genera cambios, puede que esto se explique por el bajo número de datos que pudieron ser analizados. Dicha relación requiere de acciones en salud pública que propendan por el cumplimiento de las normas ambientales y urbanísticas para poder mejorar la calidad del aire del municipio y reducir el impacto de la contaminación en la salud de la población.

Barrancabermeja está presentando una problemática ambiental bastante compleja que afecta la calidad del aire, la calidad del agua y el estado de los suelos por falta de cumplimiento de las normas ambientales y urbanas que rigen el territorio.

6.2 Recomendaciones

El día de la semana es un factor clave en la modelación horaria del material particulado y debería introducirse el día de la semana como variable en los modelos aditivos generalizados para evitar factores de confusión. Los monitoreos realizados por la

Secretaría de Ambiente mostraron que existen otras zonas del municipio que presentan niveles de contaminación mucho más altos que los registrados por la RMCA de Ecopetrol, por lo tanto, deberían hacerse estudios tomando como referencia otras áreas de influencia, también deberían tenerse en cuenta a futuro la adición de aire intramuros, exposición al humo de tabaco y circulación de virus respiratorios.

Se recomienda fortalecer los sistemas de vigilancia ambiental en el municipio que permitan mantener enterada a la comunidad de los niveles de contaminación que se presentan y los efectos secundarios tanto agudos como crónicos que estos tienen en la salud de la población general y grupos vulnerables.

Al encontrar que la estación Rosario presenta niveles de contaminación mucho más altos, también es importante fortalecer la vigilancia de estos efectos sobre la salud de los trabajadores y es importante realizar estudios que estimen los niveles de exposición y carga de enfermedad ocupacional. También es importante que el plan de descontaminación del aire del municipio haga el monitoreo y vigilancia de otros contaminantes como los componentes orgánicos volátiles (COV) que posiblemente se encuentran en mayor concentración que en otros municipios. El monitoreo continuo de calidad coadyuvaría a mejorar la predicción y determinar cuáles de las fuentes contaminantes son la de mayor impacto.

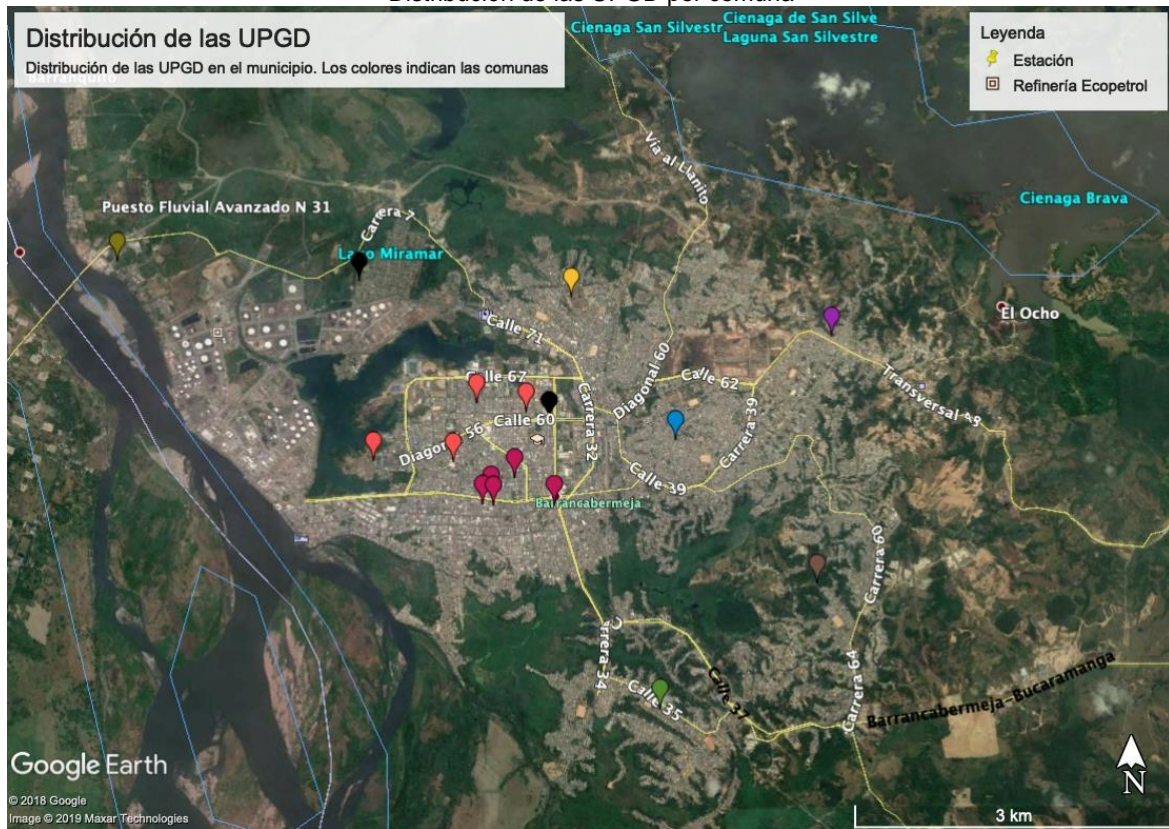
A. Anexo: Mapas

Delimitación de la refinería de Ecopetrol



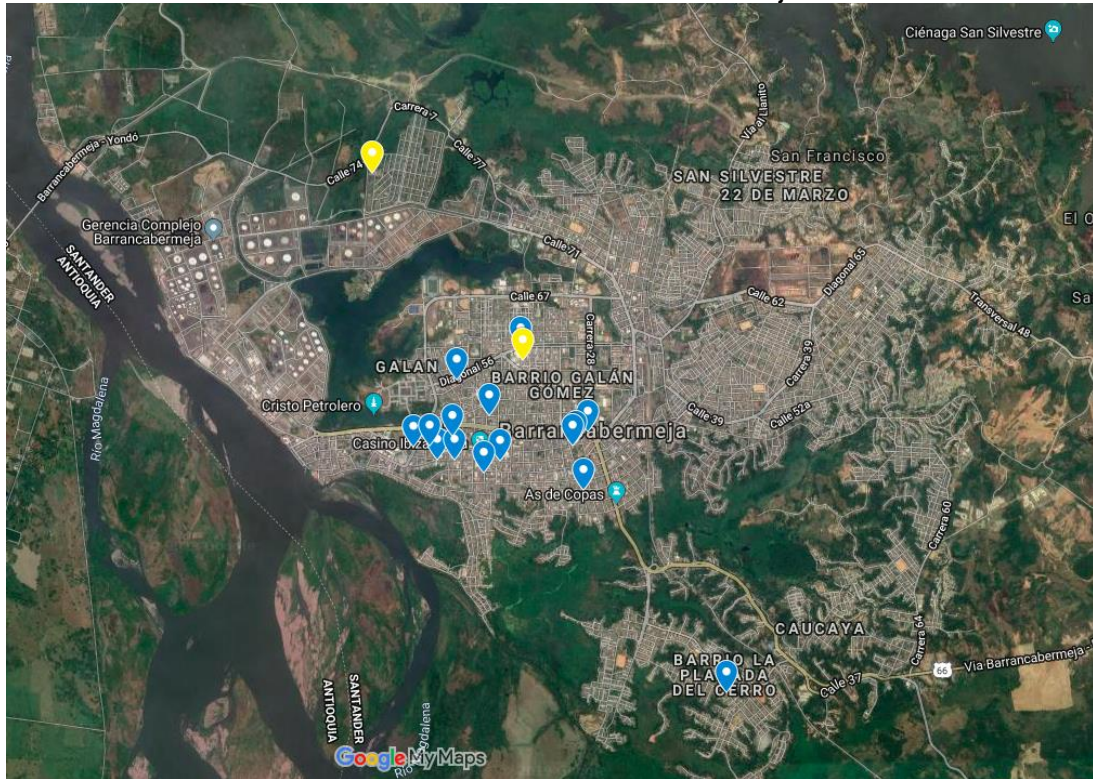
Fuente: Google Earth, elaboración propia

Distribución de las UPGD por comuna



Fuente: Google Earth, elaboración propia

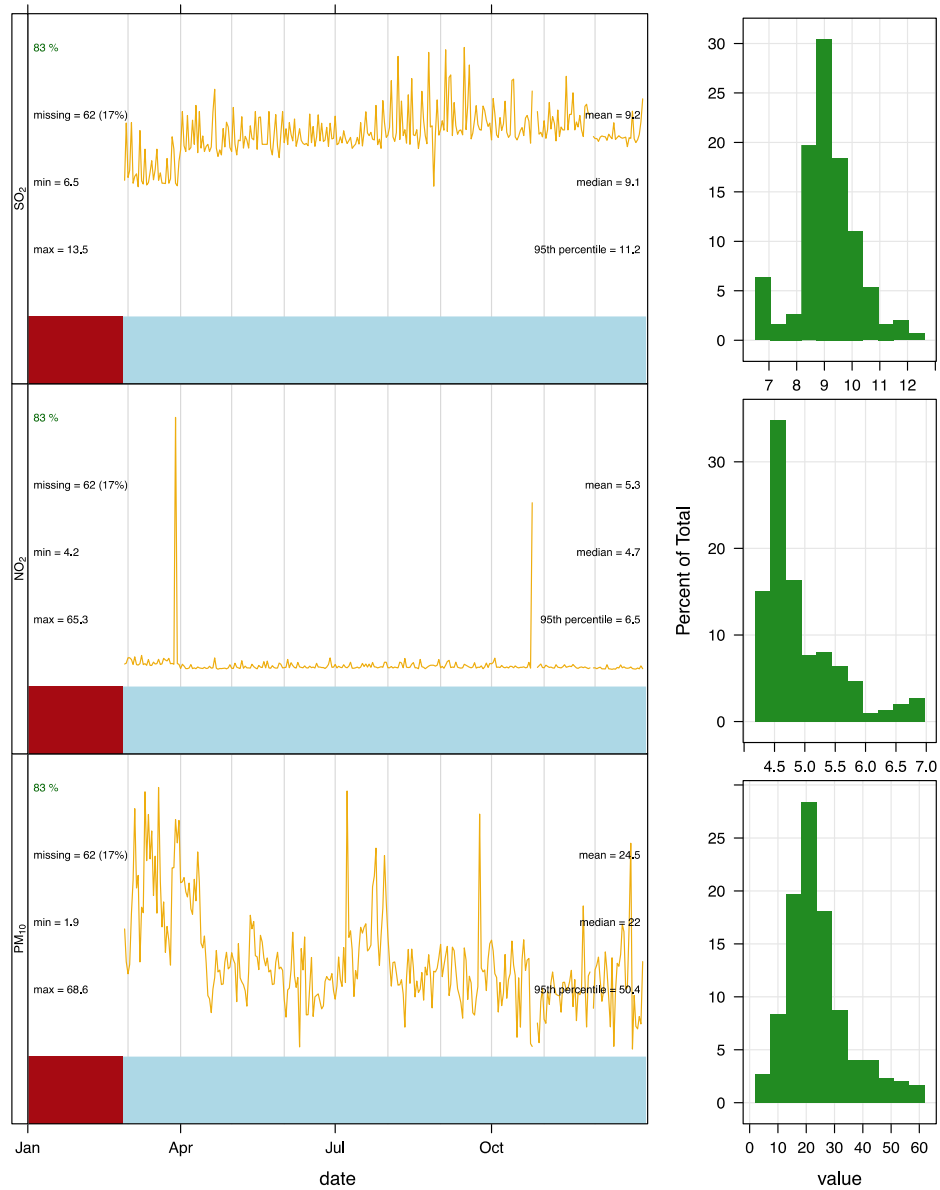
Ubicación de las fuentes de emisión fijas



Fuente: Google Maps, elaboración propia

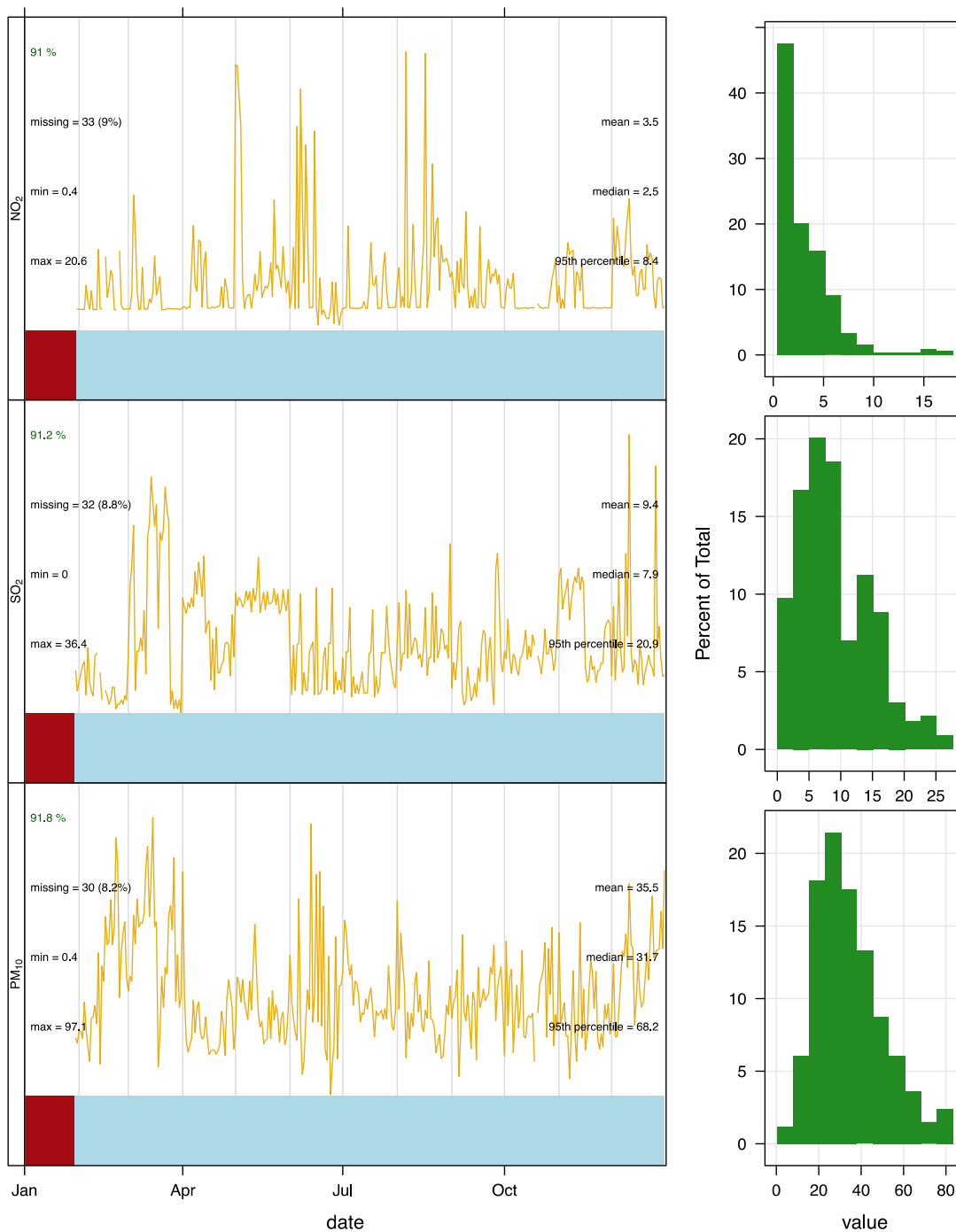
B. Anexo: Gráficas resumen de datos de las estaciones

