

TESIS DE MAESTRÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL

“Influencia de las actividades desarrolladas a lo largo de la zona costera del departamento del Magdalena (Colombia), en las concentraciones de material particulado registradas por la red de calidad del aire de CORPAMAG”

Autor: Angélica Patricia Garrido Galindo
Directora de Tesis: Dra. Ing. Paula Castesana
Codirector de Tesis: Dr. Ing. David Allende

Buenos Aires - 2019

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional y por su motivación en cada una de las etapas del proyecto.

A Mg. Yiniva Camargo por permitirme hacer parte del Grupo de Investigación en Modelación de Sistemas Ambientales que ha sido la base de mi formación en proyectos de investigación, al Ingeniero Jorge Hanni funcionario de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena por suministrar información con la que se trabajó el proyecto de investigación.

De manera muy especial a mis directores Dr. Ing. David Allende y Dra. Ing. Paula Castesana por la formación, orientación y tiempo dedicado a todo el proceso de formulación, desarrollo y finalización del proyecto.

A las instituciones que colaboraron con información para el desarrollo de la investigación, Unidad de Tránsito y Transporte de Santa Marta y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

A la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires y a todas las autoridades por permitirme concluir con esta etapa académica.

A todas las personas que con sus aportes ayudaron a la finalización del trabajo de investigación.

ÍNDICE ALFABÉTICO

A

AERMOD · 29, 49, 50, 51, 52, 53, 98, 109, 115, 117, 131, 134, 135
Aeropuerto · 11, 22, 31, 38, 58, 62, 64, 65, 70, 72, 74, 106, 113, 116, 122
Alcatraces · 22, 31, 58, 59, 61, 62, 64, 66, 72, 73, 74, 99, 106, 115, 116, 118
Antrópico · 11, 14, 21, 40, 44, 77, 122

C

CAJAMAG · 10, 11, 31, 58, 63, 64, 65, 70, 72, 74, 99, 106, 113, 115, 122
Calidad del aire · 11, 22, 31, 131, 132, 133, 135
cantera · 36, 131
Carbogranules · 31, 59, 61, 66, 68, 73, 99, 106, 115
carbón · 14, 15, 17, 21, 22, 35, 36, 37, 40, 42, 44, 77, 78, 82, 88, 98, 106, 111, 113, 116, 117, 118, 122, 123, 130
Centro Ejecutivo · 11, 22, 31, 58, 63, 64, 65, 70, 72, 99, 106, 115, 122
Club Santa Marta · 22, 31, 59, 66, 68, 73, 106
Clústeres · 33, 72, 74
Concentraciones · 11, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 27, 29, 31, 32, 34, 51, 52, 53, 54, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 82, 98, 99, 100, 106, 109, 111, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 122, 123
Contaminante · 16
CORPAMAG · 10, 11, 20, 22, 23, 24, 25, 27, 29, 31, 32, 33, 36, 37, 38, 41, 52, 53, 56, 57, 59, 60, 61, 63, 99, 109, 113, 114, 115, 116, 117, 122, 123, 128
Costa Verde · 11, 22, 31, 59, 67, 68, 70, 73, 106, 114, 117, 122

D

Desnudamiento de cerros · 41, 43, 45, 77, 88, 122
Don Jaca · 22, 31, 58, 59, 61, 62, 64, 67, 68, 70, 72, 73, 74, 99, 106, 114, 115, 116, 118

E

Emisiones · 11, 15, 19, 27, 29, 31, 34, 36, 43, 44, 45, 46, 47, 52, 77, 78, 79, 82, 83, 84, 88, 98, 99, 100, 106, 111, 115, 116, 118, 119, 122, 123, 126, 133, 134
Erosión · 41, 45, 77, 85
Estación · 21, 25, 32, 48, 56, 59, 72, 73, 106

F

Fuentes · 11, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 27, 29, 34, 35, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 50, 51, 52, 53, 54, 77, 78, 79, 80,

82, 83, 88, 98, 99, 100, 106, 109, 111, 113, 115, 116, 117, 118, 119, 123, 129, 132

Fuentes de Área · 42, 84, 85
Fuentes Fijas · 42, 105, 133
Fuentes Móviles · 42, 105
Fuentes naturales · 40
Fuentes Puntuales · 42, 86

I

INVEMAR · 10, 11, 31, 58, 63, 64, 65, 70, 72, 99, 113, 115, 122, 134
Inventario de Emisiones · 88, 130

L

Límite anual · 63, 65, 67, 69, 70, 99, 117, 122

M

Material particulado · 10, 11, 13, 14, 17, 18, 20, 21, 22, 27, 29, 31, 34, 35, 36, 40, 41, 51, 52, 54, 58, 61, 98, 113, 114, 115, 118, 122, 126, 127, 132, 134, 136
MP₁₀ · 7, 8, 9, 10, 11, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 27, 29, 31, 32, 34, 35, 43, 44, 52, 53, 56, 58, 59, 60, 61, 66, 67, 69, 70, 73, 77, 78, 79, 82, 84, 86, 87, 88, 98, 99, 100, 105, 106, 108, 109, 110, 111, 112, 114, 115, 117, 118, 122, 123, 124

P

Promedios geométricos · 122
PST · 10, 11, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 27, 29, 31, 32, 34, 35, 43, 44, 52, 53, 56, 57, 58, 62, 63, 65, 66, 67, 70, 72, 73, 77, 78, 79, 82, 84, 85, 88, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 109, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 122, 123, 127, 131, 134, 135
Puerto · 22, 35, 36, 113, 114, 116, 126, 130

R

Relleno Sanitario · 38, 42, 77, 80, 82, 111, 123, 126

V

Vehicular · 11, 18, 19, 20, 21, 77, 99, 100, 111, 113, 118, 122, 123
Velocidad del viento · 48, 50, 90

Z

Zona costera · 11, 22, 23, 27, 29, 35, 40, 54, 84, 85, 86,
132, 134

Zona Rural · 98

Zona Urbana · 98

Zuana · 22, 31, 59, 61, 67, 73, 106, 114, 116, 118

TABLA DE CONTENIDO

1. FUNDAMENTACIÓN DEL TEMA ELEGIDO.....	13
Marco Teórico	13
Marco Legal.....	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
Efectos de Material Particulado sobre el sistema climático.....	17
Efectos de Material Particulado sobre la salud humana y el ambiente.....	17
Contexto Mundial	18
Situación en América Latina.....	19
Contexto Nacional	19
Situación en Santa Marta (Colombia).....	20
Área de Estudio	23
3. HIPÓTESIS	27
Hipótesis de trabajo.....	27
Justificación de la hipótesis	27
4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE TESIS.....	29
4.1 Objetivo General.....	29
4.2 Objetivos Específicos	29
5. METODOLOGÍA DE DESARROLLO.....	31
5.1 Distribución temporal de concentraciones de material particulado.....	31
5.2 Aplicación de Pruebas y análisis estadísticos.....	33
5.3 Estimación de Emisiones de Fuentes a través de Inventarios de emisiones.....	34
5.4 Evaluación meteorológica relevante.....	48
5.5 Modelado de dispersión de contaminantes	48
5.6 Validación del modelo de dispersión.....	52
5.7 Proyecciones, análisis de datos y salidas del modelo.....	53
6. RESULTADOS.....	55
6.1 CONCENTRACIONES PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y MATERIAL PARTICULADO MP ₁₀	55
6.1.1. Concentraciones Diarias de PST (µg/m ³)	55
6.1.2. Concentraciones Diarias de MP ₁₀ (µg/m ³).....	58
6.1.3. Medias Geométricas mensuales de las concentraciones diarias de PST.....	61
6.1.4. Medias Geométrica Anuales de las concentraciones diarias de PST.....	64
6.1.5. Medias Aritméticas mensuales de las concentraciones diarias de MP ₁₀	65
6.1.6. Medias Aritméticas Anuales de las concentraciones diarias de MP ₁₀	67
6.2 CLÚSTERES.....	71
6.2.1 Clústeres Concentración estaciones PST	71
6.2.2 Clústeres Concentración estaciones MP ₁₀	72
6.3 INVENTARIO DE EMISIONES	75
6.3.1 Identificación de Fuentes	75
6.3.2 Representación de emisiones en área de Estudio.....	78
6.3.3 Emisiones PST y MP ₁₀ para fuentes puntuales y de área	81
6.3.4 Emisiones MP ₁₀ para fuentes móviles y Zonas atractoras	81
6.4 EVALUACIÓN METEOROLÓGICA RELEVANTE	89
6.5 MODELADO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES	97
6.5.1. Validación del Modelo.....	107
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	111
8. LIMITACIONES DEL ESTUDIO-CONSIDERACIONES PARA EL FUTURO	117
9. CONCLUSIONES	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
APÉNDICE	135