Estación Policlínica, 2014



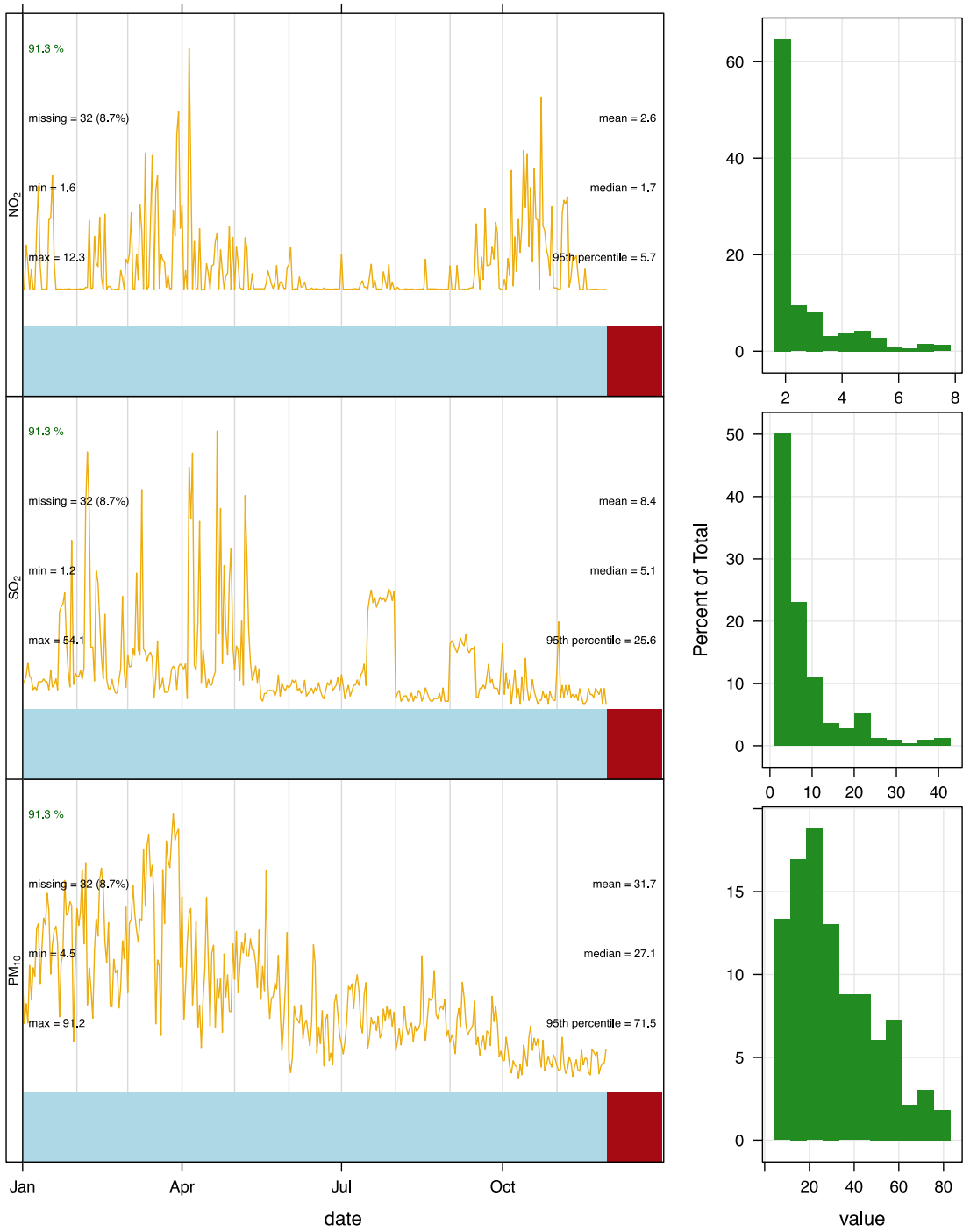
Fuente: elaboración propia

Estación Policlínica, 2015



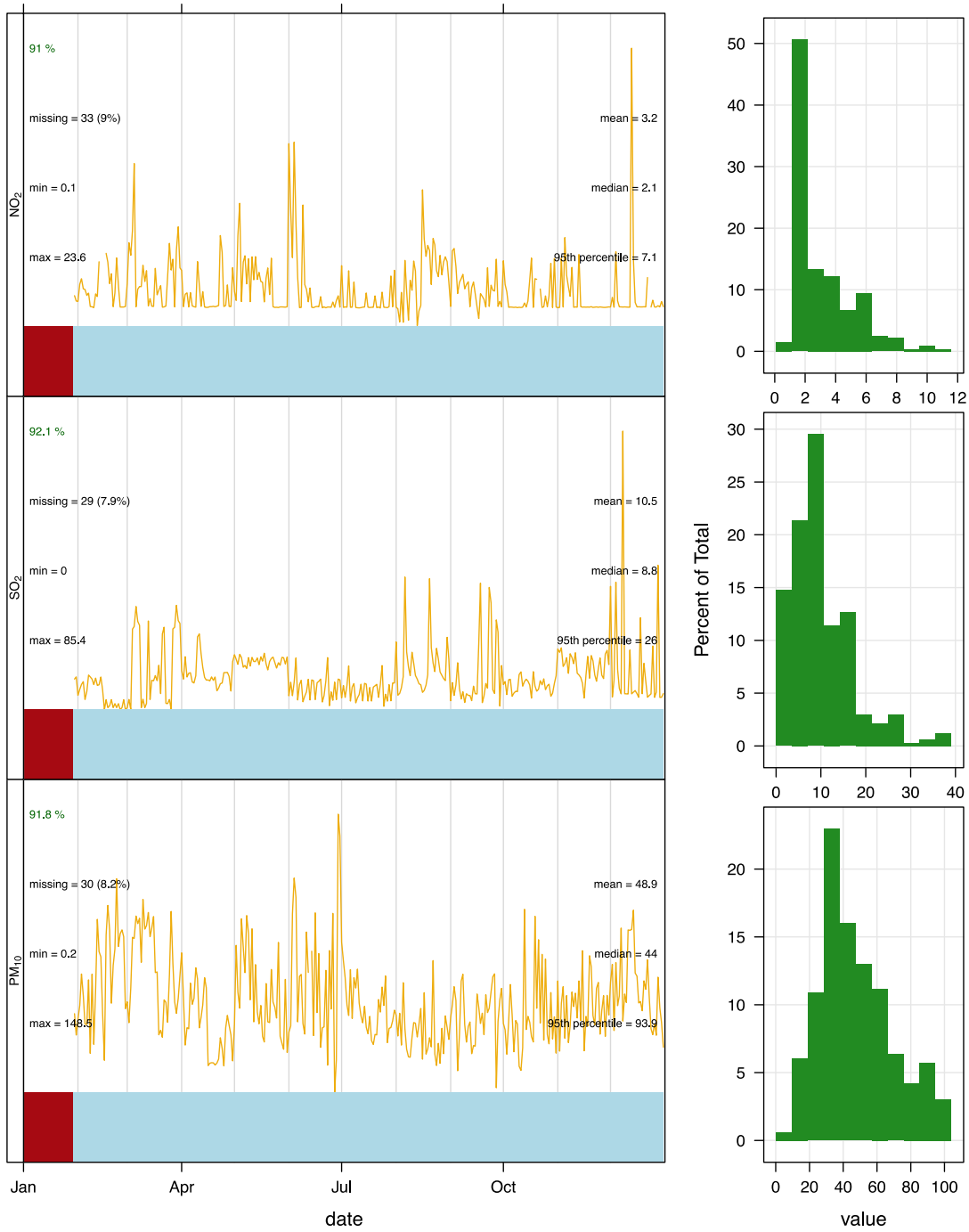
Fuente: elaboración propia

Estación Policlínica, 2016



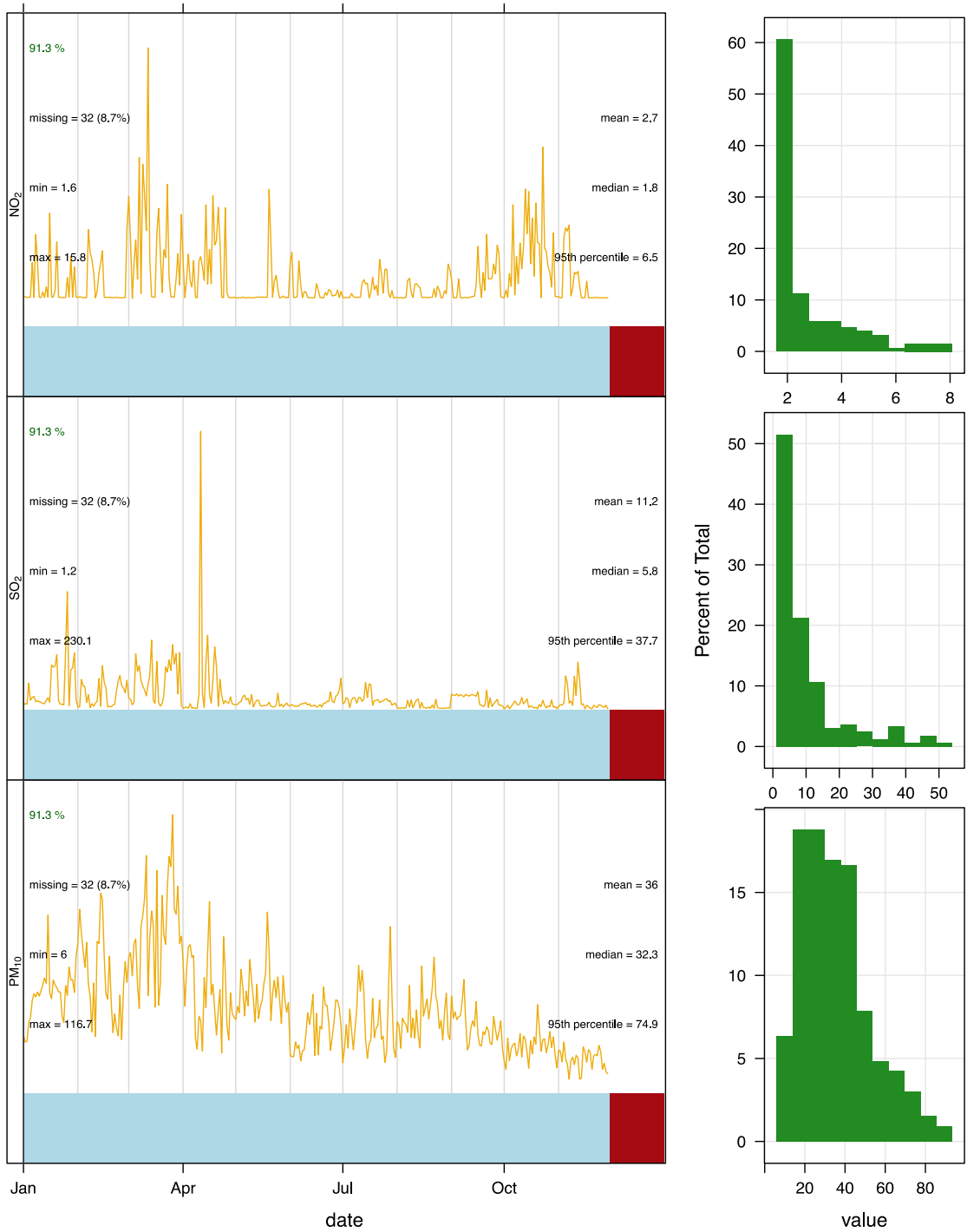
Fuente: elaboración propia

Estación Rosario, 2015



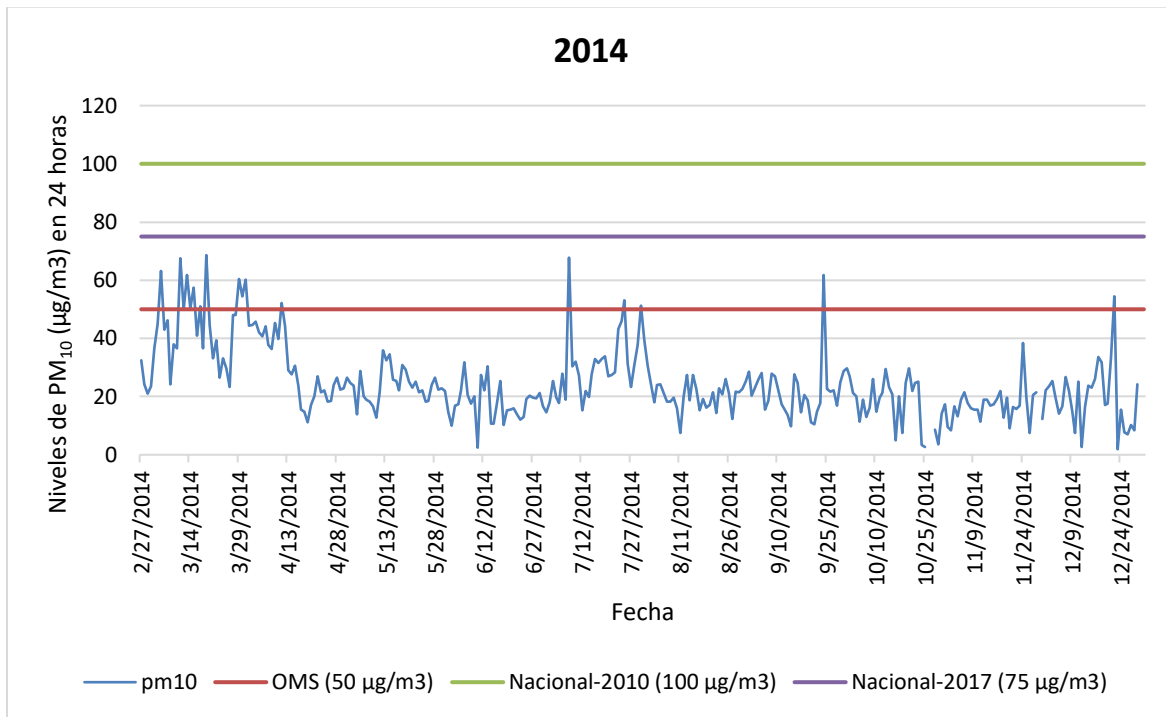
Fuente: elaboración propia

Estación Rosario, 2016

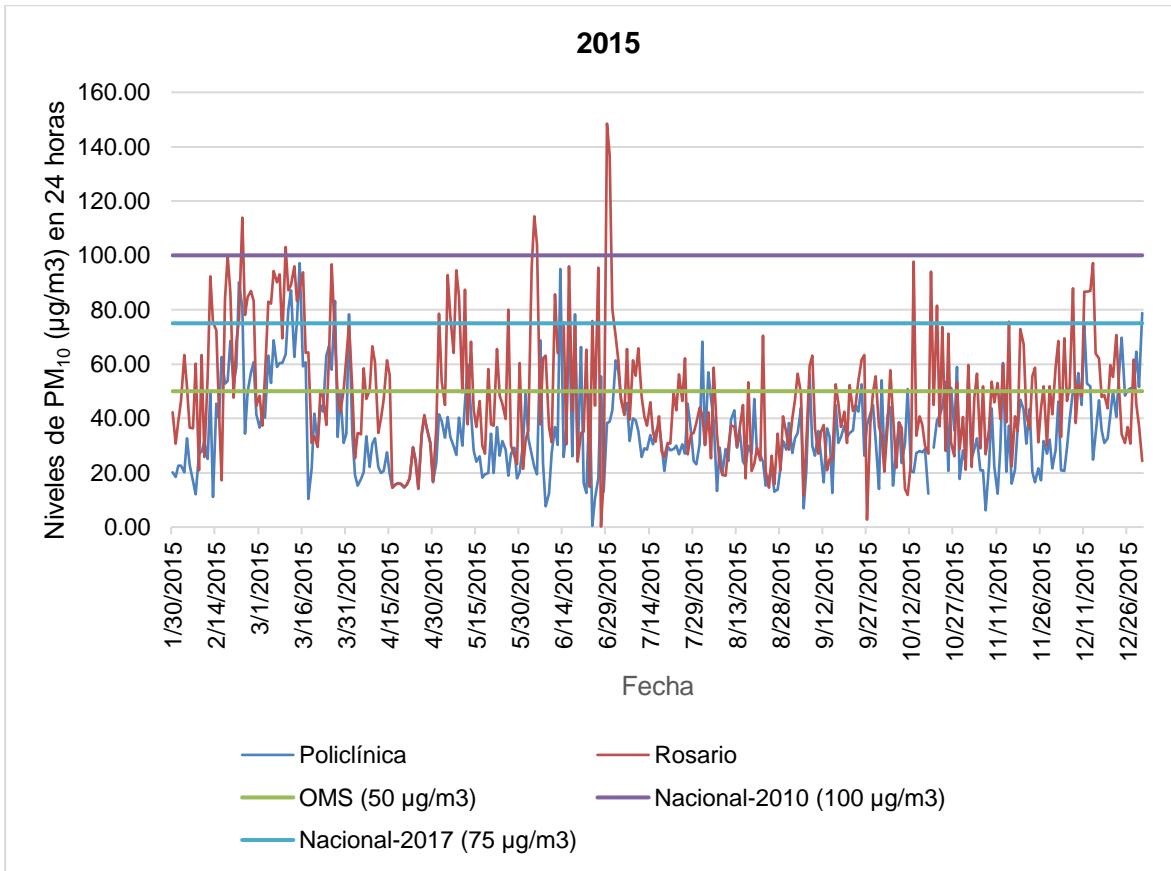


Fuente: elaboración propia

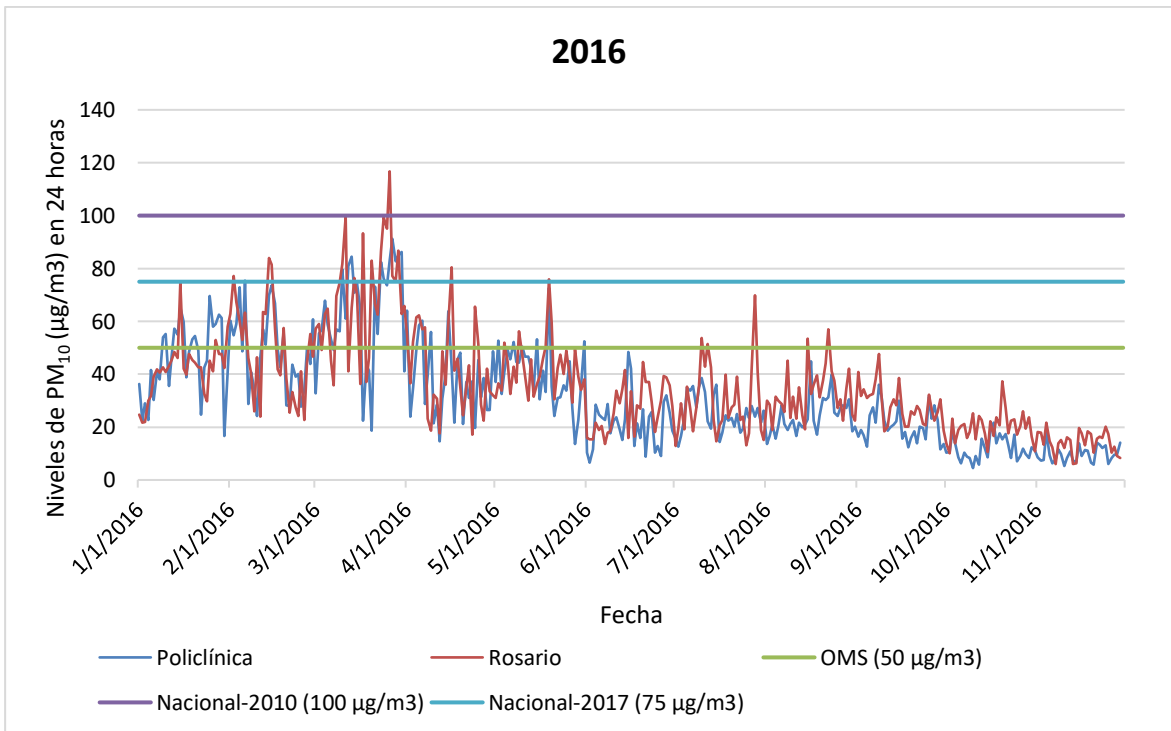
C. Anexo: Excedencias de PM₁₀ frente a las normas ambientales