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores máximos permisibles de PST y MP ₁₀ según la Resolución 610 de 2010 y Resolución 2254 de 2017.....	16
Tabla 2. Formato de recolección y sistematización de la información.....	31
Tabla 3. Número de Vehículos en Santa Marta y clasificación.....	40
Tabla 4. Factores de Emisión para MP ₁₀ por tipo de combustible.....	43
Tabla 5. Datos de Actividad.....	44
Tabla 6. Peso asignado a Zonas Atractoras.....	46
Tabla 7. Estación Ernesto Cortissoz.....	48
Tabla 8. Concentraciones (µg/m ³) máximas y mínimas diarias de PST en las estaciones de monitoreo de CORPAMAG en el período 2000–2014.....	55
Tabla 9. Concentraciones (µg/m ³) Máximas y Mínimas diarias de MP ₁₀ en las estaciones de CORPAMAG, período 2008–2014.....	58
Tabla 10. Formación de Clústeres para estaciones de PST, período 2000-2014.....	71
Tabla 11. Formación de clústeres estaciones de MP ₁₀ , período 2009-2013.....	72
Tabla 12. Fuentes Identificadas y Clasificación por Categorías.....	75
Tabla 13. Emisión estimada por Actividad y contaminante para fuentes naturales identificadas.....	76
Tabla 14. Emisión Calculada por Actividad y contaminante para fuentes antrópicas identificadas.....	76
Tabla 15. Escenarios concentraciones PST (µg/m ³).....	104
Tabla 16. Escenarios concentraciones MP ₁₀ (µg/m ³).....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribución del número de partículas en función del diámetro (modificado de EPA, 1996). Fuente: Viana, 2003.....	13
Figura 2. Fuentes y Composición del Materia Particulado. Fuente: Swisscontact, 2001.....	14
Figura 3. Área de Estudio. Zona Costera del departamento del Magdalena.....	24
Figura 4. Mapa estaciones de Monitoreo de CORPAMAG y comunas de la Ciudad de Santa Marta.....	25
Figura 5. Direcciones predominantes de los vientos área comprendida entre Santa Marta y Ciénaga. Fuente: Ambiental Consultores, 2010.....	25
Figura 6. Zonas atractoras de vehículos.....	47
Figura 7. Estructura procesamiento de la información en AERMOD. Fuente: EPA, 2004.....	49
Figura 8. Concentraciones Máximas diarias de PST en las estaciones de monitoreo de CORPAMAG, período 2000–2014.....	56
Figura 9. Concentraciones diarias máximas diarias de MP ₁₀ en las estaciones de CORPAMAG, período 2008–2014. Mapa en coordenadas geográficas.....	59
Figura 10. Promedios de las Medias Geométricas mensuales de las concentraciones diarias de PST para el período 2000–2014 (valores en puntos verdes, desvío estándar en barras negras) en comparación con la norma anual colombiana (línea roja), para las estaciones Aeropuerto, Alcatraces y Don Jaca.....	61
Figura 11. Promedios de las Medias Geométricas mensuales de las concentraciones diarias de PST para el período 2000–2014 (valores en puntos verdes, desvío estándar en barras negras) en comparación con la norma anual colombiana (línea roja), para las estaciones Centro Ejecutivo, CAJAMAG, INVEMAR y Batallón.....	62
Figura 12. Media Geométrica Anual de las concentraciones diarias de PST durante el período 2000–2014.....	64

Figura 13. Media Geométrica Anual de las concentraciones diarias de PST durante el período 2000–2014.....	64
Figura 14. Promedio de las medias aritméticas mensuales de las concentraciones diarias de MP ₁₀ para el período 2008–2014 (valores en puntos verdes, desvío estándar en barras negras) en comparación con la norma anual colombiana (línea roja), para las estaciones Alcatraces, Carbograneles y Club Santa Marta.....	65
Figura 15. Promedio de las medias aritméticas mensuales de las concentraciones diarias de MP ₁₀ para el período 2008–2014 (valores en puntos verdes, desvío estándar en barras negras) en comparación con la norma anual colombiana (línea roja), para las estaciones Costa Verde, Don Jaca y Zuana.....	66
Figura 16. Media aritmética Anual de las concentraciones diarias de MP ₁₀ durante el período 2008–2014.....	68
Figura 17. Media aritmética Anual de las concentraciones diarias de MP ₁₀ durante el período 2008–2014.....	68
Figura 18. Emisión de PST y MP ₁₀ (Kg/año) por actividades de origen Natural	77
Figura 19. Emisión de PST (Kg/año) por actividades de origen Antrópico	78
Figura 20. Emisión de MP ₁₀ (Kg/año) por actividades de origen Antrópico.....	78
Figura 21. Fuentes de área y Puntuales de la zona Costera del Departamento del Magdalena. Coordenadas Geográficas.....	80
Figura 22. Emisión PST (Kg/Año) Fuentes de Área Antrópicas en zona costera del departamento del Magdalena. Coordenadas Geográficas.....	83
Figura 23. Emisión PST (Kg/Año) Fuentes de Área Naturales (Erosión) en zona costera del departamento del Magdalena. Coordenadas Geográficas.....	84
Figura 24. Emisión MP ₁₀ (kg/año) Fuentes Puntuales y de Área zona costera del departamento del Magdalena. Coordenadas geográficas.....	85
Figura 25. Emisión (Kg/año) de MP ₁₀ originada por el tráfico Vehicular con zonas atractoras. Coordenadas Geográficas.....	86
Figura 26. Rosa de vientos período 2009–2013	90
Figura 27. Rosa de vientos estación verano período 2009–2013	91
Figura 28. Rosa de vientos estación otoño período 2009–2013.....	92
Figura 29. Rosa de vientos estación invierno período 2009–2013	93
Figura 30. Rosa de vientos estación primavera período 2009–2013.....	94
Figura 31. Rosa de vientos horario de 0–16 horas (izquierda) y de 16–23 horas (derecha) período 2009–2013.....	95
Figura 32. Concentraciones de PST año 2000 con malla vial. Coordenadas UTM.....	99
Figura 33. Concentraciones de PST a. Año 2001, b. Año 2002, c. Año 2003, d. Año 2004. Coordenadas UTM.....	100
Figura 34. Concentraciones de PST a. Año 2005, b. Año 2006, c. Año 2007, d. Año 2008. Coordenadas UTM.....	101
Figura 35. Concentraciones de PST a. Año 2009, b. Año 2012, c. Año 2010, d. Año 2014. Coordenadas UTM.....	102
Figura 36. Concentraciones de MP ₁₀ a. Fuentes fijas año 2008, b. Fuentes Fijas Años 2012, c. Fuentes Móviles año 2008, d. Fuentes Móviles años 2012.....	103
Figura 37. Concentraciones para PST a. Escenario 1, b. Escenario 2. Coordenadas UTM.....	105
Figura 38. Concentraciones para MP ₁₀ a. Escenario 1, b. Escenario 2. Coordenadas UTM.....	106
Figura 39. Análisis de Frecuencia concentraciones PST	107
Figura 40. Análisis de Frecuencia MP ₁₀	107

LISTA DE ABREVIACIONES

CAJAMAG: Caja de Compensación Familiar del Magdalena
CAR: Corporación Autónoma Regional
CONAMA: Comisión Nacional del Medio Ambiente
CORANTIOQUIA: Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquía
CORPAMAG: Corporación Autónoma Regional del Magdalena
CORPOBOYACA: Corporación Autónoma Regional de Boyacá
CORPOCESAR: Corporación Autónoma Regional de Cesar
CORPONOR: Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental
EPA: Environmental Protection Agency
IC&C: Instituto de Capacitación y Consultoría Ltda.
IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi
INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INVEMAR: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis”
OMS: Organización Mundial de la Salud
MP₁₀: material particulado de tamaño aerodinámico menor a 10 µm
PST: Partículas Suspendidas Totales
UNIMAG: Universidad del Magdalena

RESUMEN

La zona costera del departamento del Magdalena (Colombia), está influenciada por la ocurrencia de eventos de origen natural y por la presencia de actividades de origen antrópico que pueden afectar la calidad del aire. El presente estudio de tipo cuantitativo y descriptivo, se desarrolló con el fin de utilizar el modelado de dispersión de contaminantes para evaluar la influencia de las actividades desarrolladas a lo largo de la zona costera, en las concentraciones de material particulado registradas por las estaciones de monitoreo de la red de calidad del aire de CORPAMAG. Se realizó un análisis de las concentraciones de 7 estaciones de PST y 6 estaciones de MP₁₀, y se modelaron las emisiones de PST y MP₁₀ obtenidas a partir de un inventario de emisiones elaborado para la zona. El estudio mostró incumplimientos en la norma anual en las estaciones Aeropuerto, CAJAMAG, Centro Ejecutivo e INVEMAR (PST), y en la estación Costa Verde (MP₁₀). Para PST las fuentes de origen industrial contribuyen con 60% del total de las emisiones. Para MP₁₀ en zona urbana, las emisiones de origen vehicular tienen una contribución del 80%, y en zona rural las fuentes fijas aportan el ~ 85% del total de las emisiones.