Fuente: elaboración propia

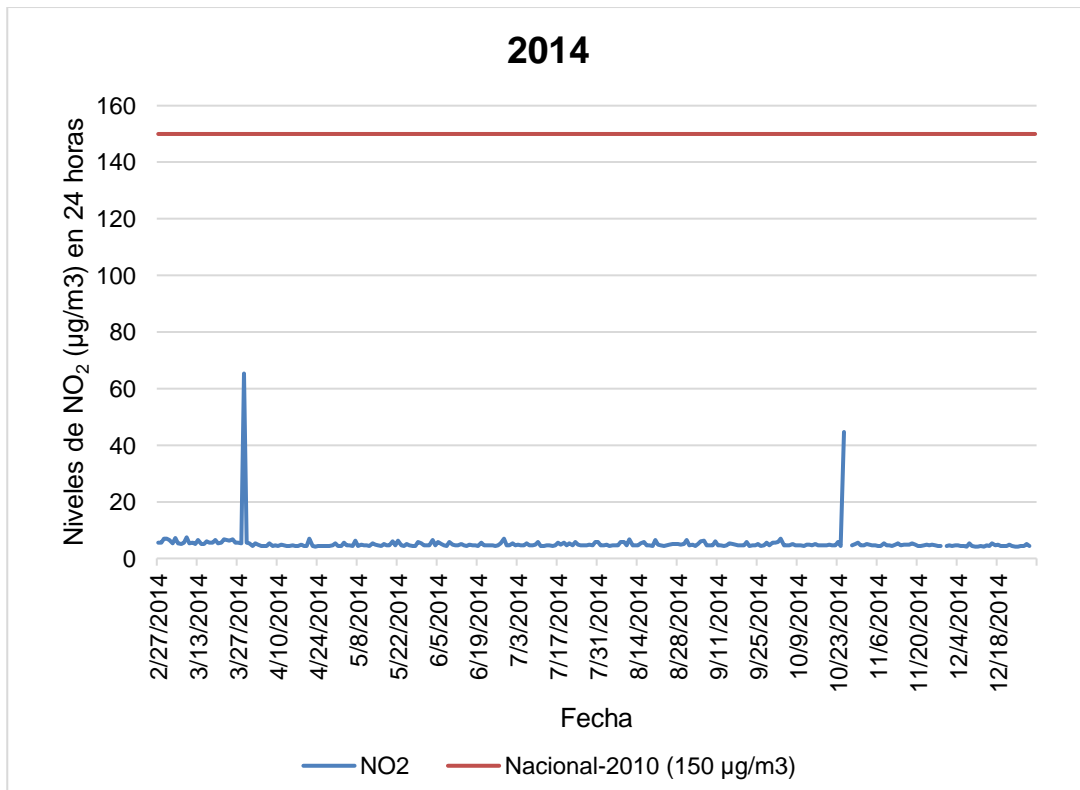


Fuente: elaboración propia

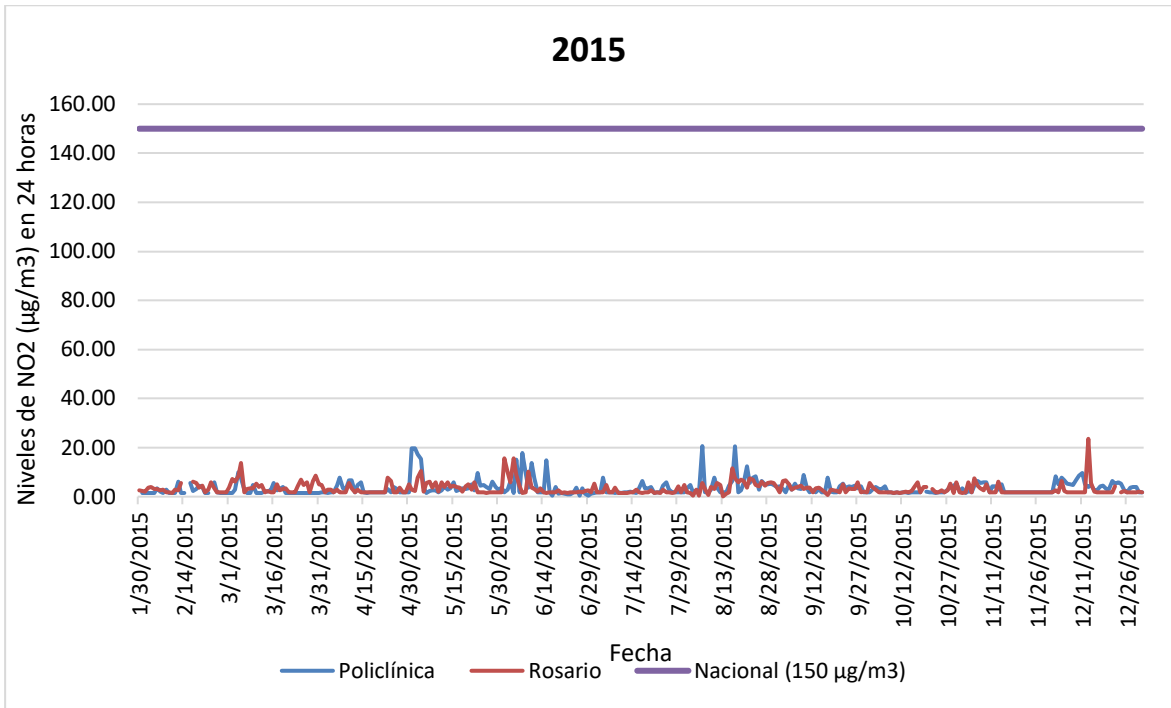


Fuente: elaboración propia

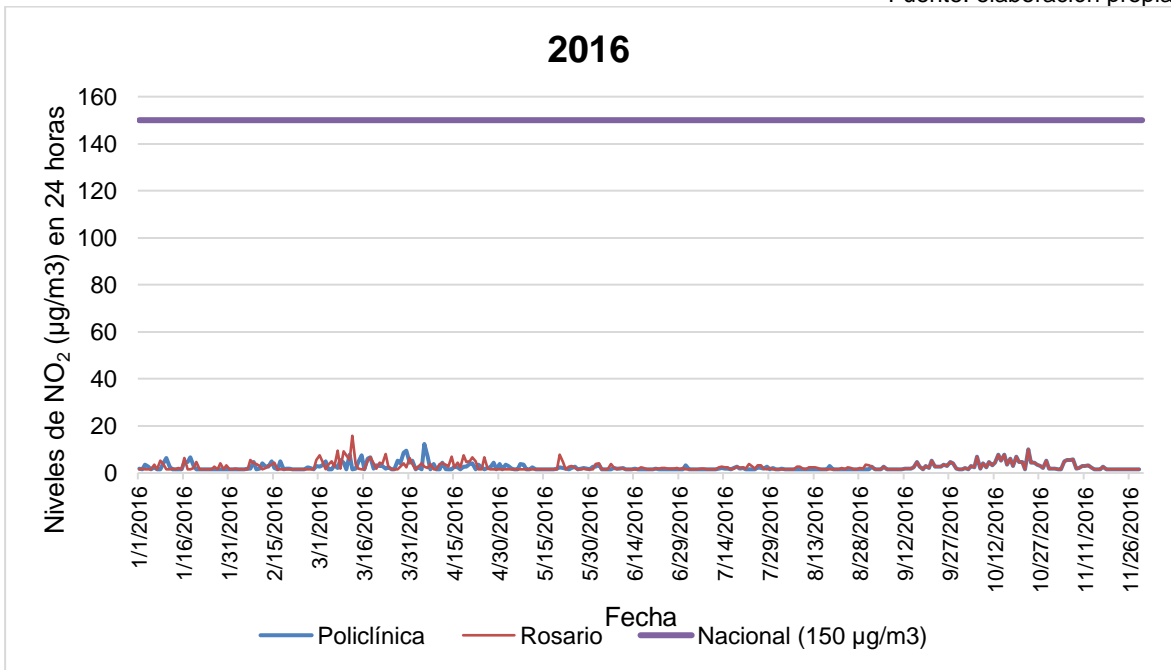
D. Anexo: Excedencias de NO₂ frente a las normas ambientales



Fuente: elaboración propia

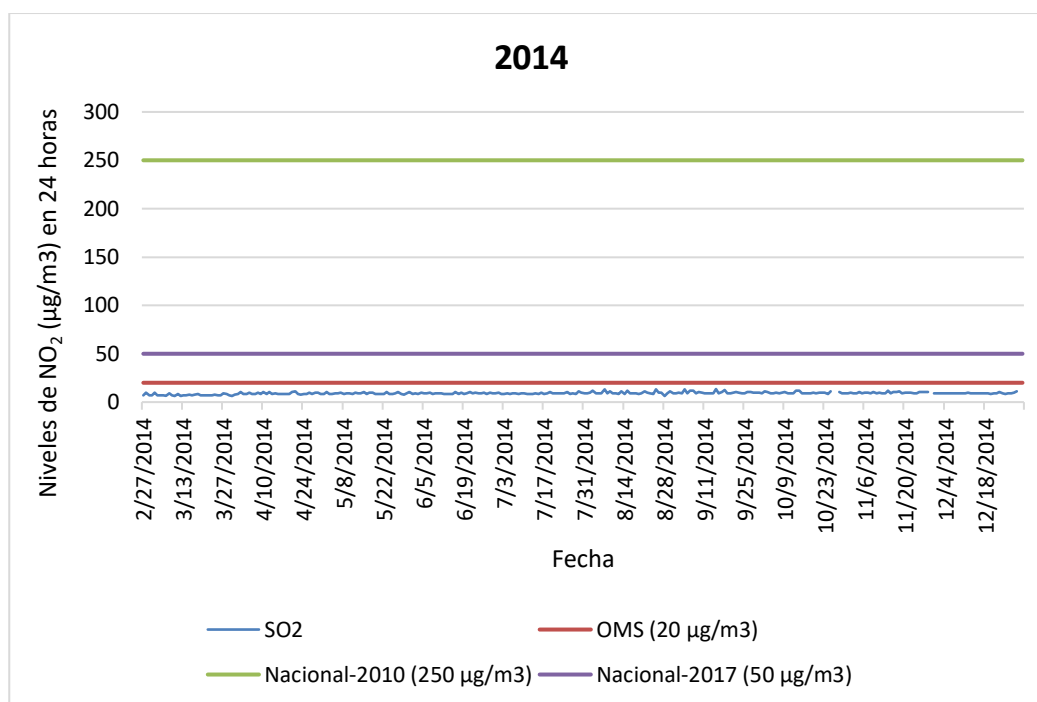


Fuente: elaboración propia

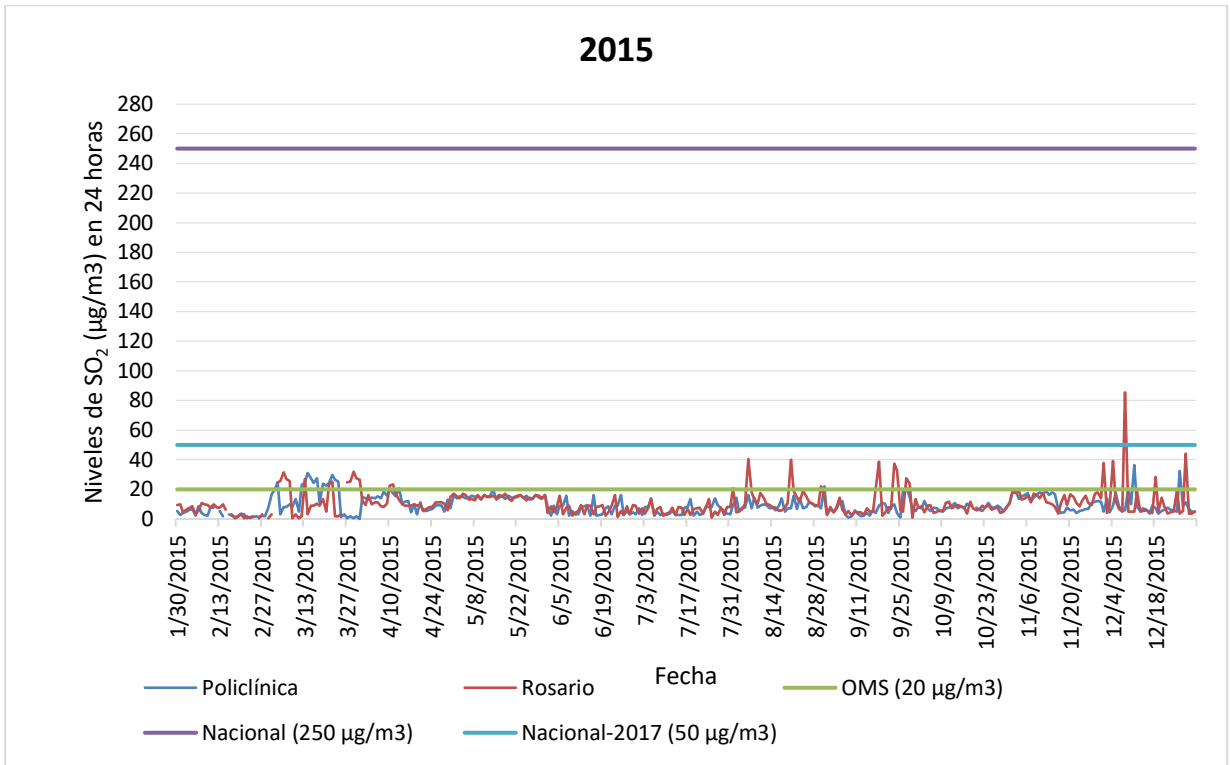


Fuente: elaboración propia

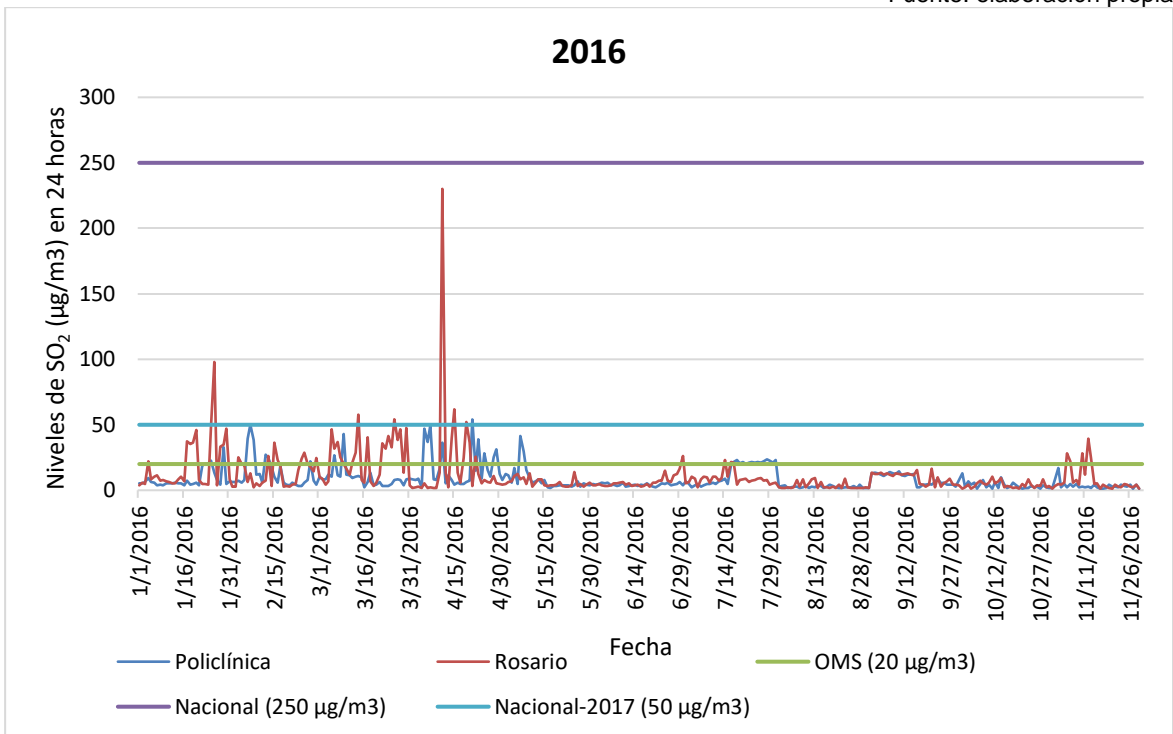
E. Anexo: Excedencias de SO₂ frente a las normas ambientales