Palabras Clave: Calidad del aire, Zona Costera, Material Particulado, Salud Pública, Fuente de Emisión, Inventario de emisión.

ABSTRACT

The coastal zone of the Magdalena's department (Colombia) is influenced by the occurrence of natural events and by the presence of anthropogenic activities that may affect air quality. This is a quantitative and descriptive study, its aim is to using the pollutants dispersion modeling to evaluate the influence of the activities developed along the coastal zone, over the concentrations of particulate matter registered by the monitoring stations belonging to CORPAMAG air quality network. An analysis over concentrations of 7 TSP stations and 6 PM₁₀ stations was carried out, and the TSP and PM₁₀ emissions obtained from an emissions inventory prepared for the area, were modeled. The study showed the TSP yearly limit was exceeded at the Aeropuerto, CAJAMAG, Centro Ejecutivo and INVEMAR stations, and PM₁₀ yearly limit was exceeded at the Costa Verde station. For TSP, industrial sources contribute with 60% of total emissions. For PM₁₀ in urban areas, vehicular emissions sources have a contribution of 80% and, in country areas stationary sources contribute ~ 85% of total emissions.

Key words: Air Quality, Coastal Zone, Particulate Matter, Public Health, Emission Source, emissions inventory.

1. FUNDAMENTACIÓN DEL TEMA ELEGIDO

Marco Teórico

De acuerdo a lo publicado por diversos autores (Matus y Lucero, 2002; OMS, 2004; Romero et al., 2006; Instituto Nacional de Ecología, 2007; Centro de Control de Calidad del Aire de Murcia, 2012; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2016), la calidad del aire es una medida de las condiciones del aire asociada a los niveles de contaminación atmosférica. Depende de la concentración de diferentes sustancias contaminantes presentes en la atmósfera en un período de tiempo y lugar determinado, y de factores como las características químicas de la atmósfera, las reacciones químicas entre los contaminantes y las condiciones atmosféricas y meteorológicas.

La calidad del aire es alterada por diversos contaminantes, entre ellos el material particulado (MP), definido como un conjunto de partículas sólidas o líquidas presentes en la atmósfera bajo condiciones normales. En función de su diámetro aerodinámico (diámetro de una esfera uniforme en unidad de densidad que alcanza la misma velocidad terminal de asentamiento que la partícula de interés) se clasifica (Figura 1) en: (i) Partículas Suspensas Totales (PST) con diámetro hasta 100 micrómetros, (ii) Partículas Inhalables o Respirables con diámetro menor a 10 micrómetros (MP_{10}), (iii) Partículas intermedias con diámetro menor a 2.5 micrómetros ($MP_{2.5}$), (iv) Partículas finas cuyo diámetro es menor a 1 micrómetro (MP_1), y (v) Partículas ultrafinas con diámetro menor a 0.1 micrómetros ($MP_{0.1}$) (Arciniegas, 2012; Armesto y Lobo, 2014).

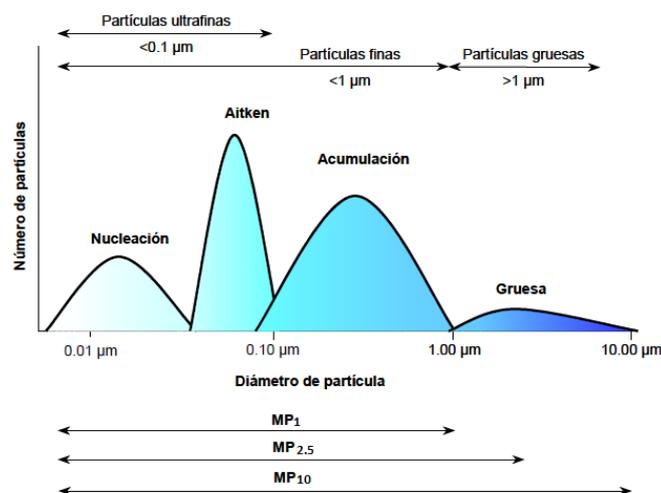


Figura 1: Distribución del número de partículas en función del diámetro (modificado de EPA, 1996). Fuente: Viana, 2003.

El material particulado está constituido por una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos, cuyas propiedades físicas y químicas dependen principalmente de la fuente de origen. Las características físicas ejercen influencia sobre el transporte, tiempo de permanencia y disponibilidad, mientras que sus características químicas se relacionan directamente con los efectos sobre la salud humana (Arciniegas, 2012; Armesto y Lobo, 2014).

Las fuentes de material particulado (Figura 2) pueden ser de origen natural, como el polvo volcánico, tolvaneras, el polvo proveniente de procesos erosivos causados por el viento, el humo de incendios forestales, el polen, las esporas, sal marina y espumas de mar; o de origen antrópico, como resultado de la realización de actividades agrícolas, mineras, industriales, de construcción, quema de leña y carbón. En relación a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (primarias), o bien ser generadas por reacciones químicas (partículas secundarias) (Querol, 2006; Pérez *et al.*, 2010; Armesto y Lobo, 2014).

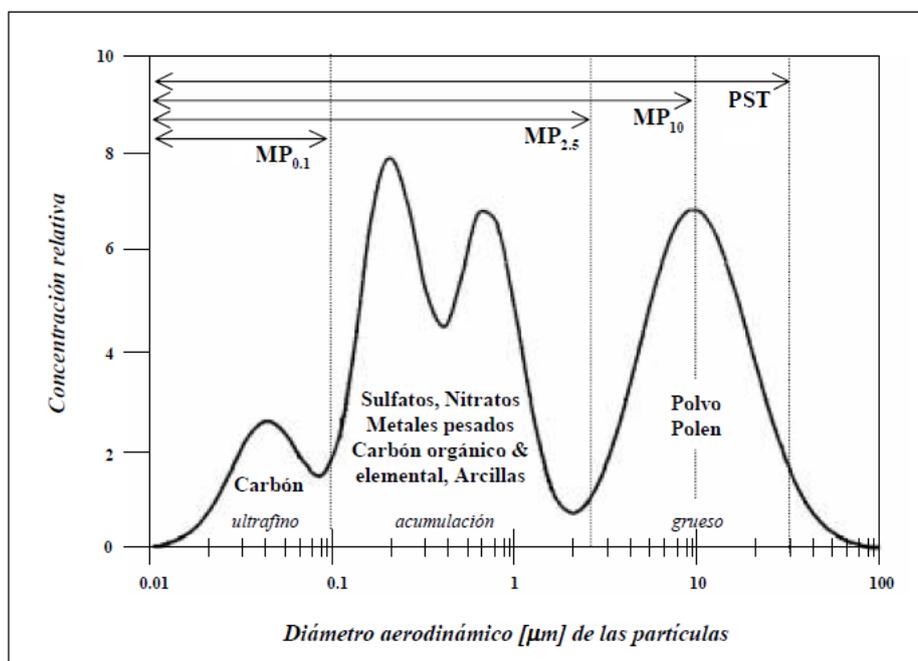


Figura 2. Fuentes y Composición del Materia Particulado. Fuente: Swisscontact, 2001

Marco Legal

Desde el punto de vista jurídico las normas más relevantes en temas de calidad de aire en Colombia son las citadas a continuación:

- Ley 23 de 1973 concede facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y protección al medio ambiente, que tiene como objeto principal la prevención y control de la contaminación del medio ambiente, mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables.

- Decreto 2811 de 1974 conocido como el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, comienza a otorgarle importancia al cuidado de la calidad del aire en algunos de sus artículos (73-76) y dicta disposiciones relacionadas con las normas generales de política ambiental, con las tasas retributivas de servicios ambientales, sistemas de información ambiental y asuntos ambientales de ámbito o influencia internacional.
- Ley 9 de 1979, en la que se prohíbe la utilización del sistema de quema al aire como método de eliminación de basuras sin previa autorización del ministerio de Salud, en adición a ello se dictan normas para las descargas de contaminantes al aire y se propone la fijación de normas sobre calidad del aire teniendo en cuenta los postulados de esta ley y de los artículos 73-76 del Decreto ley 2811 de 1974.
- Decreto 02 de 1982, reglamenta parcialmente el título I de la Ley 09 de 1979 y el Decreto ley 2811 de 1974 en cuanto a emisiones atmosféricas, el decreto contiene las normas generales de emisión para fuentes fijas de contaminación al aire, normas especiales de emisión de partículas para algunas fuentes fijas artificiales como calderas de carbón, industrias metalúrgicas, y otras industrias, normas de emisión de dióxido de azufre y neblinas ácidas para algunas fuentes fijas artificiales y los métodos de medición de emisiones por chimeneas y ductos.
- Decreto 948 de 1995 correspondiente al reglamento de protección y control de calidad del aire que deroga parcialmente al Decreto 02 de 1982, a continuación el 3 de abril de 2006 el Decreto 979 modifica los artículos 7, 10, 93, 94 y 106 del Decreto 948 de 1995.
- Resolución 601 de 2006 establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia, en la que se desarrollan los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera; los procedimientos para la medición de la calidad del aire, los programas de reducción de la contaminación del aire y los niveles de prevención, alerta y emergencia, así como las medidas generales para su mitigación.
- Resolución 650 de 2010 se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, en él se establecen las directrices, metodologías y procedimientos necesarios que permitan el adecuado funcionamiento del sistema de vigilancia de Calidad de Aire en el territorio nacional; posteriormente en noviembre de 2010 se modifica la Resolución 650 de 2010, y se expide la Resolución 2154 de 2010, en la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones.

- Resolución 651 de 2010 por medio de la cual se crea el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire -SISAIRE.
- Resolución 610 de 2010 expedida el 24 de marzo de 2010, por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006, y se conserva los niveles máximos permisibles para partículas suspendidas totales – PST. Por último, el 01 de Noviembre de 2017 se adopta la norma de calidad del aire ambiente (Resolución 2254 de 2017) y se dictan otras disposiciones (Tabla 1).

Tabla 1. Valores máximos permisibles de PST y MP₁₀ según la Resolución 610 de 2010 y Resolución 2254 de 2017

CONTAMINANTE	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	LÍMITE NORMA LOCAL	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
PST	µg/m ³	100	98.7	ANUAL
		300	296.2	24 HORAS
MP ₁₀	µg/m ³	50	49.3	ANUAL
		100	98.7	24 HORAS

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las PST y MP₁₀, actualmente constituyen una de las preocupaciones en el campo de la salud pública y ambiental, puesto que la presencia de estos contaminantes está relacionada con efectos sobre el sistema climático, sobre la salud humana y ambiental en las zonas donde las concentraciones superan los límites establecidos por los organismos de control (Arciniegas, 2004; Gaitán, 2007; Fonseca, 2012; Im et al., 2015).

Efectos de Material Particulado sobre el sistema climático

Las partículas suspendidas juegan un papel importante en el sistema climático, debido a que reflejan y absorben la luz solar en determinadas longitudes de onda, funcionan como núcleos de condensación de vapor de agua presentes en la tropósfera, y contribuyen en la formación y tiempo de vida de las nubes. Además de tener efectos sobre el balance radiativo, estas partículas intervienen en la química atmosférica y en los ciclos biogeoquímicos (CONAMA, 2014; Sánchez H, 2015; Diamantopoulou et al., 2016).

En este contexto es importante destacar que los sulfatos, nitratos y el carbón orgánico pueden reflejar la radiación solar y generar un efecto de enfriamiento, pero otros componentes presentes en las partículas como el hollín (carbono negro) generan un efecto contrario, al absorber la radiación solar contribuyen al calentamiento de la atmósfera, ambos resultados pueden modificar la circulación atmosférica, el ciclo del agua y patrones de precipitación (INECC, 2011).

Efectos de Material Particulado sobre la salud humana y el ambiente

Los niveles elevados de material particulado se encuentran vinculados a incrementos en afecciones como anomalías respiratorias, complicaciones de enfermedades cardiovasculares, alteraciones en el sistema inmunológico, daño pulmonar, carcinogénesis y muerte prematura, tanto en adultos como en niños (Alvarado, 2010a, Shaughnessy et al., 2015; Raaschou-Nielsen et al., 2016).

Se ha encontrado que cada aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de MP₁₀ origina un incremento del 1% en los ingresos por enfermedades respiratorias de la población general, un incremento del 3.4% y 1.9% en las visitas a urgencias y hospitalizaciones de asmáticos respectivamente, y aumentos del 7.2% sobre la mortalidad por enfermedad cardiovascular. En ciudades con concentraciones importantes de material particulado se ha estimado un aumento del 10-15% en el riesgo de padecer cáncer de pulmón en comparación con las ciudades que

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado presentan menores registros en las concentraciones de material particulado (Cruz et al., 2013; Shaughnessy et al., 2015).

De la misma forma que las altas concentraciones de material particulado son perjudiciales para la salud humana y animal, también lo son para las plantas debido a los impactos a nivel fisiológico y morfológico que causan sobre la vegetación. Los impactos dependen de las fuentes que dan origen al material particulado destacándose efectos como heridas visibles, reducciones en la fotosíntesis, cambios en la pigmentación, en los contenidos de proteína, en el área y en la arquitectura de la superficie foliar de la planta (Fonseca, 2012; Kumar 2016).

Por otro lado ocasiona otros efectos, dentro de los principales se encuentran la reducción de la visibilidad en las áreas con altas concentraciones de material particulado, alteración de las propiedades físicas de materiales (piedra, vidrio, materiales de fibras, entre otros), ensuciamiento de superficies expuestas, desgaste en los materiales expuestos y corrosión de la mampostería sobre edificios, lo que incide de forma negativa sobre las actividades productivas desarrolladas en la zona y con ello directamente en la economía, en el bienestar social y en la calidad de vida en general de las personas que se encuentran en las zonas afectadas (Alvarado, 2010a; Gesta Aire, 2012; Ministerio de Medio Ambiente Chile, 2012).

Con el avance de los años la literatura señala mayor número de actividades y procesos industriales desarrollados en los diferentes países, lo que se traduce en posibles aumentos en las concentraciones de material particulado y otros contaminantes. Las estadísticas muestran incrementos en el tráfico vehicular, urbanización, actividades portuarias, quema de combustibles fósiles entre otras actividades que contribuyen a niveles más altos en las concentraciones de partículas y por ende al deterioro de la calidad del aire (Bravo, 2013; Faber et al., 2015).

Contexto Mundial

Estudios desarrollados en distintos países muestran registros importantes de material particulado, como resultado de las tormentas de polvo procedentes del desierto de Gobi y Taklimakan, en Nanjing se reportaron concentraciones máximas en un período de 24 horas de $767 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de $1129 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} y PST respectivamente (Zhao, 2012; Hang et al., 2015).

Por su parte en Beijing, Shanghai y Guangzhou las concentraciones medias anuales reportadas se encontraron en el rango de 64.1 - $115.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} , ciudades como Taipei y Nakhon Si Thammarat registraron concentraciones medias diarias de 61.9 y $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y en particular Bangladesh, al sur de Asia, un valor anual de $97.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} . Los registros fueron

asociados a las emisiones de fuentes de calor utilizadas en las épocas de otoño e invierno en las ciudades y a las emisiones vehiculares. (Begum, 2013; Kanabkaew et al., 2013; Candice et al., 2014; Ma y Jía, 2016).

Los países europeos registraron concentraciones anuales entre 40 y 109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ incluidos Portugal, Turquía, Macedonia, Bulgaria y Polonia. Las ciudades de países escandinavos presentaron niveles inferiores de MP_{10} es el caso de Londres, Berlín y Amsterdam con valores medios entre los 30 – 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en Madrid y Barcelona con niveles entre 35 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En el resto de España estudios registraron valores diarios entre 30 y 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} (Querol 2008; Titos et al., 2015; Zibert et al., 2016; Oliveira et al., 2016; Sa et al., 2016).

Situación en América Latina

Por su parte en América Latina los estudios publicados mostraron en su mayoría niveles más altos en comparación a los registrados en los países europeos. México por ejemplo presentó concentraciones medias anuales de MP_{10} entre 37 y 117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y concentraciones de PST entre 59.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 140.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que exceden los límites anuales (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} y 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PST) establecidos por la OMS (Vidal et al., 2010; Arciniegas, 2012; Elizabeth et al., 2013).

De la misma manera Chile mostró concentraciones anuales para MP_{10} de 72 y 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ debidas principalmente al tráfico vehicular y fuentes de combustión para generar calor, especialmente durante las estaciones con menores temperaturas en el año (Toro et al., 2014). En Tabira, una ciudad de Brasil los registros máximos de MP_{10} alcanzaron los 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Alfesio et al., 2007) y finalmente en Caracas, Venezuela los registros evidenciaron concentraciones anuales de PST de 97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De hecho, en América latina se calcula que anualmente fallecen alrededor de 35000 personas por la contaminación del aire intraurbano (Guajardo et al., 2010; Ministerio de Ambiente, 2012).

Contexto Nacional

En Colombia la situación es similar: se registraron cerca de 5000 muertes prematuras por causa de la contaminación atmosférica, informes mostraron que cada año hay cerca 4700 casos de bronquitis crónica, atribuibles a la contaminación del aire urbano en el país, e incrementos del 17% en las consultas por cada aumento en 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentración de MP_{10} . Al año 2016 se cuenta con 117 estaciones de MP_{10} y 33 de PST, todas incluidas dentro de los sistemas de

vigilancias de las diferentes autoridades ambientales de Colombia (IDEAM, 2012; Ministerio de Medio Ambiente, 2012; Arciniegas, 2012).