Fuente: elaboración propia



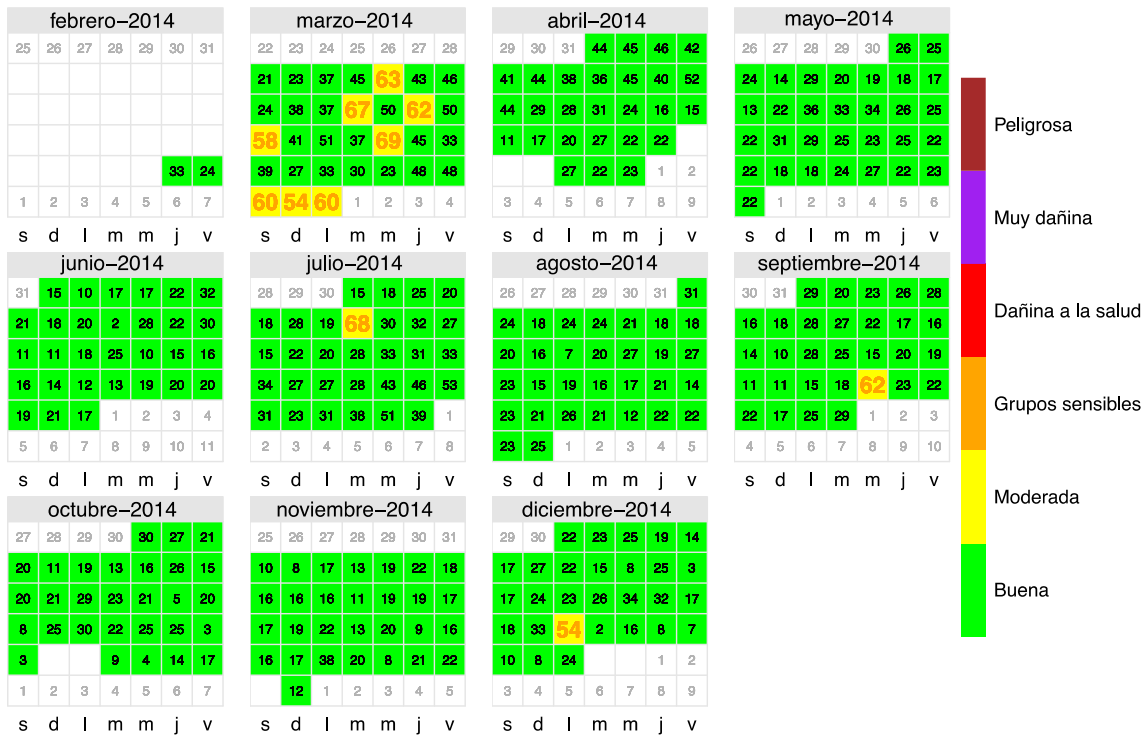
Fuente: elaboración propia



Fuente: elaboración propia

F. Anexo: CalendarPlots PM₁₀ con relación al ICA

PM₁₀ estación Policlínica, 2014



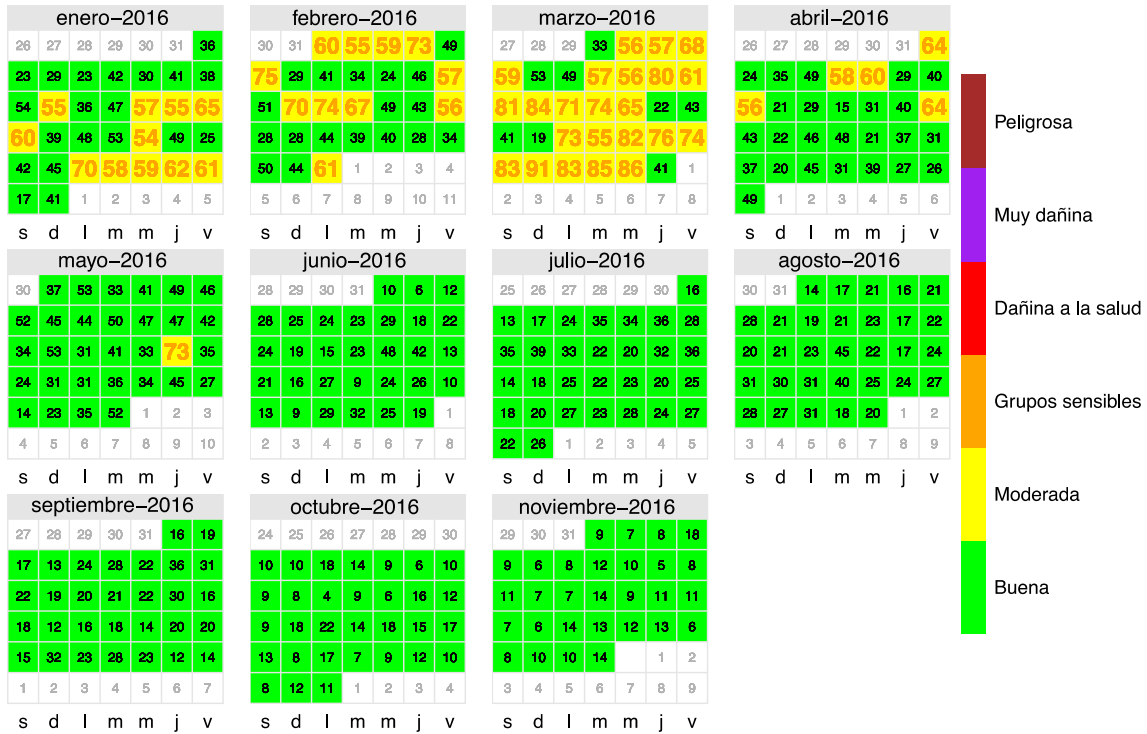
Fuente: elaboración propia

PM₁₀ estación Policlínica, 2015



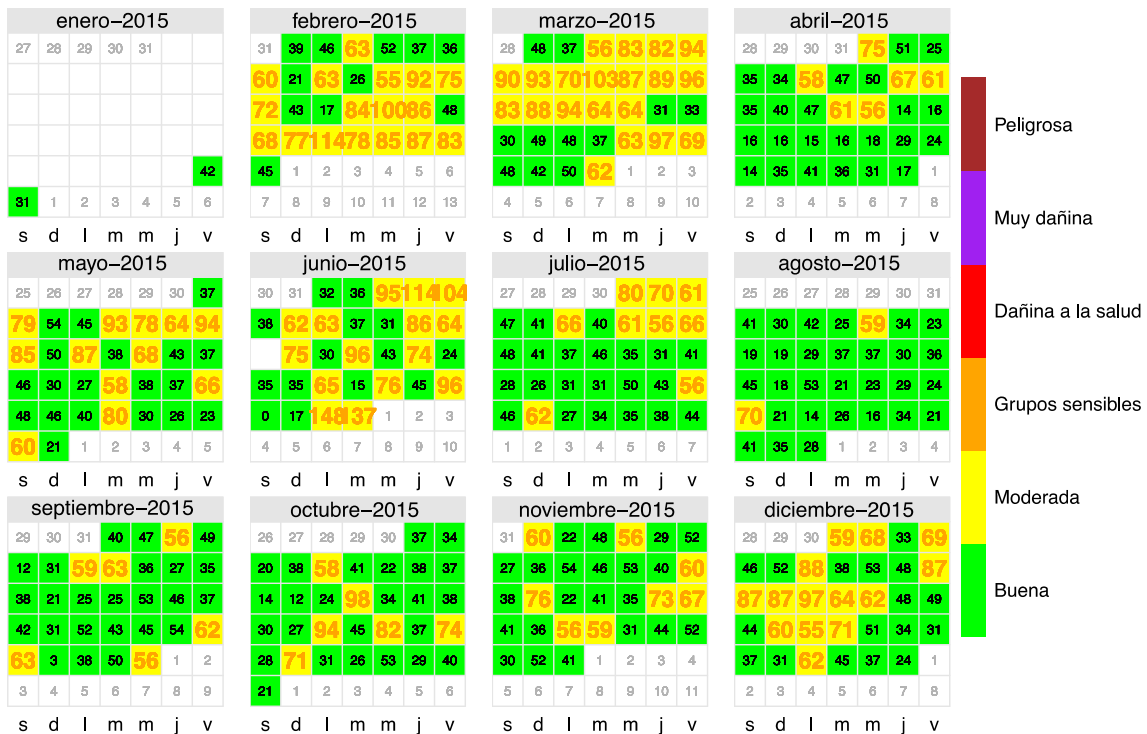
Fuente: elaboración propia

PM₁₀ estación Policlínica, 2016



Fuente: elaboración propia

PM₁₀ estación Rosario, 2015



Fuente: elaboración propia

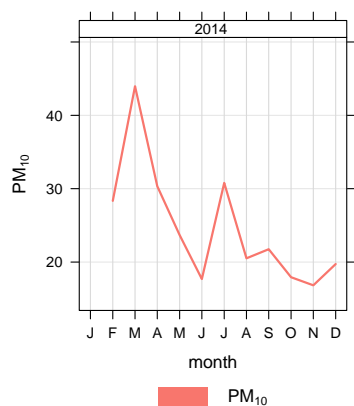
PM₁₀ estación Rosario, 2016



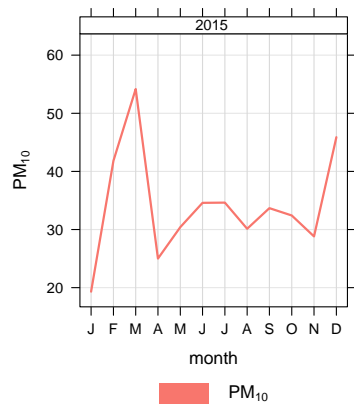
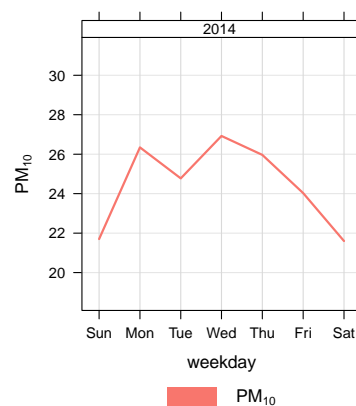
Fuente: elaboración propia

G. Gráficos *TimeVariation* PM₁₀

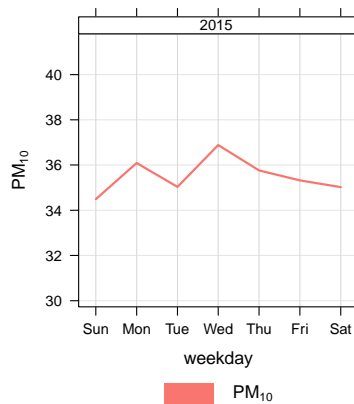
Estación Policlínica

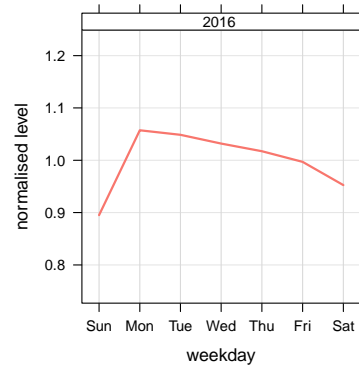
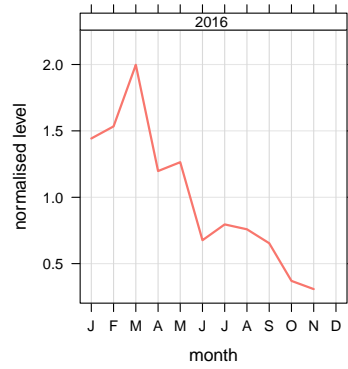


mean and 95% confidence interval in mean



mean and 95% confidence interval in mean



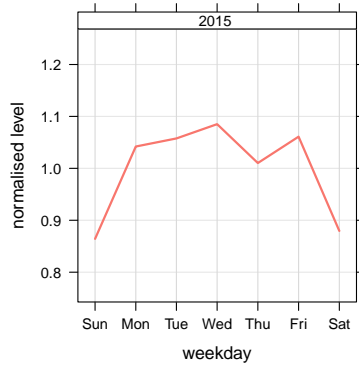
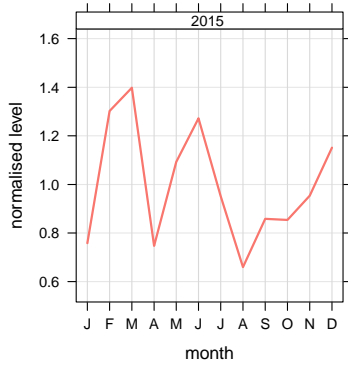


mean and 95% confidence interval in mean

PM₁₀

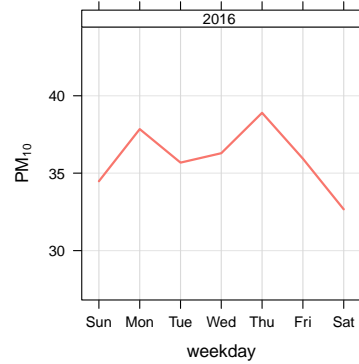
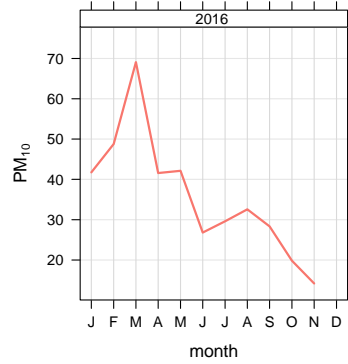
Fuente: elaboración propia

Estación Rosario



mean and 95% confidence interval in mean

PM₁₀



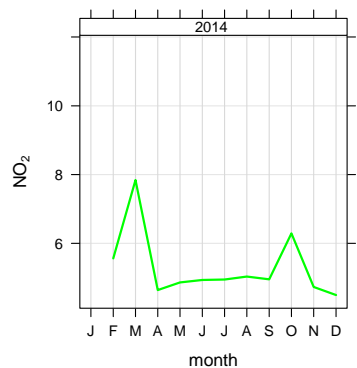
mean and 95% confidence interval in mean

PM₁₀

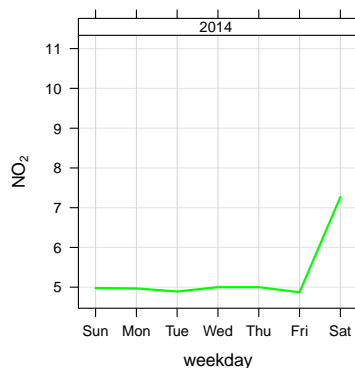
Fuente: elaboración propia

H. Gráficos *TimeVariation* NO₂

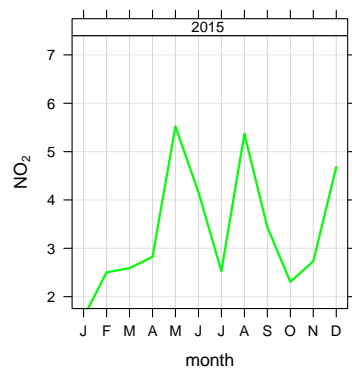
Estación Policlínica



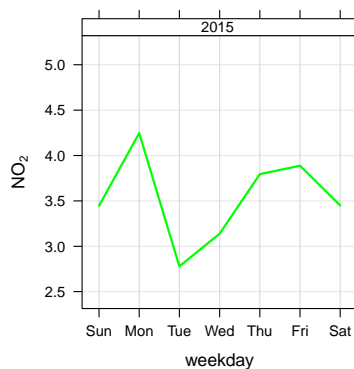
NO₂
mean and 95% confidence interval in mean



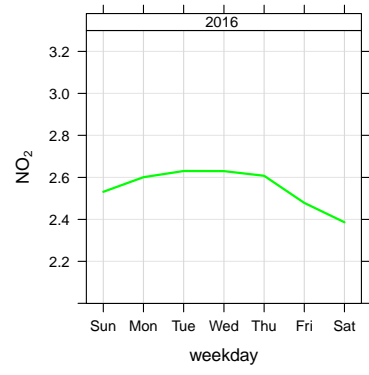
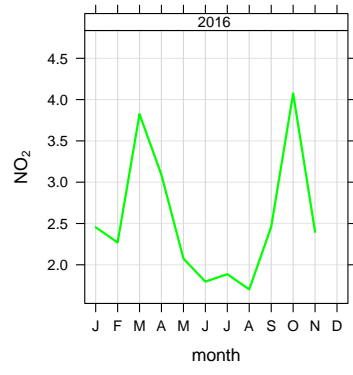
NO₂



NO₂
mean and 95% confidence interval in mean



NO₂

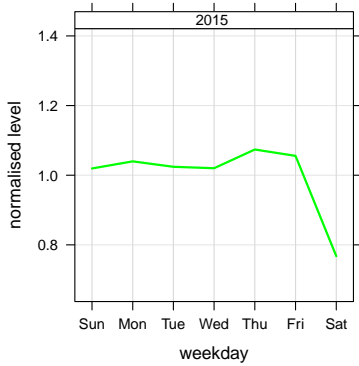
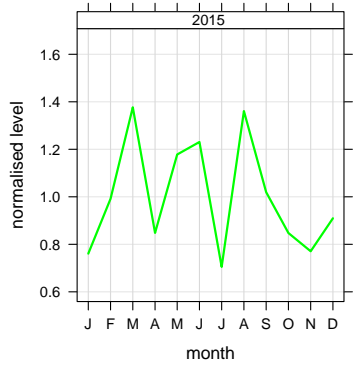


mean and 95% confidence interval in mean

NO₂

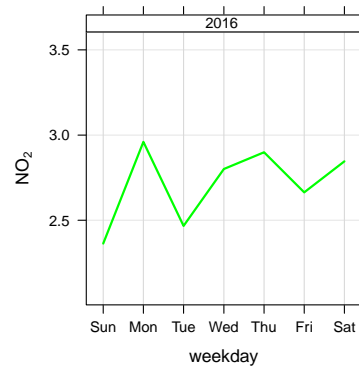
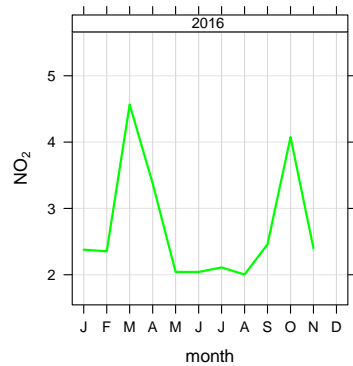
Fuente: elaboración propia

Estación Rosario



mean and 95% confidence interval in mean

NO₂



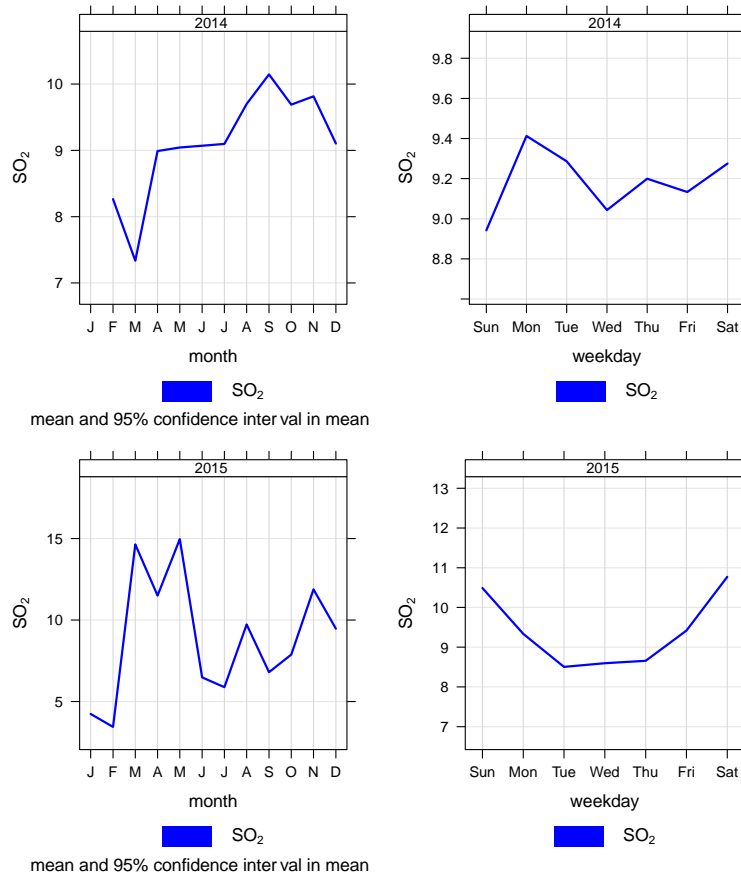
mean and 95% confidence interval in mean