Durante los últimos años las mayores concentraciones de MP₁₀ se registraron en las estaciones del sistema de vigilancia de la calidad del aire (SVCA) del área Metropolitana del Valle de Aburrá con 67.89 µg/m³, seguido del sistema de CORPONOR con un valor de 66 µg/m³. Por su parte, los SVCA de CORANTIAQUIA y la CAR registraron valores de 62 µg/m³ y por último CORPOBOYACÁ presentó valores de 61 µg/m³, por encima de los valores anuales establecidos por la Norma local (50 µg/m³) y por la OMS. Para el caso de las PST se registraron valores anuales superiores a los establecidos por la norma local (100 µg/m³) en las estaciones de CORPOCESAR y CORPAMAG (Ministerio de Medio Ambiente, 2012; IDEAM, 2012).

Otros estudios desarrollados en el país reportaron concentraciones relevantes de material particulado. Gaitán 2007 publicó los resultados de los monitoreos de 10 estaciones ubicadas en la ciudad de Bogotá, encontrando medias anuales entre 68 y 100 µg/m³ para MP₁₀, asociadas principalmente a la presencia de industrias y al tráfico vehicular (Gaitán, 2007). Estudios similares presentaron valores anuales de 64 µg/m³, 70 µg/m³ y hasta 90 µg/m³ para las concentraciones de MP₁₀ y concentraciones para PST de 140 µg/m³ en las estaciones de monitoreo de la red de calidad del aire de la ciudad de Bogotá (Franco, 2009; Secretaría de Ambiente, 2010; Franco, 2012).

De igual manera, los monitoreos realizados en otras ciudades de Colombia como Medellín, Ocaña y Riohacha, mostraron concentraciones significativas de material particulado, reportando registros anuales de 60 µg/m³ para Ocaña, de 43.69 µg/m³ para Riohacha y de 63 µg/m³ para Medellín, que en su mayoría se encuentran por fuera del límite establecido por la normativa Nacional Resolución 610 de 2010 para MP₁₀ (50 µg/m³), y por encima de límites internacionales como el de la OMS que estipula un valor anual de 20 µg/m³ para MP₁₀ (Rojano, 2013; Gaviria et al., 2011; Arciniegas, 2012; Armesto y Lobo, 2014). También se encontraron concentraciones anuales para PST en Riohacha, Zona del Cerrejón y el Valle de Aburrá de 98.67 µg/m³, 102.7 µg/m³ y 110 – 132 µg/m³ respectivamente (Rojano, 2013; IDEAM, 2012, Universidad Nacional, 2012).

Situación en Santa Marta (Colombia)

Como se evidenció en párrafos anteriores, existen varios estudios en el país sobre material particulado, concentrados principalmente en las ciudades de mayor tamaño del país con fuentes

importantes de emisión. Si bien Santa Marta (capital del departamento del Magdalena) no se encuentra incluida dentro de las principales ciudades del país, ha mostrado un gran avance en la recopilación y generación de información relacionada con las concentraciones de material particulado, incluidas las PST y MP₁₀.

Vergara y García, 2013 mostraron en su estudio concentraciones violatorias para PST y MP₁₀ especialmente en el norte de la ciudad. Para el desarrollo de la investigación se tomaron 4 puntos de muestreo dentro de la ciudad de Santa Marta (Estación Almendro, Estación ESPA, Estación UNIMAG y Estación ZALEZA), los registros de medición presentaron valores diarios máximos entre 233 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 381 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PST y entre 86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 221 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP₁₀ atribuidas a las actividades de los puertos de carbón y al tráfico vehicular.

De la misma manera los resultados publicados por Candanoza et al., 2013, mostraron concentraciones significativas de PST y MP₁₀, en el estudio se tomaron 5 puntos de muestreo dentro de la ciudad de Santa Marta (Estación CURINCA, Estación ALMENDRO, Estación ESPA, Estación UNIMAG y Estación ZALEZA), las concentraciones máximas diarias obtenidas reportaron valores de 223 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 381 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PST y entre 86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 456 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP₁₀. En este caso las altas concentraciones fueron vinculadas a actividades como el manejo de carbón, la resuspensión del material del suelo por acción del viento y la circulación de vehículos. Por su parte Garrido y Camargo, 2013, registraron medias anuales para PST entre 51.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 142.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en los puntos objeto de estudio.

Varios autores coincidieron en citar como principales fuentes de origen antrópico asociadas a la generación de material particulado en la ciudad de Santa Marta, a la operación de terminales de puertos de carbón, el transporte por el corredor vial y el funcionamiento de trituradoras de piedra. Por su parte como fuentes de origen natural en la zona se tiene el aerosol marino y la erosión eólica que resuspende el polvo de los cerros de la ciudad (Díaz y Causado, 2007; Camargo y Pérez, 2009; Vergara y García, 2013).

En este contexto, es importante citar la influencia de estas altas concentraciones en la ciudad de Santa Marta, debido a que se ha registrado una prevalencia de 45.4% de síntomas respiratorios sobre las personas en las zonas expuestas a concentraciones de MP₁₀ en comparación con las zonas no expuestas, en donde se obtuvo un porcentaje 34.1%. Adicionalmente se encontró asociación estadísticamente significativa entre la exposición a material particulado y la alteración de la función pulmonar en niños entre 6 y 14 años que viven en las zonas afectadas por actividades que contribuyen a la generación de estas partículas (Álvarez y Salazar, 2013).

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

Como respuesta al desarrollo de diferentes actividades industriales, actualmente en el departamento del Magdalena se cuenta con la red de vigilancia de la calidad del aire de CORPAMAG, a la fecha se encuentran funcionando 16 equipos de monitoreo.

Los equipos de monitoreo de material particulado son muestreadores manuales de alto volumen con controlador de flujo volumétrico. Las estaciones se encuentran ubicadas en predios de Invemar, Centro Ejecutivo, Cajamag, Club Santa Marta, Batallón, Molinos Santa Marta, Hotel Zuana, Aeropuerto Simón Bolívar, C.I. Prodeco, Don Jaca, Conjunto Residencial Los Alcatraces, Finca Papare y Costa Verde en Ciénaga (CORPAMAG, 2015).

Dentro de la zona comprendida entre el puerto de Santa Marta y el Municipio de Ciénaga que corresponde a 40 km del total de 220 km de costa del departamento del Magdalena operan cuatro terminales para exportación de carbón, y según los datos registrados movilizan aproximadamente 55 millones de toneladas anuales en su conjunto. Dentro de las entidades que realizan operaciones de almacenamiento y exportación de carbón en la zona, se encuentran la Sociedad Operadora de carbón en Santa Marta CARBOSAN LTDA., la Sociedad C.I. PRODECO S.A., Puerto Drummond y la Sociedad Portuaria de Ciénaga, donde laboran C.I. Carbones del Caribe S.A. y Embocarbón S.A. (Candanoza et al., 2013; Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2013; CORPAMAG, 2015). También funcionan otro tipo de industrias dentro de las que se encuentran canteras y fábricas de aceite vegetal. A las actividades mencionadas se superponen el tráfico diario de vehículos en la zona, distribuidos en camiones, autos de uso particular y transporte público, incluidos en esta última categoría los colectivos pequeños, buses, motocicletas y taxis. Con relación al transporte marítimo a la zona llegan mensualmente 350 buques aproximadamente (Sociedad Portuaria de Santa Marta, 2016).

A pesar de la existencia de la Red de Vigilancia de la Calidad del aire, se observó que en la mayoría de los estudios publicados sólo se consideraron puntos dentro del casco urbano y fuentes ubicadas dentro del mismo. Por su parte CORPAMAG sólo proporciona un informe mensual con las concentraciones y sus excedencias en caso de que ocurran. Tampoco se encontró un número significativo de estudios que permitan analizar en detalle las concentraciones y excedencias de material particulado, establecer patrones o tendencias históricas y finalmente establecer la influencia de las actividades desarrolladas en la zona costera del departamento del Magdalena sobre las concentraciones de material particulado registradas por la Red de Monitoreo de CORPAMAG.

Área de Estudio

La zona costera del departamento del Magdalena (Colombia), tiene un área de 2.177 Km², cuenta con 220 km de costa que se extienden desde Bocas de Ceniza hasta las bocas del río Palomino al noreste del departamento. Comprende tres subzonas diferenciadas ecológica y geomorfológicamente: la primera es el litoral Isla de Salamanca, la segunda subzona se extiende desde la Ciénaga grande de Santa Marta hacia el norte hasta punta Gloria y la tercera va desde Punta Gloria al sur de la ciudad de Santa Marta hasta las bocas del río Palomino. El Ecosistema Costero incluye las áreas costeras de los municipios de Sitio Nuevo, Pueblo Viejo, Ciénaga y el distrito de Santa Marta, así como los Parques Nacionales Naturales Sierra Nevada de Santa Marta, Tayrona e Isla de Salamanca (CORPAMAG, 2015; Cámara de Comercio de Santa Marta, 2016).