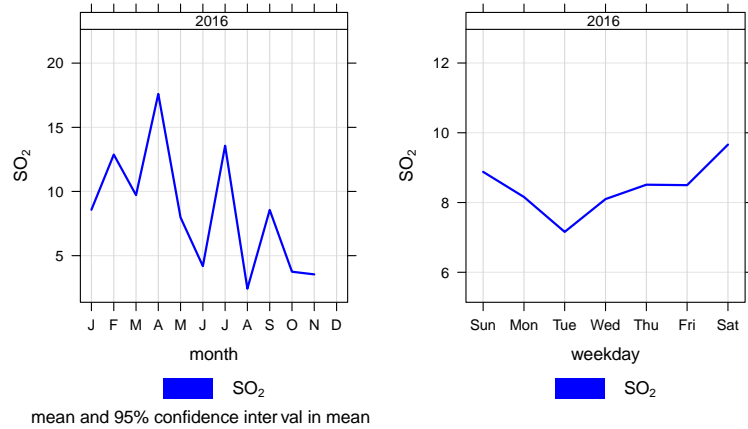
NO₂

Fuente: elaboración propia

I. Gráficos *TimeVariation* SO₂

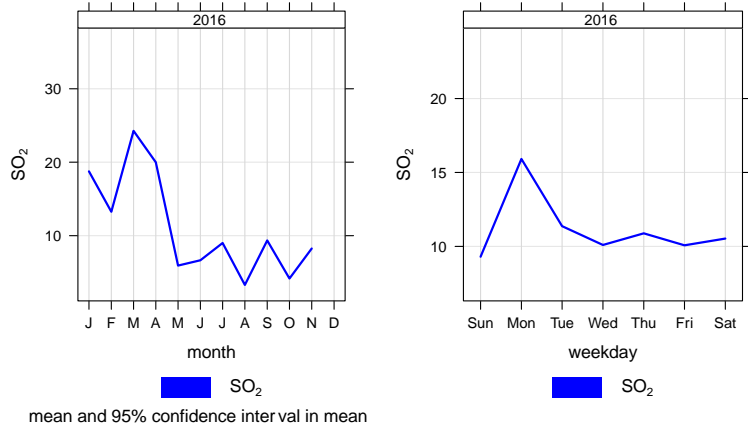
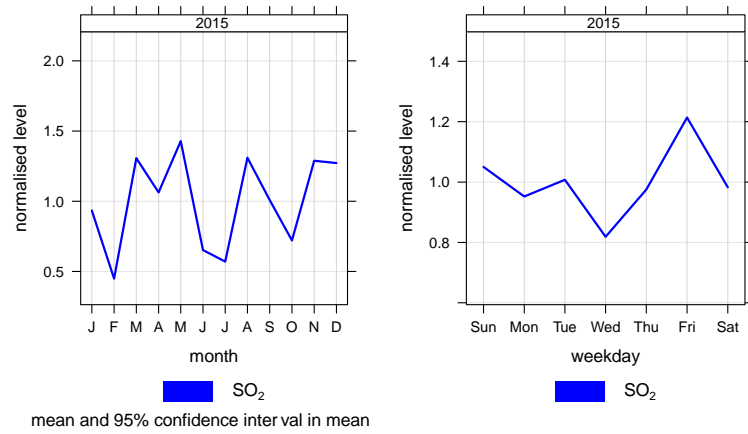
Estación Policlínica





Fuente: elaboración propia

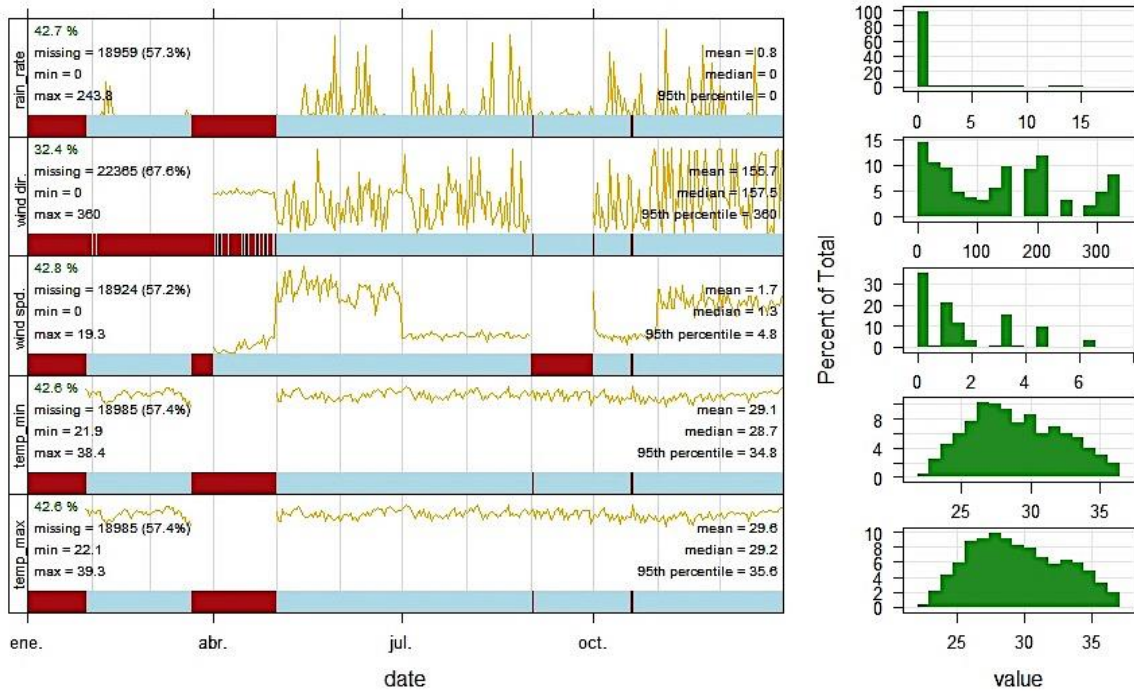
Estación Rosario



Fuente: elaboración propia

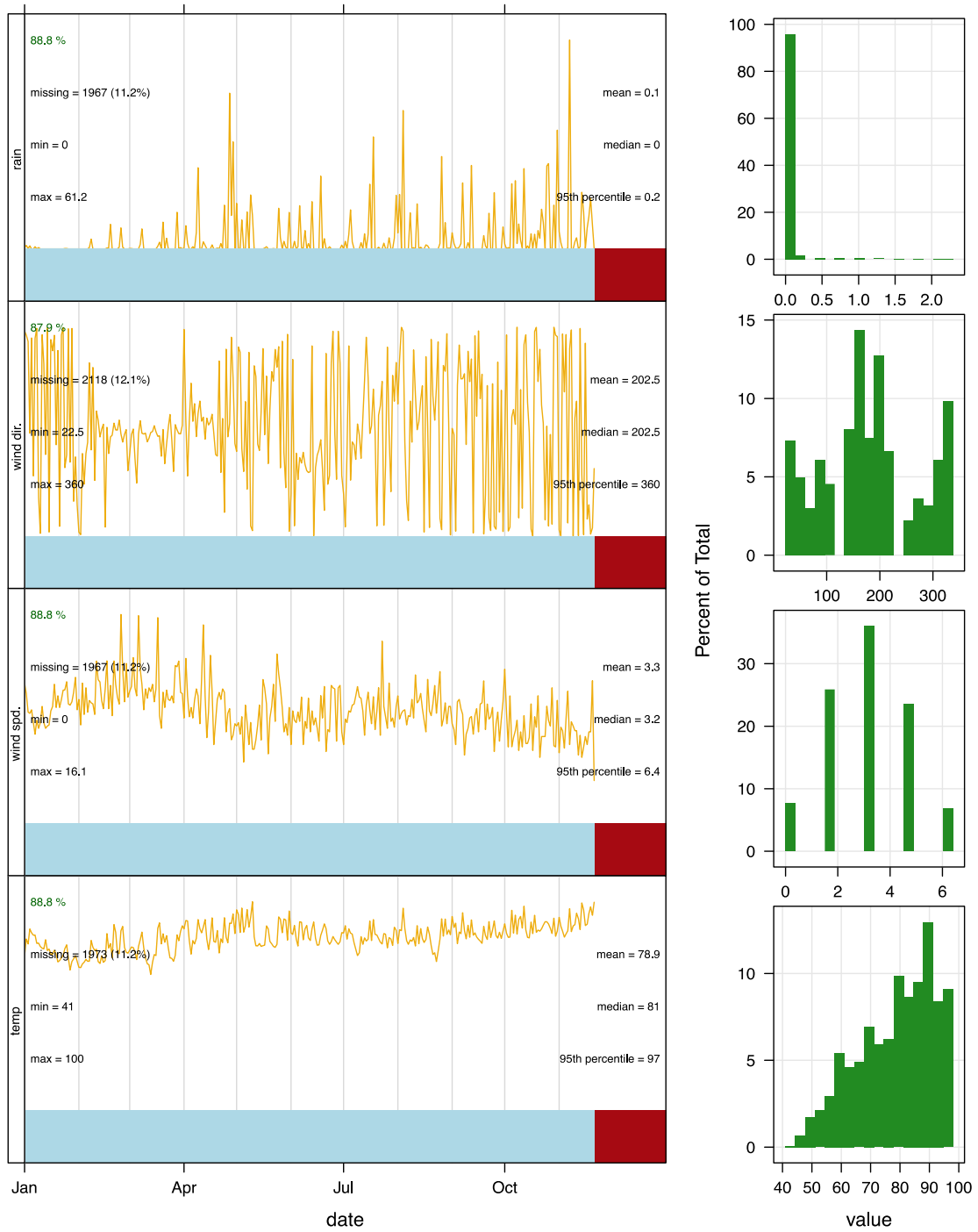
J. Anexo: Gráficas resumen de las variables meteorológicas