En el relieve sobresalen dos zonas, la primera zona conformada por sabanas y ecosistemas fluviolacustres que incluye amplias áreas de relieve llano, semiondulado, con sabanas y un conjunto de ciénagas y caños que las interconectan con el río Magdalena y otros afluentes menores e intermitentes, en donde se destaca el complejo lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta (Departamento Nacional de Planeación, 2011).

La segunda zona es la parte alta de la Sierra Nevada de Santa Marta (principalmente, después del cordón cafetero), se caracteriza por la geografía accidentada que genera una variedad de pisos térmicos y biodiversidad. La zona está cobijada por diversas figuras de protección, como los parques nacionales naturales Sierra Nevada de Santa Marta y Tayrona, la reserva forestal de la Sierra Nevada de Santa Marta y los resguardos indígenas Kogui-Malayo-Arhuaco y Arhuaco de la Sierra (Departamento Nacional de Planeación, 2011).

El presente estudio se desarrolló dentro de la zona comprendida entre el puerto de Santa Marta y el Municipio de Ciénaga, Magdalena que corresponde a 40 km del total de 220 km de Costa (Figura 3).

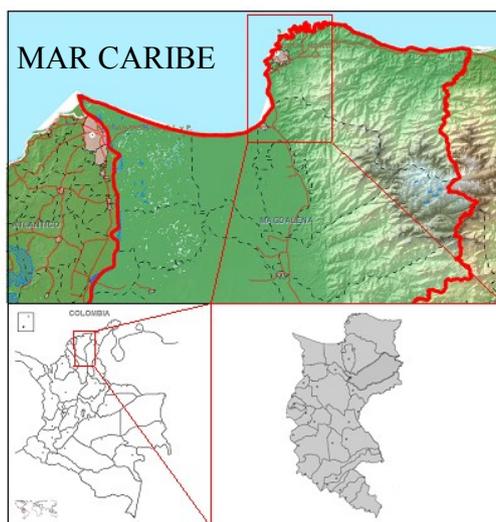


Figura 3. Área de Estudio. Zona Costera del departamento del Magdalena

La población de la zona está compuesta por los habitantes de los municipios de Ciénaga (101985 hab) y el distrito de Santa Marta (415270 hab) (IGAC, 2009). El distrito de Santa Marta se encuentra dividido por comunas (Figura 4).

El clima de la zona en general es cálido, presenta temperaturas promedio de 28°C, con una máxima promedio anual de 34.2°C y una mínima anual de 20.8°C. El promedio mensual de evaporación es de 166.0 mm presentando las máximas de agosto a diciembre y el período de mínimas entre septiembre y noviembre. Los valores de evapotranspiración potencial de todos los meses están por encima de los 50mm. El período de mayor concentración de humedad relativa se inicia en septiembre y va hasta finales de diciembre, el valor promedio para la región es de 80.6%. El Brillo solar registra un promedio anual de 187.1 h/m (CORPAMAG e IC&C, 2002). Si bien no se presentan estaciones climáticas en la zona, sí se registran variaciones a lo largo del año que permiten identificar dos periodos o temporadas: la temporada seca y la temporada lluviosa. La temporada seca suele presentarse en los meses de diciembre - enero y en julio-agosto, y la temporada de lluvias en abril-mayo y octubre-noviembre (IGAC, 2009). Las precipitaciones en la zona oscilan entre 0.9mm – 264.7mm (IDEAM, 2009).

Por su posición el departamento del Magdalena está influenciado por la acción de los vientos alisios del noreste, estos vientos hacen que la zona litoral tenga condiciones de aridez debido a que las nubes son transportadas hacia el suroeste y acumuladas sobre un costado de la Sierra Nevada de Santa Marta (IGAC, 2009). Los vientos provienen generalmente del Norte presentando valores máximos en los meses de febrero, marzo y abril. Entre los meses de junio y septiembre la dirección sur muestra registros importantes. En la (Figura 5) se muestran los

resultados de rosa de vientos para el área comprendida entre Santa Marta y Ciénaga, con información histórica (19 años) para ocho direcciones predominantes.

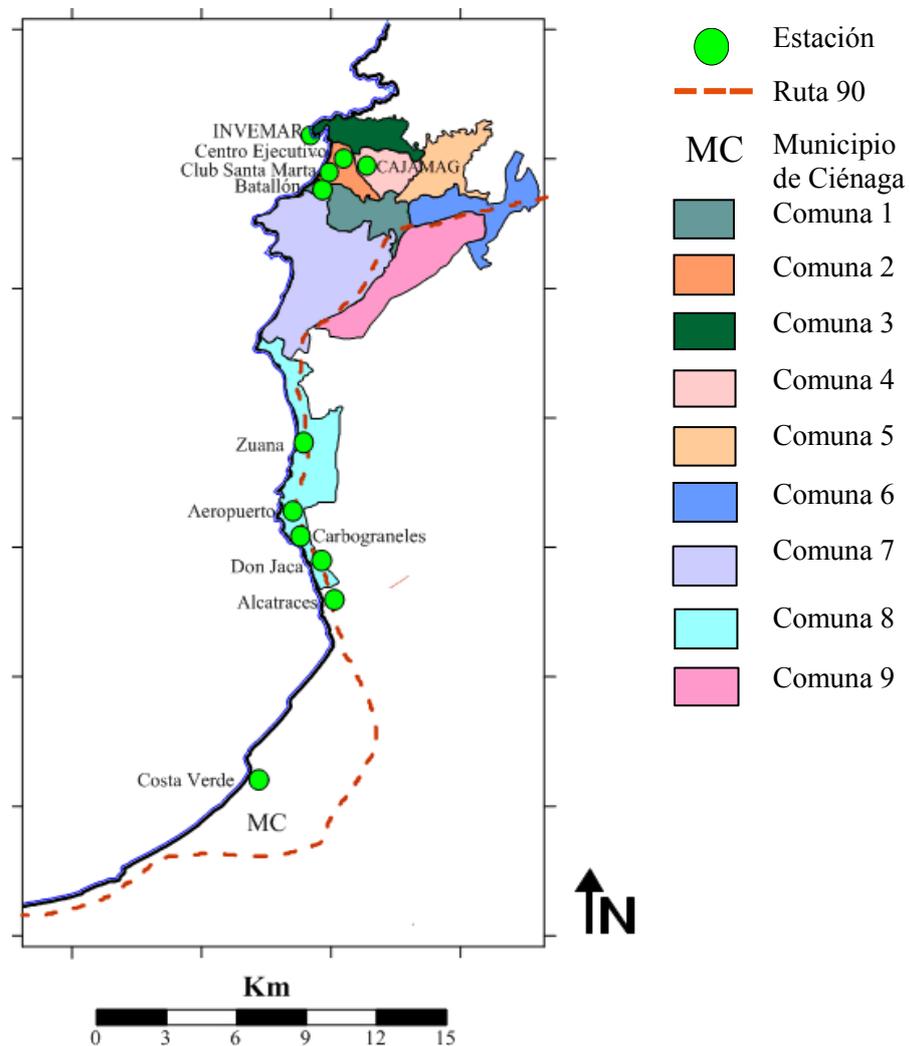


Figura 4. Mapa estaciones de Monitoreo de CORPAMAG y comunas de la Ciudad de Santa Marta

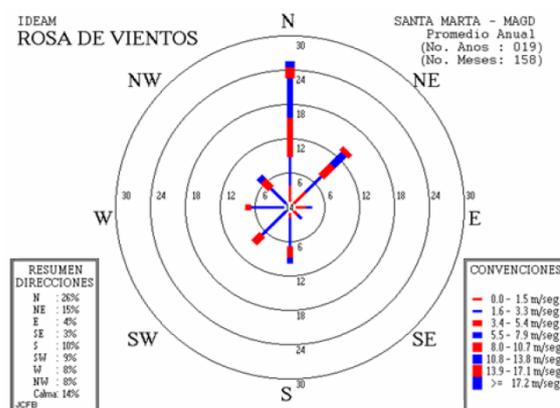


Figura 5. Direcciones predominantes de los vientos área comprendida entre Santa Marta y Ciénaga. Fuente: Ambiental Consultores, 2010.

3. HIPÓTESIS

Las actividades desarrolladas en la zona costera del departamento del Magdalena influyen de manera significativa sobre las concentraciones de material particulado PST y MP₁₀ registradas por la red de calidad del aire de CORPAMAG, representando un riesgo para la salud pública y el ambiente en general de la zona.

Hipótesis de trabajo

La aplicación de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos, configurado y adaptado para la zona costera del departamento del Magdalena es una herramienta que permite identificar la contribución a la calidad de aire de las emisiones asociadas a las actividades desarrolladas en el área. Además, ayuda a evaluar los registros existentes de concentración de material particulado, para la verificación geográfica de las zonas mayormente afectadas y zonas con excedencias de los límites normativos para PST y MP₁₀. De la misma manera, permite evaluar los patrones de concentración, la variabilidad espacial, las tendencias de emisión y el comportamiento de material particulado acorde a variables meteorológicas y a la variabilidad anual.

Asimismo, la aplicación de herramientas estadísticas permite determinar tendencias de las estaciones de monitoreo de CORPAMAG, y su relación con la distribución temporal de material particulado en la zona estudiada.

Justificación de la hipótesis

El modelado de contaminantes atmosféricos es clave, ya que contribuirá a determinar la calidad del aire en la zona a través de los resultados obtenidos para distintos aspectos evaluados, dispersión, cambios en las emisiones, contribución por fuente y categoría, zonas influenciadas, entre otros. De la misma manera la evaluación temporal será de gran utilidad para la construcción de análisis y tendencias históricas en las concentraciones de material particulado de la zona.

Como punto de partida de los modelos de calidad del aire se encuentran los inventarios de emisión útiles para la proyección de emisiones, identificación de fuentes de contaminantes, identificación de contaminantes por fuente y recopilación de información importante relacionada con las emisiones, la cual permitirá encontrar y seleccionar la configuración del modelo que mayor se ajuste a las características de las zona objeto de estudio y de esta manera contribuya a la generación de información fundamental en la gestión de la calidad del aire del área estudiada.

4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE TESIS

4.1 Objetivo General

Utilizar modelado de dispersión de contaminantes para evaluar la influencia de las actividades desarrolladas a lo largo de la zona costera del departamento del Magdalena (Colombia), en las concentraciones de material particulado (PST-MP₁₀) registradas por la red de calidad del aire de CORPAMAG.

4.2 Objetivos Específicos

- 4.2.1. Describir estadísticamente el comportamiento temporal de las concentraciones de PST y MP₁₀ registradas por las estaciones de la Red de vigilancia de calidad del aire de CORPAMAG.
- 4.2.2. Realizar un inventario de emisiones de las principales fuentes antrópicas y naturales asociadas a la generación de material particulado en la zona costera del departamento del Magdalena.
- 4.2.3. Evaluar patrones meteorológicos relevantes para el área de estudio
- 4.2.4. Identificar las zonas mayormente influenciadas por las concentraciones de PST y MP₁₀ en la zona costera del departamento del Magdalena por medio de modelo de dispersión AERMOD.
- 4.2.5. Validar los resultados de la aplicación del modelo a partir de las concentraciones de material particulado registradas por la red de calidad del aire de CORPAMAG.

5. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

La investigación desarrollada fue de tipo cuantitativo y descriptivo; con ella se analizaron las concentraciones y se modelaron las emisiones de partículas suspendidas totales (PST) desde el año 2000 al 2014 y de material particulado de tamaño aerodinámico menor a 10 μm (MP_{10}) desde el año 2008 a 2014.

La modelación se realizó a partir de las emisiones de PST y de MP_{10} obtenidas de un inventario de emisiones elaborado para la zona de estudio, posteriormente se compararon las salidas del modelo con los registros pertenecientes a las estaciones de monitoreo de la red de calidad del aire de CORPAMPAG instaladas en puntos críticos de emisión (Figura 4).

Los objetivos fueron alcanzados a partir de la aplicación de la siguiente secuencia:

5.1 Distribución temporal de concentraciones de material particulado

Acorde con los registros disponibles, del total de las estaciones pertenecientes a la Red de Vigilancia de la calidad del aire de CORPAMAG (9 estaciones para PST y 8 para MP_{10}), se procesaron solo las estaciones con los registros suficientes para realizar el análisis de la mayor cantidad de años y del mayor número de estaciones posibles, dado que en algunos casos hay estaciones con fecha de inicio de funcionamiento con un tiempo menor, en otros casos no se obtuvieron los registros suficientes por distintos motivos.

Siguiendo esta línea se organizó la información suministrada por 7 estaciones de monitoreo de PST (INVEMAR, CAJAMAG, Centro Ejecutivo, Batallón, Aeropuerto, Don Jaca y Alcatraces) y 6 estaciones de monitoreo de MP_{10} (Club Santa Marta, Zuana, Carbograneles, Don Jaca, Alcatraces y Costa Verde), pertenecientes a la Red de Vigilancia de Calidad del aire de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena – CORPAMAG.

Se elaboró un formato (Tabla 2) con las concentraciones de material particulado distribuidas por ubicación de la estación, tipo de estación y año de muestreo. Se utilizaron las herramientas de Microsoft® Excel, esto con el fin de conservar ordenados los registros de los años 2000 – 2014, para su posterior procesamiento.

Tabla 2. Formato de recolección y sistematización de la información

Estación	Variable	Fecha	Concentración
E1-E7	PST	día/mes/año	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

E1-E6	MP ₁₀	día/mes/año	µg/m ³
-------	------------------	-------------	-------------------

Se revisó la cantidad de datos recolectados por cada año, se calcularon las medias geométricas mensuales de las concentraciones diarias, las medias geométricas anuales de las concentraciones diarias para PST y las medias aritméticas mensuales y anuales de las concentraciones diarias de MP₁₀.

Acorde con las Resoluciones 601 de 2006, 610 de 2010 y el Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, para la comparación con la norma anual debe emplearse el promedio geométrico para PST y el promedio aritmético para MP₁₀; los datos incluidos en cálculo de estos promedios para cada caso que corresponda PST o MP₁₀, serán los promedios diarios de concentración.

La Resolución 610 de 2010 define:

Promedio o media aritmética como la sumatoria de todos los datos a promediar, dividido por el número total de datos.

Promedio o media geométrica como la raíz enésima del producto de todos los datos a promediar.

Para su cálculo se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$G = \sqrt[n]{X1 * X2 * X3 * \dots * Xn} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

G: Promedio Geométrico

X1 * X2 * X3 * * Xn: Datos a promediar

Toda la información obtenida se organizó en tablas y gráficos que permitieron la visualización de los meses y años con mayores y menores concentraciones de PST en las siete estaciones durante los años 2000–2014 y el comportamiento de las concentraciones de MP₁₀ en las seis estaciones durante los años 2008–2014.

Los datos de concentración de PST y MP₁₀ tomados de las estaciones de monitoreo de CORPAMAG se encuentran a condiciones locales de presión y temperatura, por lo tanto se ajustaron la norma diaria y la norma anual para PST y MP₁₀ a condiciones locales. Como resultado del ajuste se obtuvieron los valores de 98.7 µg/m³ para la norma local anual, 296.2 µg/m³ para la norma local diaria y 49.3 µg/m³ (Norma Local anual) y 98.7 µg/m³ (Norma local diaria) para MP₁₀. Se aplicó la ecuación presentada en el anexo 1 de la Resolución 601 de 2006:

$$N.L.=\left[\frac{N.C.R.}{p.b. \text{ local}/760}\right] \cdot [298^{\circ}\text{K} \cdot (273+T^{\circ}\text{C})] \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde:

NL: Norma de la calidad del aire local

NCR: Norma de calidad del aire a condiciones de referencia

p.b local: Presión barométrica promedio local en mm de mercurio

T°C: Temperatura ambiente promedio local, en grados centígrados

5.2 Aplicación de Pruebas y análisis estadísticos

Con la información recolectada y organizada de las estaciones de monitoreo de la red de calidad de aire de CORPAMAG se aplicó un Análisis de Clústeres.

El análisis clúster también conocido como análisis de conglomerados, es una técnica estadística multivariante, cuyo objetivo principal es agrupar elementos o variables buscando lograr la mayor homogeneidad entre cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos. La agrupación de los elementos se basa en la idea de distancia o similitud de las observaciones, por tanto su obtención depende del criterio de distancia establecido (De la Fuente, 2011; Universidad de Valencia, 2015).

Se distinguen dos grandes categorías de métodos clústeres: Métodos jerárquicos y métodos no jerárquicos.

Métodos jerárquicos: Estos métodos tienen por objetivo agrupar clústeres para formar uno nuevo, o separar algún clúster ya existente para dar origen a otros dos, de tal manera que se minimice alguna función distancia o bien se maximice alguna medida de similitud. Los métodos jerárquicos a su vez se dividen en métodos aglomerativos y disociativos (De la Fuente, 2011; Universidad de Valencia, 2015).