Estación Policlínica, 2015



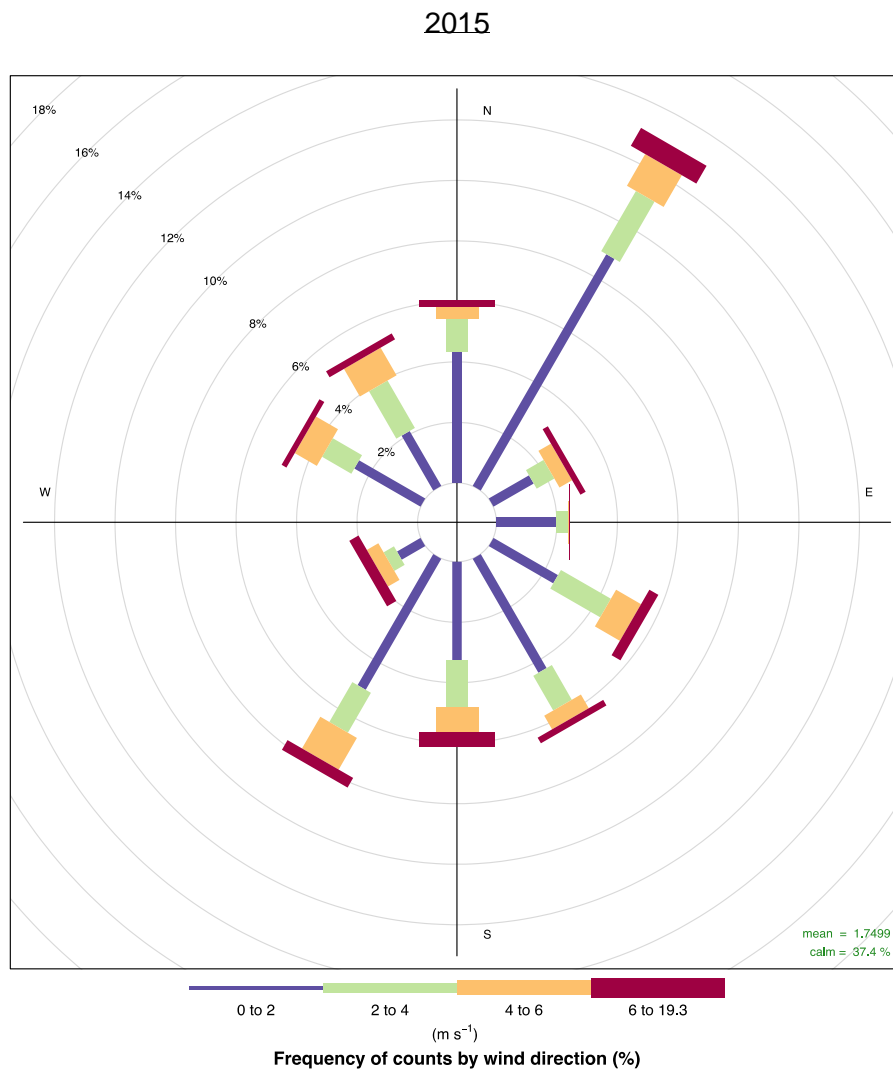
Fuente: elaboración propia

Estación Policlínica, 2016



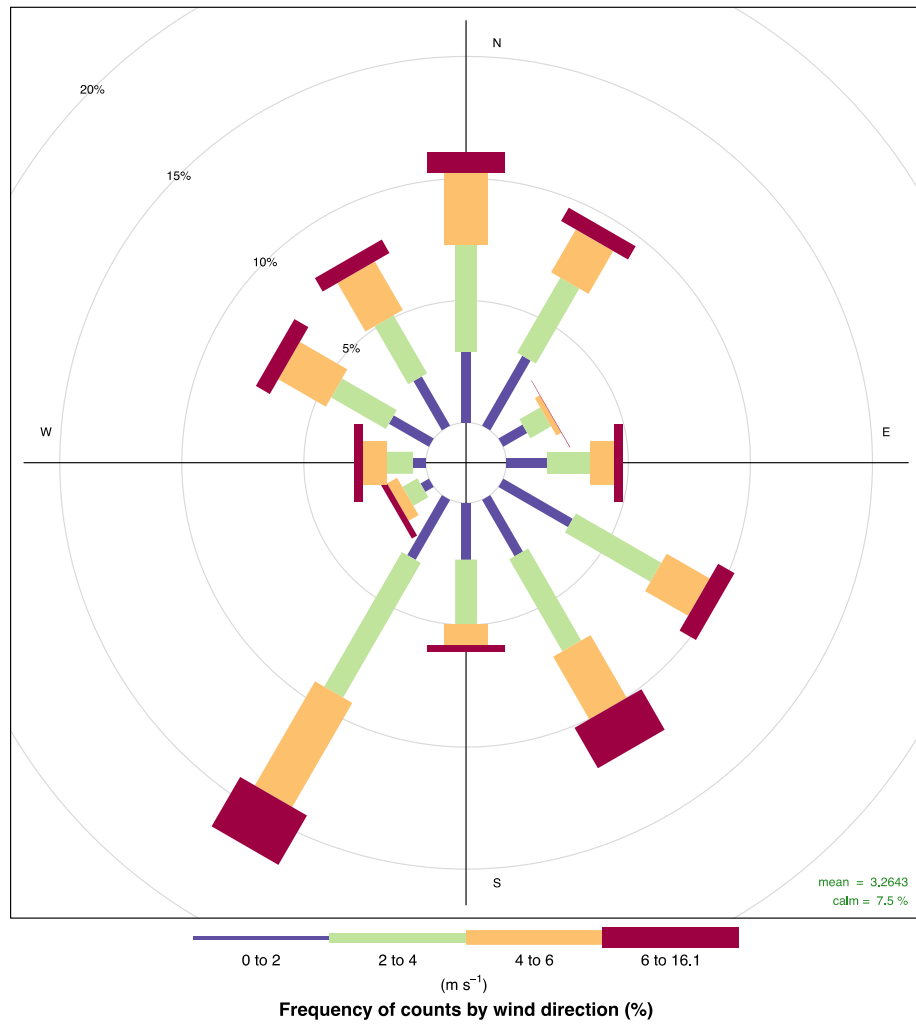
Fuente: elaboración propia

K. Anexo: Rosa de vientos

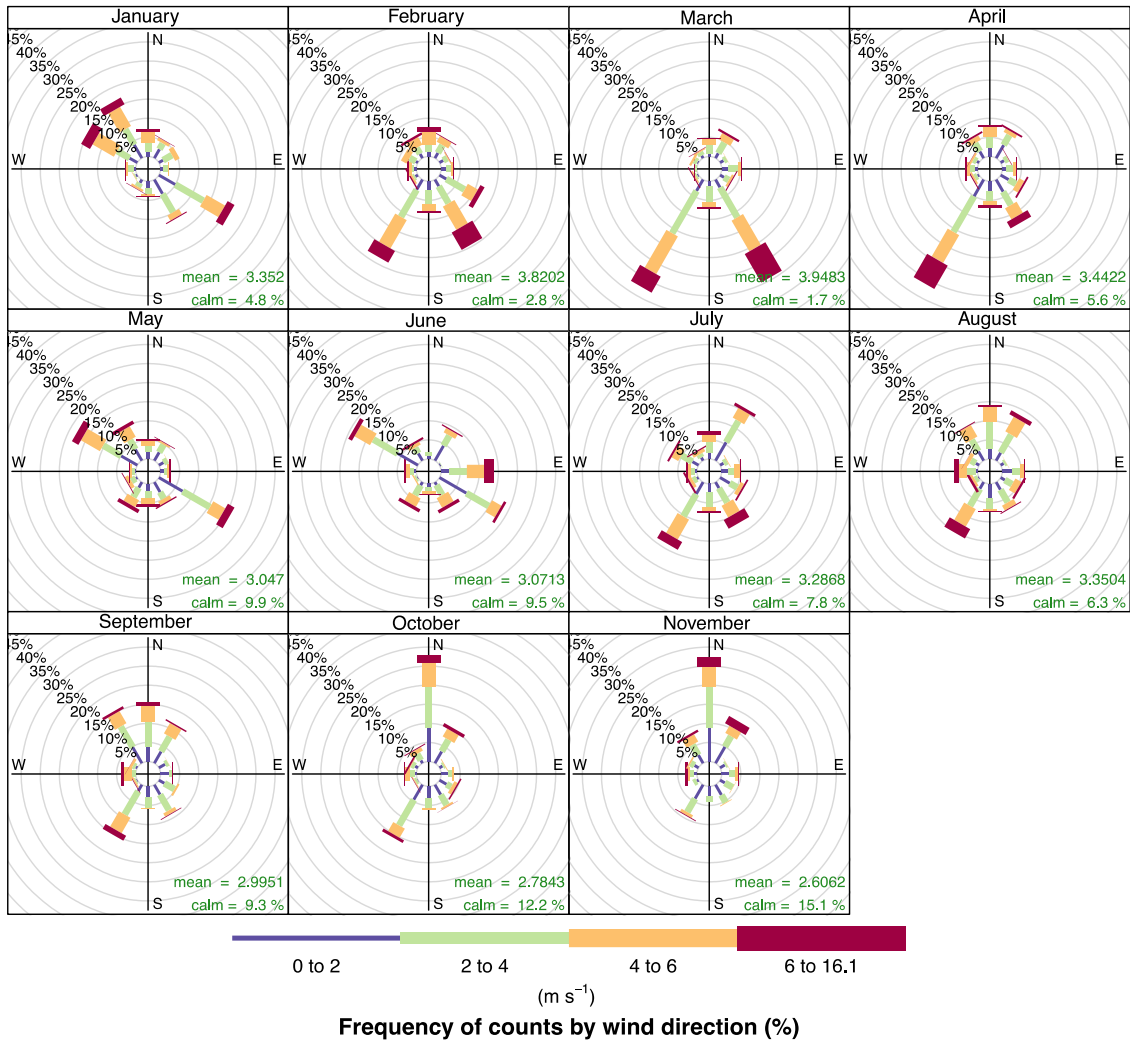


2016

Fuente: elaboración propia

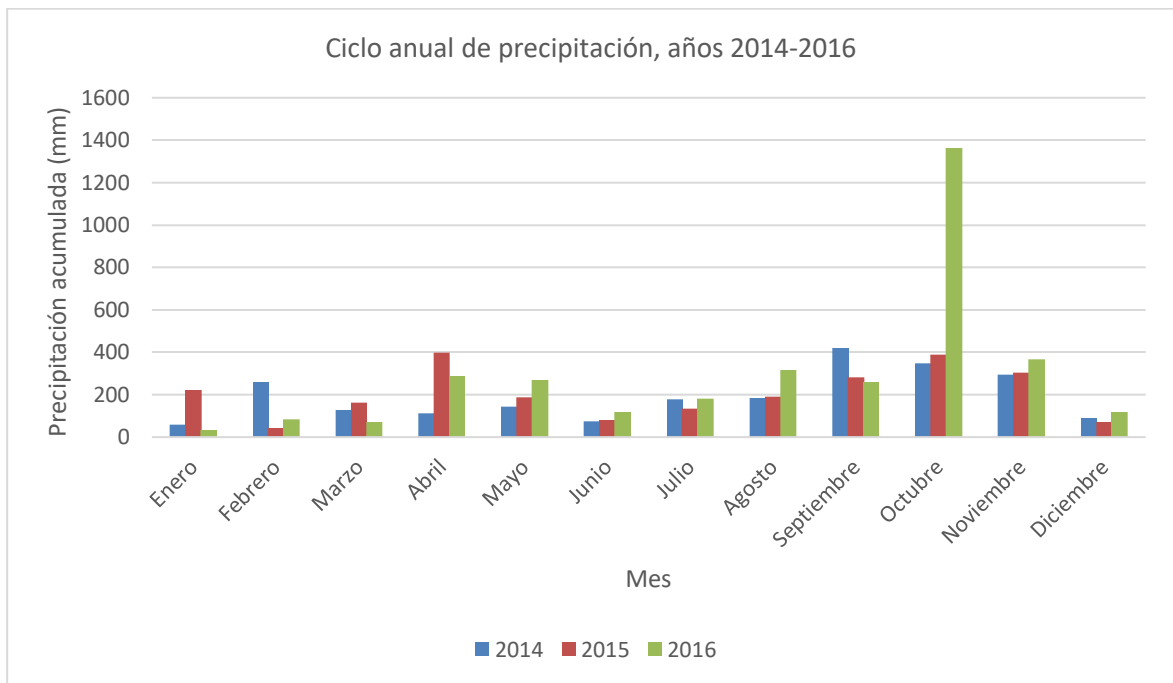


Fuente: elaboración propia

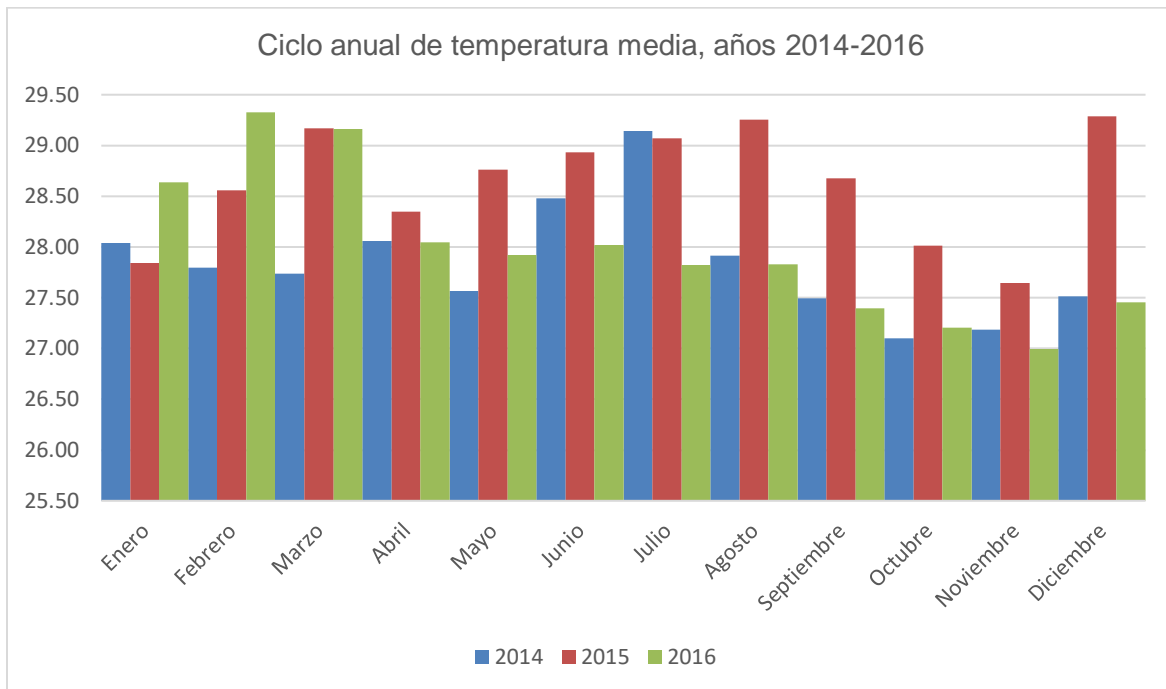


Fuente: elaboración propia

L. Anexo: Ciclos anuales de temperatura y precipitación



Fuente: IDEAM, elaboración propia



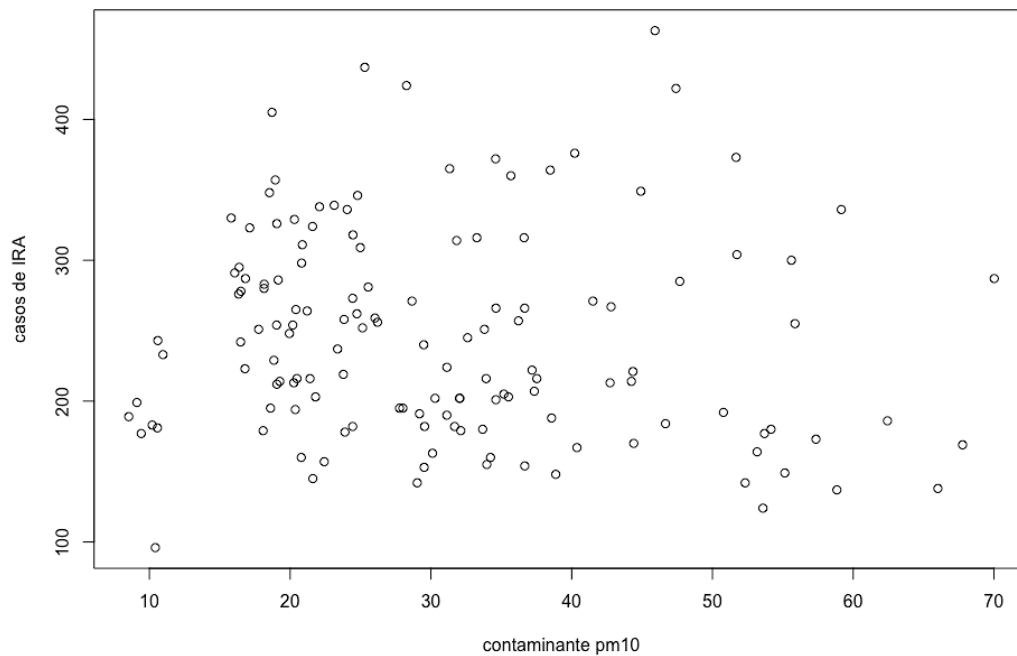
Fuente: IDEAM, elaboración propia

M. Anexo: Análisis estadístico

Datos correspondientes a los años 2014, 2015 y 2016 para la estación Policlínica, suministrados por RMCA de Ecopetrol. La base de datos consta de cuatro columnas distribuidas así: semana, ira (infección respiratoria aguda), pm10 (contaminante), t_media (temperatura media) y rain (precipitación).

El diagrama de dispersión de los datos que no muestra claramente una tendencia específica de los datos. Para iniciar el análisis se tomó la dependencia entre IRA y PM₁₀, tal como se estableció en los objetivos del trabajo, para los datos de Policlínica.

Gráfico de dispersión para los datos de Policlínica. IRA vs PM₁₀



Análisis lineal

A continuación, se hace el análisis lineal para los datos de policlínica, en consideración a la recomendación dada por los jurados, teniendo en cuenta que los datos no permiten considerar la posición geográfica de las estaciones de monitoreo y su relación con los pacientes de IRA que reciben atención hospitalaria. Por ello, se determinó trabajar con los datos reportados por la estación Policlínica.

Análisis de los datos para ira contra pm10.

Por la disposición visual de los datos se concluye que la recta del modelo lineal no pasa por el origen, por lo que se tomará el modelo $\text{ira} \sim \text{pm10}$ y no $\text{ira} \sim \text{pm10}-1$.

Call:

```
lm(formula = ira ~ pm10, data = base_total_gam)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-160.54	-55.23	-14.94	45.94	226.45

Reporte de los valores máximos y mínimos, cuartiles primero y tercero y la mediana (segundo cuartil)

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	262.4103	15.4192	17.018	<2e-16 ***
pm10	-0.5631	0.4567	-1.233	0.22

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 73.4 on 136 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.01106, Adjusted R-squared: 0.003784

F-statistic: 1.52 on 1 and 136 DF, p-value: 0.2197

Comentario

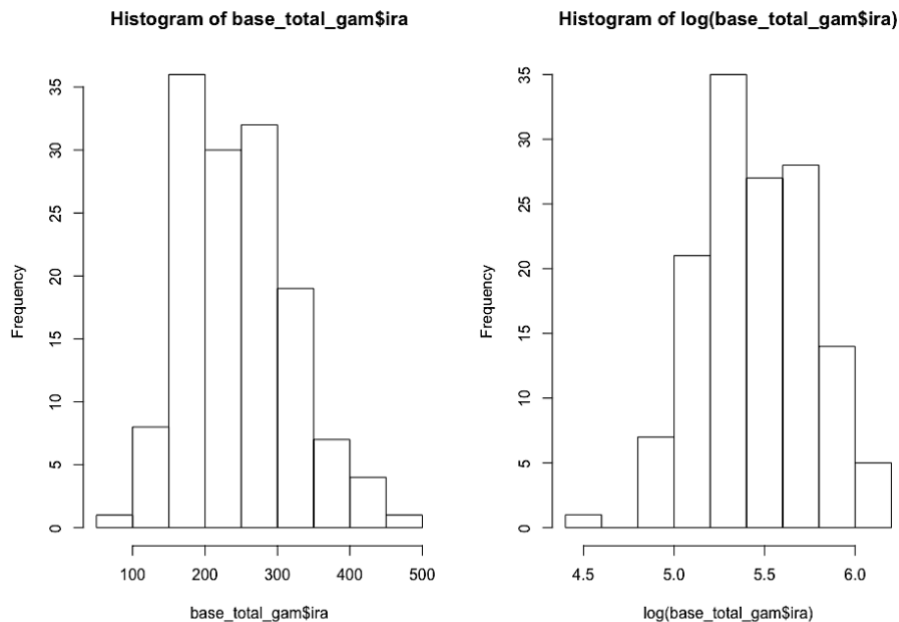
El modelo lineal que relaciona IRA con PM₁₀ no presenta una buena correlación ni sirve como modelo para estimar valores de IRA cuyo comportamiento es no lineal. El modelo tiene la siguiente ecuación:

$$\text{ira} = 262.4103 - 0.5631 \text{ pm10}$$

El corte con el eje o valor inicial cumple con la hipótesis alternativa de , dado que la $p < 2.10^{-16}$, que es mucho menor que 0.05. Esto no ocurre con , la pendiente de la recta o el valor en que se incrementa IRA por cada aumento unitario de pm10. La $p = 0.22 > 0.05$ por lo que se acepta la hipótesis nula. El análisis de F-statistic también arroja el mismo resultado con $p = 0.2197$. Por tanto, se descarta este modelo.

Ahora se obtienen los histogramas de los datos de IRA, con el objeto de ajustarlo para su aproximación normal. El primer histograma tiene una distribución de datos sesgada, no aproximada a la distribución normal. El segundo histograma mejora un poco la simetría, pero con una acumulación hacia la derecha. Nota: el logaritmo es base e, logaritmo natural o neperiano. Se ha utilizado la notación de R del libro de Wood (31).

Ilustración 6-1 Histograma lineal y logarítmico para Policlínica



Los histogramas en Ilustración 6-1 muestran en su presentación lineal asimetría y sesgo, por lo que no se cumple la condición de normalidad de los datos para poder aplicar el modelo lineal de mínimos cuadrados. La alternativa es aplicar nuevamente el método de mínimos cuadrados, pero con la variable respuesta IRA con logaritmo natural, con el fin de

atenuar sus datos bajo las mismas condiciones de las otras tres variables. Se nota una mejora en la simetría, aunque no es la mejor.

En la

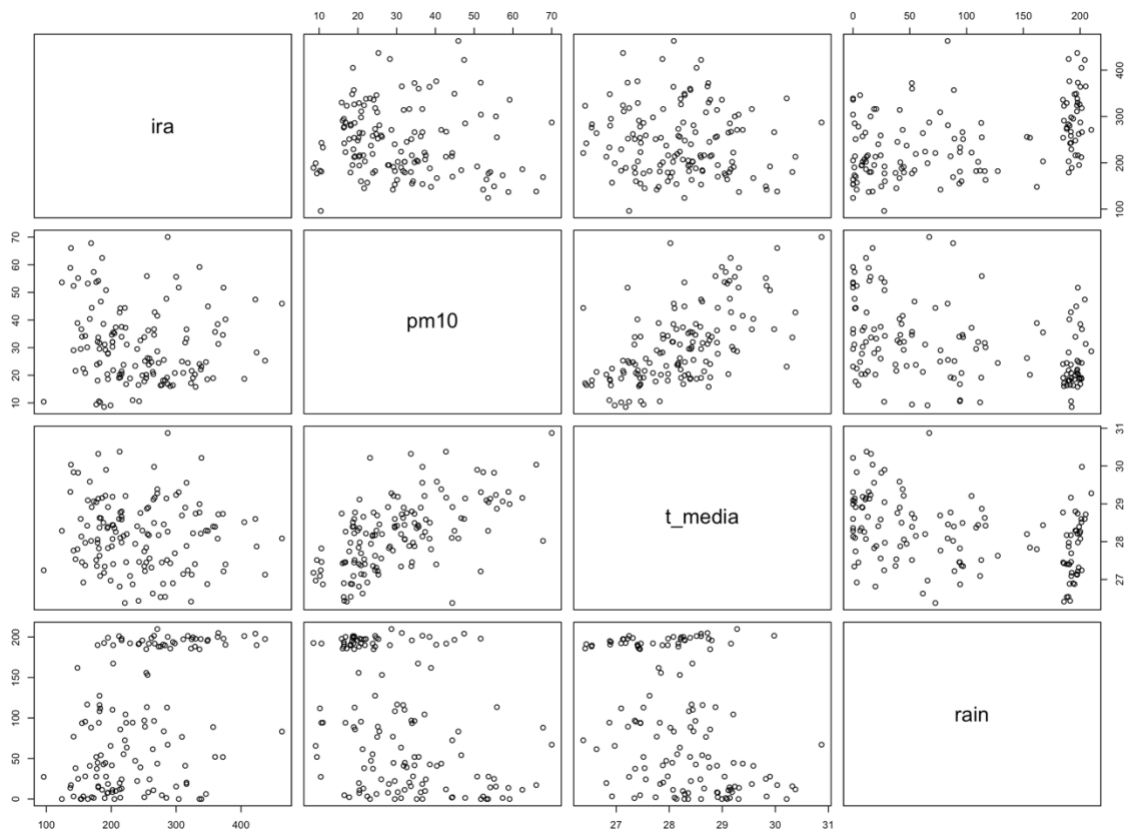
Ilustración 6-2 se muestran las gráficas cruzadas entre pares de variables. Se toman las variables pm10, rain y t_media se suman linealmente para generar como respuesta la variable ira. Luego se obtienen las gráficas cruzadas en parejas de variables, para un total de 6 gráficas. Pero, como son gráficas de dependencia mutua, resultan en total 12. Se observan las diferentes influencias que tienen las variables. Por ejemplo, la t_media y pm10.

Los resultados del análisis del modelo se muestran a continuación. Ninguno de los parámetros del modelo lineal:

$$\text{ira} = 58.68077 + 0.26903 \text{ pm10} + 0.45698 \text{ rain} + 4.77172 \text{ t_media}$$

a excepción de rain, cumple con las condiciones que dan validez a la hipótesis nula, es decir, la hipótesis que implica una independencia de las variables y la falta de influencia sobre la variable ira. Ninguno de los valores de p se ajusta a la condición de ser menor de 0.05, como se puede observar en el siguiente reporte de R.

Ilustración 6-2 Datos por parejas de ira, pm10, rain, t_media



Call:

```
lm(formula = ira ~ pm10 + rain + t_media, data = base_total_gam)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-127.777	-46.195	-8.164	41.331	219.882

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr (> t)
(Intercept)	58.68077	215.15559	0.273	0.785
pm10	0.26903	0.52909	0.508	0.612
rain	0.45698	0.08093	5.647	9.38 e-08 ***

t_media 4.77172 7.84948 0.608 0.544

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 66.42 on 134 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.2022, Adjusted R-squared: 0.1844

F-statistic: 11.32 on 3 and 134 DF, p-value: 1.145e-06

Conclusión

Los p valores para cada uno de los parámetros del modelo de las variables predictoras: pm10, t_media y la intercepción no satisface la hipótesis alterna H_1 , a excepción de la variable rain, lo que hace válida la hipótesis nula H_0 , es decir, que ninguno de esos valores es significativo para el modelo lineal aplicado al caso Barrancabermeja. Se descarta. La ecuación siguiente no representa el modelo:

$$\text{ira} = 58.68077 + 0.26903 \text{ pm10} + 0.45698 \text{ rain} + 4.77172 \text{ t_media}$$

Modelo Aditivo Generalizado, GAM

El propósito del Modelo Aditivo Generalizado (Generalized Additive Models) es maximizar la calidad de la predicción de una variable respuesta dependiente, IRA, de diferentes distribuciones, por estimación de funciones no especificadas de las variables predictoras, las cuales son conectadas a la variable dependiente por medio de una función de enlace. El GAM tiene la forma:

,

Donde A_i es la i -ésima fila de una matriz modelo paramétrica, con los correspondientes parámetros γ , f_j es una función de suavización de variables predictoras x_j , y $EF(\mu_i, \phi)$ denota una distribución de la familia exponencial con media μ_i y parámetros de escala ϕ . La y_i es modelada como independiente dada por μ_i . La forma general de la familia exponencial es:

Donde b , a y c son funciones arbitrarias, ϕ es un parámetro de escala arbitraria y θ es conocida como parámetro canónico de la distribución, depende del parámetro β .

De aquí surgen las distribuciones de probabilidad: Normal, Poisson, Binomial y exponencial. El programa estadístico R con una simple instrucción donde se nombra la distribución de probabilidad asume los parámetros necesarios que transforman la expresión general en la distribución requerida. Por ello, se omitió escribirla en el primer documento.

A continuación, se muestran las aproximaciones con todas las variables, se incluyen las variables semana, pm10, rain y t_media. Se asumió la distribución de Poisson, teniendo en cuenta que los casos de IRA corresponden a un proceso de conteo cuyo valor está influenciado por los factores de contaminación PM₁₀, la precipitación y la temperatura media y por efectos aleatorios con causas diferentes que no se han considerado en el presente trabajo. La aplicación del modelo GAM arroja el siguiente resultado:

GAM

Family: poisson; ## Define la distribución de probabilidad con parámetros de Poisson.

Link function: log; ## Es la función de enlace que el programa asume base e.

Formula:

ira ~ s(semana, bs = "cr", k = 20) + pm10 + rain + t_media; ## Suavización cúbica para semana

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	5.4607179	0.2624157	20.809	< 2 e-16 ***
pm10	0.0032202	0.0008341	3.860	0.000113 ***
rain	0.0001577	0.0001625	0.970	0.331934; ## no cumple
t_media	-0.0037423	0.0096305	-0.389	0.697583; ## no cumple

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	Chi.sq	p-value
s(semana)	18.63	18.98	1514	<2e-16*** ## Grados de libertad efectivos

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.662 Deviance explained = 72.4%

- **Análisis de resultado dado por R**

La forma general de la expresión anterior con los parámetros que arroja el programa R, genera el siguiente modelo:

La función de enlace es logaritmo natural:log

$$\text{Ec. 1 } \text{Log(ira)} = 5.4607179 + 0.0032202 \text{ pm10} + 0.0001577 \text{ rain} - 0.0037423 \text{ t_media} + 18.63 * \text{s(semana, bs = "cr", k = 20)}$$

La función $s(\text{semana, bs="cr", k=20})$ es una función cúbica que es aproximada con funciones $b_i(x)$ (conocidas como sinc acotadas) acotadas al rango de valores inferior y superior de los datos, la cual es calculada directamente por el programa R, con la siguiente forma:

Las probabilidades dadas por los p-valores satisfacen los parámetros de β_0 y β_1 . El parámetro asociado a semana si cumple para hacer verdadero el parámetro. Los demás parámetros no.

Conclusión

El modelo no cumple con los p-valores que hacen cierta la H_1 , todos son mayores de 0.05, a excepción de pm10, $s(\text{semana, bs = "cr", k = 20})$ y la intercepción.

- **Ajuste cúbico de todas las variables. Modelo GAM**

Hacemos ajuste cúbico a las variables predictoras, que son muestras obtenidas de la medición, con la función gam. El modelo matemático tiene implícitamente la siguiente forma y se codifica como aparece a continuación:

$$\text{Log(E[ira])} = f_1(\text{semana}) + f_2(\text{pm10}) + f_3(\text{t_media}) + f_4(\text{rain})$$

```
ap1 <-gam(ira ~ s(semana, bs="cr",k=10)+s(pm10, bs="cr")+ s(rain, bs="cr")+ s(t_media, bs="cr"), data= base_total_gam, family= poisson)
```

Igual que el caso anterior, se tomó family=Poisson, porque el proceso es de conteo con factores aleatorios independientes y a una tasa determinada. La función de enlace es logarítmica, los valores de IRA se transforman por esa función a la siguiente secuencia:

5.929589 5.921578 5.855072 5.897154 6.045005 5.587249 5.313206 5.780744 5.609472
 5.852202 6.049733 6.079933 5.823046 5.786897 6.003887 5.799093 5.659482 5.356586
 5.899897 5.602119 5.583496 5.375278 5.375278 5.513429 5.187386 5.739793 5.552960
 5.796058 5.634790 5.762051 5.817111 5.777652 5.645447 5.433722 5.493061 5.673323
 5.620401 5.686975 5.697093 5.537334 5.488938 5.568345 5.273000 5.375278 5.247024
 5.703782 5.817111 5.717028 5.659482 6.137727 5.541264 5.332719 5.638355 5.655992
 5.877736 5.749393 5.918894 5.755742 5.733341 5.846439 5.886104 5.755742 5.652489
 5.826000 5.361292 5.402677 5.308268 5.273000 5.549076 5.192957 5.308268 5.252273
 5.365976 5.308268 5.093750 5.501258 5.236442 5.313206 5.204007 4.955827 5.075174
 4.997212 5.056246 5.187386 5.043425 5.389072 5.030438 5.192957 5.323010 4.955827
 5.257495 5.036953 4.820282 5.135798 5.099866 4.919981 5.117994 5.003946 5.375278
 5.176150 5.225747 5.153292 4.927254 5.129899 5.214936 5.303305 5.583496 5.525453
 5.398163 5.365976 5.602119 5.411646 5.181784 5.468060 5.556828 5.525453 5.579730
 5.204007 5.273000 4.976734 5.204007 5.361292 5.267858 5.545177 5.480639 5.575949
 5.529429 5.075174 5.627621 5.537334 5.451038 5.293305 5.407172 5.209486 5.198497
 5.241747 5.176150 4.564348

Todos estos valores corresponden a la respuesta $\log(\text{ira})$, donde \log es logaritmo natural. Esto hace que las respuestas se agrupen con una menor dispersión, lo que no afecta el modelo desde el punto de vista algorítmico. Se mantiene la relación funcional.

El resultado arrojado por R para este modelo es el siguiente:

Family: poisson

Link function: log

Fórmula:

$\text{ira} \sim \text{s}(\text{semana}, \text{bs} = \text{"cr"}, \text{k} = 10) + \text{s}(\text{pm10}, \text{bs} = \text{"cr"}) + \text{s}(\text{rain}, \text{bs} = \text{"cr"}) + \text{s}(\text{t_media}, \text{bs} = \text{"cr"}); ##$ Todas las variables tienen suavización cúbica

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	5.471347	0.005603	976.4	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	Chi.sq	p-value
s(semana)	8.505	8.928	918.60	< 2e-16 ***
s(pm10)	8.400	8.827	54.13	1.84e-08 ***
s(rain)	8.189	8.767	73.14	1.40e-11 ***
s(t_media)	7.921	8.599	28.09	0.000706 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.576 Deviance explained = 68.7%

Análisis de los resultados R

1. Se aplicó el modelo GAM con función de enlace logarítmica, $\log_e(\text{ira})$, cuyos valores para la aplicación del algoritmo de R se agrupan mejor, dadas las características funcionales de los logaritmos.
2. Las variables predictoras: semana, pm10, rain y t_media se suavizaron con la función cúbica, obtenida directamente de R como una sumatoria de funciones acotadas superior e inferiormente en el rango de datos. La forma general es la siguiente:

Donde las funciones $b_i(x)$ son acotadas y amortiguadas. La suma genera cualquier otra función, que en nuestro caso son cúbicas, "cr". Por esta razón, no es posible escribir explícitamente la expresión correspondiente en forma matemática con la posibilidad de poder estimar o predecir valores futuros.

3. La predicción se hace directamente con el software estadístico R como se indica a continuación:

```
ap1<- gam(ira ~ s(semana, bs="cr",k=10) + s(pm10,bs="cr") + s(rain, bs="cr") +
s(t_media, bs="cr"), data= base_total_gam, family=poisson)
```

```
df<- data.frame (semana=c(140,141,142),pm10=c(140,141,142), rain= c(140,141,142),
t_media=c(140,141,142))
predict(ap7, df, se=TRUE)
```

Resultado

1	2	3
5.711047	5.695243	5.679434

Estos valores son los logaritmos de IRA Para transformarlos en valores reales de medición debemos obtener el antilogaritmo natural. Así:

Semana	IRA
140	302.1873
141	297.4491
142	292.7836

Que son valores en el rango de los registrados por la Secretaría de Salud en el SIVIGILA.

La predicción se puede obtener para cualquier combinación arbitraria de valores de las variables predictoras mediante el cambio de los parámetros de la función R de predicción y asignando directamente el valor. Así:

```
df<-data.frame(semana=109,pm10=54,rain=72.5,t_media=26)
ap7<-gam(ira ~ s(semana,bs="cr",k=10)+s(pm10,bs="cr")+ s(rain,bs="cr")+ s(t_media,
bs="cr"), data=base_total_gam,family=poisson)
predict(ap7,df,type="response",se=TRUE) # Response permite ver el valor en la escala
original de los datos
```

\$fit

1

221.1534 casos de IRA

\$se.fit

1

17.42737 error estándar

El valor estimado está entre (IC95%=203.73-238.58)

```
df<-data.frame(semana=109,pm10=44,rain=72.5,t_media=26)
ap7<-gam(ira ~ s(semana,bs="cr",k=10)+s(pm10,bs="cr")+ s(rain,bs="cr")+ s(t_media,
bs="cr"), data=base_total_gam,family=poisson)
predict(ap7,df,type="response",se=TRUE)
$fit
```

1

213.0994 casos de IRA por PM10

\$se.fit

1

15.79226 error estándar por PM10

El valor estimado está entre IC95%=197.31-228.90 por PM10

```
df<-data.frame(semana=109,pm10=44,rain=82.5,t_media=26)
ap7<-gam(ira ~ s(semana,bs="cr",k=10)+s(pm10,bs="cr")+ s(rain,bs="cr")+s(t_media,
bs="cr"), data=base_total_gam,family=poisson)
predict(ap7,df,type="response",se=TRUE)
$fit
```

1

201.6687 casos de IRA por RAIN

\$se.fit

1

14.98419 error estándar por RAIN

El valor estimado está entre IC95%=187.68-216.65

```
df<-data.frame(semana=109,pm10=44,rain=72.5,t_media=27)
ap7<-gam(ira ~ s(semana,bs="cr",k=10)+s(pm10,bs="cr")+ s(rain,bs="cr")+s(t_media,
bs="cr"), data=base_total_gam,family=poisson)
predict(ap7,df,type="response",se=TRUE)
$fit
```

1

266.3548 casos de IRA por TEMPERATURA

\$se.fit

1

11.16328 error estándar por TEMPERATURA

El valor estimado está entre IC95%=255.19-277.52

4. Se obtiene que, ante un incremento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ de pm_{10} , los casos de IRA aumentan en 8 (IC95%=6.42-9.68). De esta manera se pueden obtener las influencias de las diferentes variables. Se deduce que al aumentar la contaminación de pm_{10} aumenta el número de casos de IRA.

Para rain se obtiene que el aumento de 10 unidades de precipitación genera una reducción de 12 (IC95%=9.63-12.25) casos de IRA.

Para la temperatura se obtiene que el aumento en un grado centígrado genera un aumento de 53 casos de IRA (IC95%=48.62-57.88). En general el impacto de cada una de las variables depende del estado del sistema, es decir, de todos los valores que tengan las variables, por lo que no es una constante como ocurre en el caso lineal. Recordemos que el comportamiento y relación entre las variables es no lineal, razón para haber escogido el modelo gam.

5. En el modelo ajustado los parámetros de intercepción y los grados de libertad efectivos de las variables predictoras, todos cumplen con las condiciones de p-valor con probabilidades inferiores a 0.05, correspondiente al 95% de confianza.

Para la intercepción el intervalo de confianza de β_0 :

$$\text{IC95\%}=235.18-240.41$$

Para las funciones de suavización los intervalos de confianza se determinan para las varianzas de las funciones de suavización de cada una de las variables predictoras. En este caso se han suavizado con funciones cúbicas. Los intervalos de confianza del 95% para cada variable suavizada se muestra gráficamente. La desviación estándar de las funciones de suavización sobre las variables predictoras son los parámetros, teniendo en cuenta que los valores puntuales de la variable cambian dada la no linealidad del ajuste cúbico. Lo importante es que las desviaciones estándar cumplen con la condición de probabilidad por debajo de 0.05.

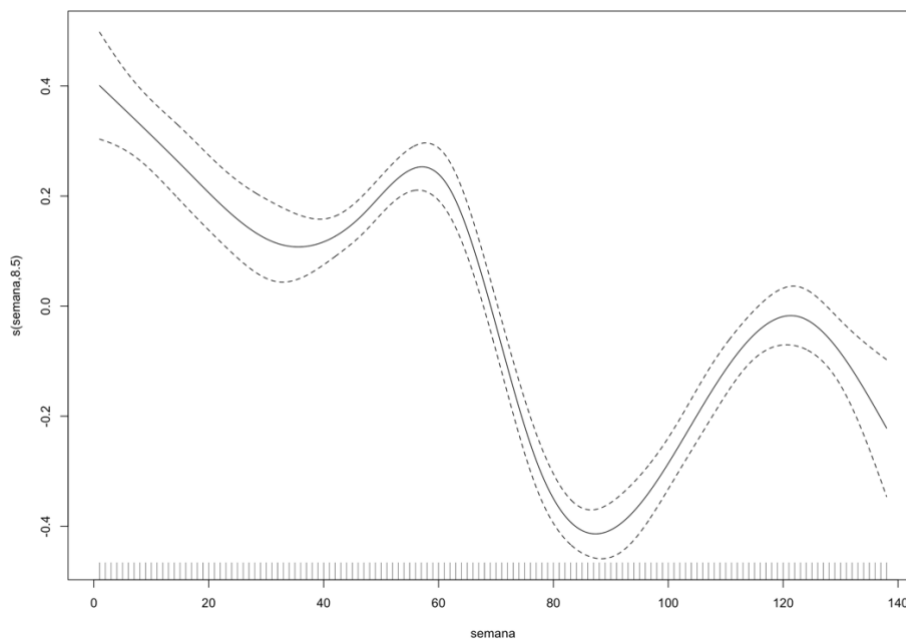
A continuación, se muestran los valores límite superior y límite inferior para la desviación estándar de cada una de las variables predictoras, tal como el programa R arroja los resultados.

Standard deviations and 0.95 confidence intervals:

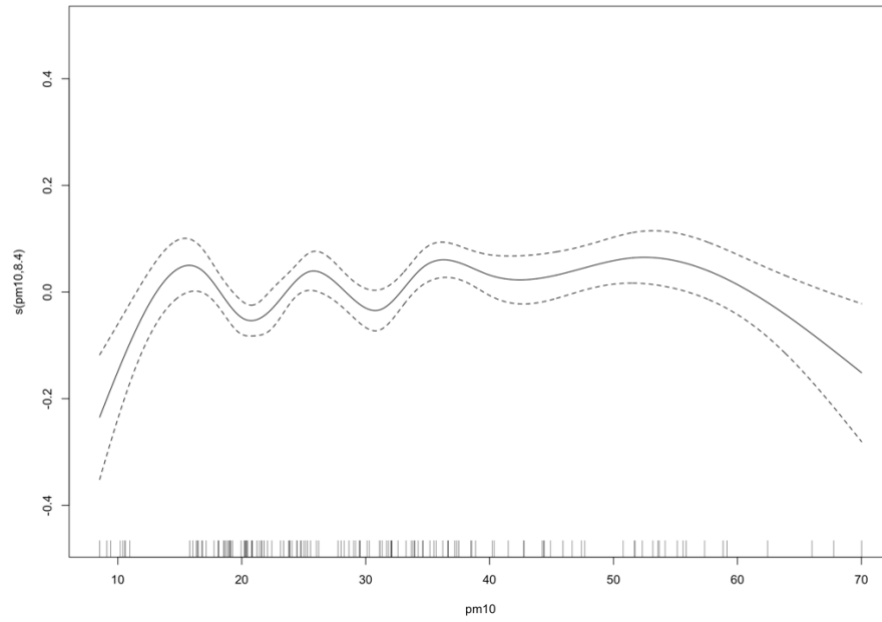
	std.dev	lower	upper
s(semana)	0.006862954	0.0040860196	0.011527145
s(pm10)	0.020244310	0.0103888381	0.039449269
s(rain)	0.001834997	0.0008843178	0.003807697
s(t_media)	0.269961411	0.0191638597	3.802948065

Para visualizar los intervalos de confianza de los valores puntuales de las funciones de suavización lo hacemos gráficamente para s(semana), s(pm10), S(rain) y s(t_media).

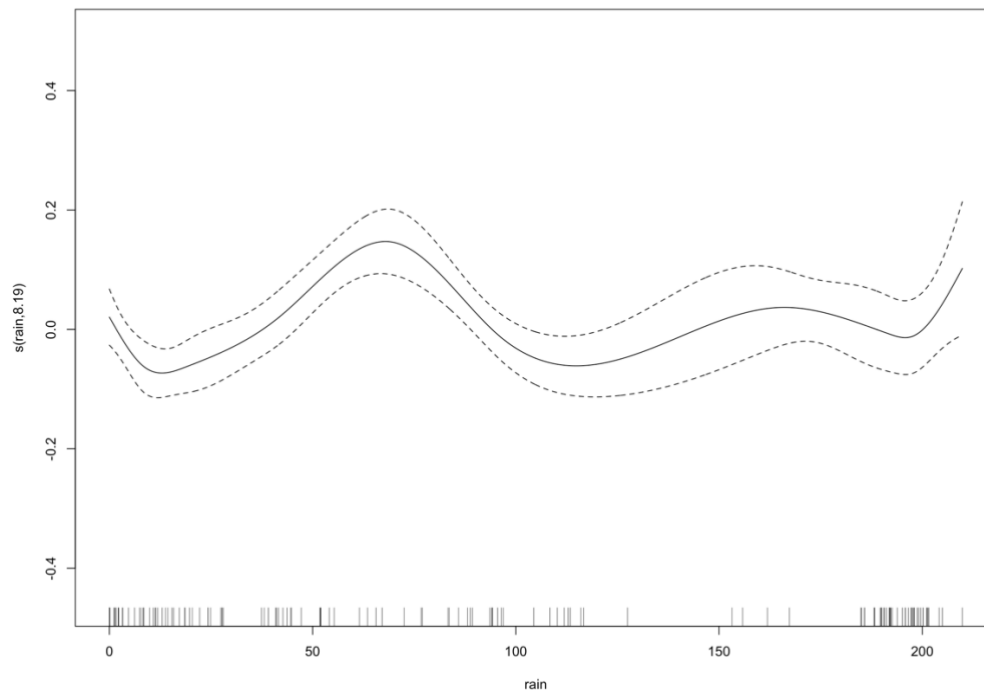
Semana con suavización de 8.5 grados de libertad efectivos



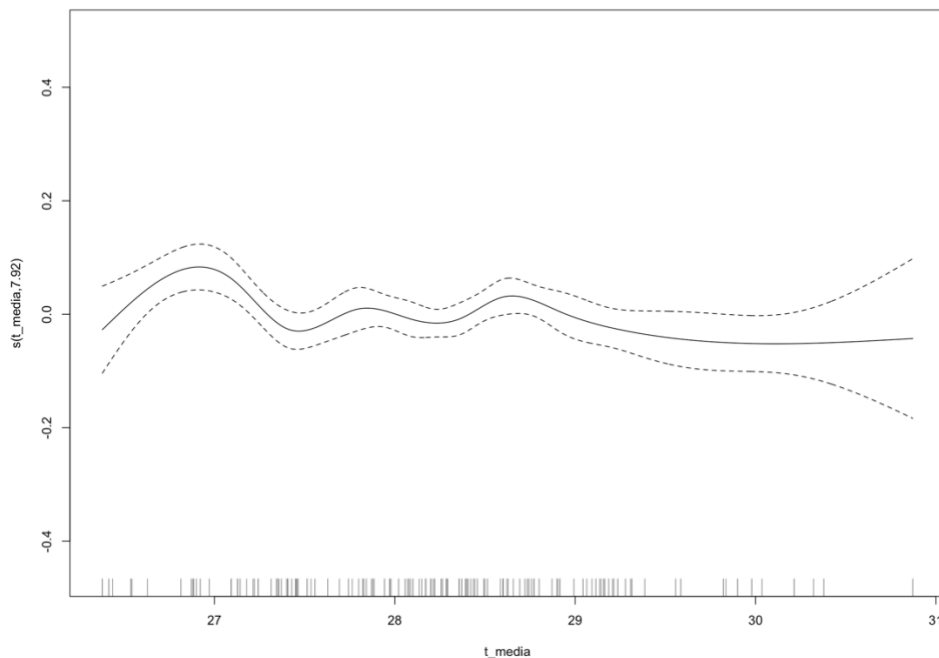
PM₁₀ con suavización de 8.4 grados de libertad efectivos



Rain con suavización de 8.19 grados de libertad efectivos



Temperatura con suavización de 7.92 grados de libertad efectivos



6. Cuando se aplica un rezago a las variables predictoras, la influencia de cada una de ellas sobre el valor actual ajustado de IRA como función de los valores actuales y pasados de las variables predictoras, es diferente. El siguiente segmento de programa muestra cómo se introduce el retardo o rezago, en nuestro caso de una semana, simbolizado como lag=1. La insuficiencia de datos (solo 138) no permite visualizar completamente el efecto de todas las variables sobre la respuesta IRA.

El segmento de programa es el siguiente:

```
## RETARDO EN LAS VARIABLES lag
```

```
lagard <- function(x,n.lag=1) {
  n <- length(x)
  X <- matrix(NA,n,n.lag)
  for (i in 1:n.lag)
    X[i:n,i] <- x[i:n-i+1]
  X
}
```

El reporte de R cuando se introduce un retardo de una semana se realizó con el siguiente segmento de programa:

```
f1 <- optim(rep(1,2), si, method="BFGS", hessian=TRUE, dat=dat)
apsi <- si(f1$par, dat, opt=FALSE)
summary(apsi)
```

Family: poisson ## Se mantiene la distribución y la función de enlace

Link function: log

Formula:

```
dat$ira ~ s(dat$semana, k = 65, bs = "cr") + s(pm10, bs = "cr") + te(rain, t_media, k = 8)
```

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	5.457688	0.006285	868.4	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	Chi.sq	p-value
s(dat\$semana)	47.310	53.493	1196.716	< 2e-16 ***
s(pm10)	2.739	3.321	7.505	0.0674
te(rain,t_media)	36.217	41.267	142.579	4.42e-13 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.802 Deviance explained = 92.4%

Para la intercepción con rezago el intervalo de confianza está por:

IC95%=231.68-237.46

El rezago genera p-valores adecuados para la intercepción, el tiempo (semana) y la relación de las variables rain y temperatura. La correlación ajustada es superior al 80%.

La suavización de PM₁₀ no asegura completamente el rechazo de la hipótesis nula, H₀. El p-valor está muy cercano al límite. Esto se debe a que el número de datos no es suficiente para inferir el impacto de PM₁₀ en valores futuros de la respuesta IRA.

ψ_{α}

[1] 0.5773503, 0.5773503, 0.5773503

Los valores de la función *apsi* indican que no hay variación en el número de casos de IRA con respecto a las variables pm10, rain y temperatura al calcular lag0 y lag1.

Bibliografía

1. CEPAL. Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL. Publicación de las Naciones Unidas. 2018.
2. Hernández Flórez LJ, Sarmiento R, Osorio-García SD. Enfoques conceptuales de la relación ambiente y salud. In: Reflexiones acerca de la relación ambiente y salud Pensando en ambientes saludables Reflexiones acerca de la relación ambiente y salud Pensando en ambientes saludables. 2016.
3. World Health Organization. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. 2016. p. 121.
4. Organización Mundial de la Salud. Infografía: Impacto del medio ambiente en la salud [Internet]. [cited 2019 Jul 4]. Available from: https://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/PHE-prevention-diseases-infographic-ES.pdf?ua=1
5. Informe. Estrategia Nacional De La Calidad Del Aire. Elabor a cargo la Secr Medio Ambient y Recur Nat con la Particip del Inst Nac Ecol y Cambio Climático. 2016;70.
6. OMS. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. 2006;1–21.
7. GreenFacts. PM10, PM2.5, PM0.1 [Internet]. Available from: <https://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/PM10-PM2.5-PM0.1.htm>
8. Darrow LA, Klein M, Dana Flanders W, Mulholland JA, Tolbert PE, Strickland MJ. Air pollution and acute respiratory infections among children 0-4 years of age: An 18-year time-series study. *Am J Epidemiol*. 2014;180(10):968–77.
9. Ambiente M De, Comercio M De. Conpes 3550. 2008.
10. Observatorio Nacional de Salud. Carga de enfermedad ambiental en Colombia. 2018.

11. David Augusto López Rodríguez. Algunos referentes históricos, culturales y ambientales de Barrancabermeja y del Magdalena Medio. 2000; Available from: <https://goo.gl/koVrFz>
12. Otero Prada D. Historia de la Fundación de Barrancabermeja y el papel del Petróleo [Internet]. First. Bucaramanga: UNICIENCIA; 2015. 82 p. Available from: <https://goo.gl/xGXXWh>
13. Alcaldía de Barrancabermeja. Información general [Internet]. Available from: <https://www.barrancabermeja.gov.co/municipio/Informacion-General>
14. Barrancabermeja S de salud de. Análisis de Situación de Salud con el Modelo de los Determinantes Sociales de Salud. Municipio de Barrancabermeja [Internet]. Barrancabermeja; 2017. Available from: <http://www.albayan.ae>
15. Portafolio. La refinería de Barrancabermeja cumple 95 años de operaciones [Internet]. 2017. Available from: <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/aniversario-95-de-la-refineria-de-barrancabermeja-503473>
16. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del aire. 2008. p. 287.
17. Agrarios P de AA y. Contaminación atmosférica, causas, consecuencias y manejo en las ciudades de Bogotá D. C., Cali, Medellín y el área metropolitana del Valle de Aburrá. 2013. 94 p.
18. Pardo Ibarra T. Contaminación del aire: un problema para la salud en Colombia - Medio Ambiente - Vida - ELTIEMPO.COM [Internet]. [cited 2019 Jul 2]. Available from: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/contaminacion-del-aire-un-problema-para-la-salud-en-colombia-292226>
19. Secretaría de Medio Ambiente de Barrancabermeja. PLAN MAESTRO DE LA CALIDAD DE AIRE EN EL MUNICIPIO DE BARRANCABERMEJA. Barrancabermeja; 2015.
20. El Frente. Inició diagnóstico de la Red de monitoreo de calidad del aire en Barrancabermeja [Internet]. 2018. Available from: <http://www.elfrente.com.co/web/index.php?ecsmodule=frmstasection&ida=57&idb=95&idc=20014>
21. Ramos Gómez Y. Vulnerabilidad Socio-ambiental y gestión comunitaria del riesgo en Barrancabermeja, Colombia [Internet]. Universidad de Manizales; 2014 [cited

- 2019 Jul 6]. Available from:
[http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2060/Analisis de vulnerabilidad socio-ambiental y gestion comunitaria del riesgo en Barrancabermeja Colombia..pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2060/Analisis%20de%20vulnerabilidad%20socio-ambiental%20y%20gestion%20comunitaria%20del%20riesgo%20en%20Barrancabermeja%20Colombia..pdf?sequence=1&isAllowed=y)
22. Vanguardia. Denuncian emisión de catalizadores en refinería [Internet]. 2016. Available from:
<https://www.vanguardia.com/santander/barrancabermeja/denuncian-emision-de-catalizadores-en-refineria-ADVL354400>
 23. Hernández LJ, Ocampo J, Sofía D, Calderón C. El modelo de la OMS como orientador en la salud pública a partir de los determinantes sociales. Vol. 19, Rev Salud Publica (Bogota). 2017.
 24. Organización Mundial de la Salud. Determinantes Sociales de la Salud en la región de las Américas. 2017.
 25. MSPS; OPS; OMS. Modelo de Fuerzas Motrices en el marco de la Dimensión de Salud Ambiental del Plan Decenal de Salud Pública 2012-2021. 2012;205. Available from:
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/modelo-de-fuerzas-motrices-en-el-marco-de-la-dimension-de-salud-ambiental-del-plan-decenal-de-salud-publica-2012-2021.pdf>
 26. Corvalán CF, Kjellström T, Smith KR. Health, environment and sustainable development: Identifying links and indicators to promote action. *Epidemiology*. 1999;10(5):656–60.
 27. Hernández Flórez LJ. Asociación entre contaminación del aire y morbilidad por enfermedad respiratoria aguda en menores de 5 años en tres localidades de Bogotá. [Bogotá]: Universidad Nacional de Colombia; 2010.
 28. García Ávila PA. Implementación del software estadístico Openair para el procesamiento y análisis de la información de la base de datos de la red de calidad de aire de Bogotá [Internet]. 2013. Available from:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/39469/>
 29. Carslaw D. The openair manual - open-source tools for analysing air pollution data. King's College London; 2015. p. 287.
 30. Jbilou J, El Adlouni S. Generalized additive models in environmental health: A literature review. In: *Novel Approaches and Their Applications in Risk Assessment*

- [Internet]. 2016. p. 16. Available from: <https://www.intechopen.com/books/novel-approaches-and-their-applications-in-risk-assessment/generalized-additive-models-in-environmental-health-a-review-of-litterature>
31. Wood SN. Generalized Additive Models: An Introduction with R. 2nd ed. Statistical Science. Chapman & Hall; 2017. 497 p.
 32. Durbán M. Modelos Aditivos Generalizados con P-splines. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid; p. 77.
 33. Reina J, Olaya J. Ajuste de curvas mediante métodos no paramétricos para estudiar el comportamiento de contaminación del aire por material particulado PM₁₀. Rev EIA. 2012;18:19–31.
 34. Olivero Verbel J, Carranza López L, Torres Moreno A, Cervantes Ceballos L, Manjarres Suarez A, Caballero Gallardo K, et al. Perfil ambiental de la Ciénaga Miramar, Barrancabermeja - Santander. Primera. Universidad de Cartagena, editor. Cartagena de Indias: Editorial universitaria; 2015. 208 p.
 35. Barrancabermeja A de. Plan de Desarrollo Municipal “Barrancabermeja Incluyente, Humana y Productiva” 2016-2019. Barrancabermeja: Alcaldía de Barrancabermeja; 2016. p. 274.
 36. Molina-López L. Barrancabermeja: Segregación socioespacial y desequilibrios funcionales. Cuad vivienda y Urban. 2008;1(2):332–47.
 37. Suárez Salazar SL. Todos los barrios de la Comuna Cinco iniciaron como invasiones [Internet]. Vanguardia. 2010. Available from: <https://www.vanguardia.com/santander/barrancabermeja/todos-los-barrios-de-la-comuna-cinco-iniciaron-como-invasiones-FAvI70227>
 38. Cámara de Comercio de Barrancabermeja. Barrancabermeja en cifras 2016. Barrancabermeja; 2016. p. 1–21.
 39. Concejo Municipal de Barrancabermeja. Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Barrancabermeja. Colombia; 2002 p. 1–141.
 40. Arrieta Fuentes AJ. Dispersión De Material Particulado (Pm₁₀), Con Interrelación De Factores Meteorológicos Y Topográficos. Ing Investig y Desarro. 2016;16(2):43–54.
 41. Rodriguez-Martinez CE, Sossa-Briceño MP, Acuña-Cordero R. Relationship between meteorological conditions and respiratory syncytial virus in a tropical country. Epidemiol Infect [Internet]. 2015;143(12):2679–86. Available from:

- https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/3733AD07DB631BC40B31ECDF0AD0D11A/S0950268814003793a.pdf/relationship_between_meteorological_conditions_and_respiratory_syncytia_l_virus_in_a_tropical_country.pdf
42. Rodríguez-Villamizar LA, Rojas-Roa NY, Blanco-Becerra LC, Herrera-Galindo VM, Fernández-Niño JA. Short-term effects of air pollution on respiratory and circulatory morbidity in Colombia 2011–2014: A multi-city, time-series analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(8).
 43. Amarillo AC, Carreras HA. The effect of airborne particles and weather conditions on pediatric respiratory infections in Cordoba, Argentine. *Environ Pollut* [Internet]. 2012;170:217–21. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.005>
 44. Quiroz-arcentales L, Medina K, Hernandez L, Agudelo C, Robledo-Martinez R, Osorio-Garcia S. Enfermedad y síntomas respiratorios en niños de cinco municipios carboníferos del Cesar, Colombia. *Rev salud pública*. 2013;15(1):66–79.
 45. Hernández-Flórez LJ, Aristizabal-Duque G, Quiroz L, Medina K, Rodríguez-Moreno N, Sarmiento R, et al. Air pollution and respiratory illness in children aged less than 5 years-old in Bogotá, 2007. *Rev salud pública*. 2013;15(4):503–16.