Los métodos aglomerativos comienzan el análisis con tantos grupos como individuos haya en el estudio. A partir de ello se siguen formando grupos homogéneos hasta que la totalidad de los casos se encuentran agrupados en el mismo conglomerado. Por su parte el método disociativo es el proceso inverso al anterior, es decir el análisis comienza con todos los casos agrupados en el mismo conglomerado, a partir de allí se van formando grupos cada vez más pequeños. En los métodos aglomerativos destacan: método del amalgamamiento simple, método del amalgamamiento completo, método del promedio entre grupos, método del centroide, método de la mediana y método de Ward. Dentro de los métodos disociativos, destacan, el análisis de

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado asociación, el detector automático de interacción (De la Fuente, 2011; Universidad de Valencia, 2015).

Métodos no jerárquicos: Estos métodos tienen por objetivo realizar una sola partición de los individuos en K grupos. Se dividen en cuatro familias: Métodos de Reasignación, Métodos de búsqueda de la densidad, Métodos directos y Métodos de reducción de dimensiones (De la Fuente, 2011; Universidad de Valencia, 2015).

Verificando las referencias y la aplicación de pruebas estadísticas en estudios de material particulado, se encontró que predomina en la presentación de resultados la aplicación del análisis clúster y la generación de dendogramas para la representación de los grupos homogéneos en las concentraciones de material particulado (Hidalgo, 2016 y Doria y Fagundo, 2016)

En este contexto el análisis se utilizó para verificar la homogeneidad temporal de los datos recolectados. Como resultado final se generó un dendograma por cada una de las estaciones analizadas. El dendograma muestra una clasificación de datos a través de los diferentes grupos formados por las similitudes identificadas.

La aplicación de la técnica estadística multivariante constó de cuatro etapas básicas: i) selección de las variables a trabajar con la técnica, para este caso variables cuantitativas (concentración de PST, concentración de MP₁₀, mes, y año), ii) selección de la medida de asociación para caracterizar las relaciones entre las variables (para el estudio se seleccionó la distancia euclídea) iii) selección de método Jerárquico (para el caso se utilizó el método de Ward acorde con estudios realizados en el tema) (Baró, 2013; Hernández y Néstor, 2013; Hidalgo, 2016 y Doria y Fagundo, 2016), y iv) análisis de los resultados obtenidos. El programa estadístico utilizado fue el Stathgraphics Centurion IV.

5.3 Estimación de Emisiones de Fuentes a través de Inventarios de emisiones

Para cálculo de las emisiones asociadas a las fuentes identificadas en la zona, se realizó un inventario de emisiones. El inventario se elaboró en base a la guía EMEP N° 12 de 2013 de la Agencia Europea de Medio Ambiente.

Etapas

- a) Identificación de actividades desarrolladas y recolección de información secundaria

- Se identificaron las actividades desarrolladas en la zona y en consecuencia las principales fuentes asociadas a la generación de material particulado en la zona costera del departamento de Magdalena.

- Se recolectó información secundaria sobre las fuentes y los datos de las actividades asociadas a las fuentes identificadas. La información para el inventario se organizó a partir de los datos de actividad tomados de estudios y de estadísticas efectuadas por diferentes organismos de control y autoridades ambientales en Colombia.

b) Descripción de actividades identificadas y eventos de origen natural

Para la zona de estudio se identificaron como actividades antrópicas que dan lugar a la generación de material particulado (PST y MP₁₀) las citadas a continuación:

-Servicios Portuarios

Dentro de las principales actividades económicas de la zona costera del departamento del Magdalena se encuentra la prestación de servicios portuarios para la exportación de carbón proveniente de otras regiones del país, principalmente del departamento del César.

La logística portuaria comprende las actividades de manejo, almacenamiento y transporte para la carga y descarga de carbón desde y hacia los buques dentro del puerto. El carbón ingresa por medio de camiones, es descargado en las áreas de almacenamiento o patios en los cuales es apilado por medio de cargadores. Es conveniente aclarar que solo en el puerto de la Sociedad Portuaria de Santa Marta la carga de carbón se realiza por cargue directo a los buques, mientras que en las terminales portuarias restantes se realiza por cargue directo a barcazas que llevan el carbón mar adentro y lo descargan en buques por medio de grúas (Superintendencia de puertos y transporte, 2010).

Acorde con la información consultada, a la fecha operan cuatro terminales para exportación de carbón, según los datos registrados en publicaciones movilizan en conjunto aproximadamente 55 millones de toneladas anuales (Candanoza et al., 2013). El puerto que moviliza mayor cantidad corresponde a Drummond con 30 millones de Toneladas por año, seguido del Puerto Prodeco con 16 millones de toneladas, el Puerto Ex Vale con 5 millones y en último lugar la Sociedad Portuaria de Santa Marta que moviliza 4 millones de toneladas por año (Patino, 2013).

Las entidades que realizan las operaciones de almacenamiento y exportación de carbón en la zona, son la Sociedad Operadora de carbón en Santa Marta CARBOSAN LTDA. en la Sociedad

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

Portuaria de Santa Marta y en la Sociedad C.I. PRODECO S.A., Puerto Drummond y la Sociedad Portuaria de Ciénaga, laboran C.I. Carbones del Caribe S.A. y Embocarbón S.A. (Candanoza et al., 2013; Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2013; CORPAMAG, 2015).

-Extracción de materiales de canteras

La extracción de arena y piedra de canteras es otra de las actividades que dan lugar a emisiones de material particulado en la zona evaluada, el proceso se desarrolla a partir de la secuencia de las siguientes actividades: perforación de la roca, voladura de la roca con el método seleccionado, cargue del material volado, transporte de material volado y posterior trituración del mineral (Duarte, 2015).

Acorde con la información proporcionada por la Corporación Autónoma Regional del Magdalena hay 13 Canteras autorizadas para la extracción de material distribuidas en la zona de estudio, la mayoría de las canteras se encuentran localizadas en zona rural (CORPAMAG, 2016). La mayor cantidad de material extraído por cantera corresponde a 6000 toneladas por año aproximadamente, la cantidad varía según el tamaño de la cantera.

- Producción de grasas y Aceites Vegetales Comestibles

En la zona se encuentran dos empresas que desarrollan actividades para la producción de aceites vegetales, GRADESA S.A. y CI FAMAR S.A. cuya actividad principal es la refinación, producción y venta de aceites de grasas vegetales a partir de aceite crudo de palma. Como principales productos fabrican margarinas industriales, aceites líquidos y sólidos.

GRADESA S.A.: las actividades productivas desarrolladas comprenden cinco líneas de producción, que incluyen la producción de aceite de palma crudo, producción de palmiste, proceso de refinación y proceso de producción de margarinas. La extracción de aceite palma se lleva a cabo mediante un proceso térmico y mecánico. No requiere la utilización de aditivos o insumos químicos, las principales materias primas son los racimos de fruta fresca de la palma de aceite, agua y energía. Por su parte en el proceso de producción de aceite de palmiste la almendra del fruto de palma es sometida a molienda para fraccionar la nuez y es mezclada con hexano, el cual va extrayendo el aceite, dando origen a una mezcla de hexano y aceite de palmiste; el aceite es recuperado de la mezcla mediante destilación de hexano (CORPAMAG, 2016).

El proceso de refinación se orienta en primera instancia a eliminar sustancias e impurezas que afectan la calidad del producto, en segunda instancia se eliminan los olores y sabores extraños al

aceite, y por último se fracciona el aceite de palma en sus compuestos sólidos y líquidos (Estearina y Oleína) (CORPAMAG, 2016).

Proceso de producción de margarinas: Básicamente en este proceso se emulsifican las materias primas (estearinas, oleínas y aceite de palmiste) con los insumos como aromatizantes y colorantes para obtener la mezcla pasteurizada y cristalizada a su presentación final (CORPAMAG, 2016).

La energía para el desarrollo de las actividades de la planta se genera a través de la operación de una caldera que utiliza como combustible gas natural. Las características de operación son las siguientes: altura de chimenea: 18.5 m, diámetro: 0.93 m, temperatura: 68°C y velocidad de salida de los gases de 6.6 m/s.¹

C.I. FAMAR S.A.: cuenta con dos sistemas de generación de vapor, una caldera de gas natural y una caldera de carbón mineral. En consecuencia con los procesos desarrollados, se mantiene en funcionamiento continuo la caldera de gas natural, mientras que la caldera de carbón mineral se mantiene para situaciones de contingencia, mantenimientos correctivos, preventivos y racionamientos de gas. Las características de operación tomadas son altura total de la chimenea: 10 m, diámetro de la chimenea 0.6 m, temperatura de salida de los gases 215 °C y una velocidad de salida de los gases de 5.13 m/s.²

Todos los procesos descritos se desarrollan a partir del cultivo de palma de aceite, acorde con la información de la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite sobre el porcentaje de participación en la producción nacional de aceite de palma del departamento del Magdalena, se estimó un área total sembrada de 5000 hectáreas para toda la actividad.

- Disposición de Residuos Sólidos

La producción de residuos sólidos se ha incrementado en las últimas décadas como consecuencia del incremento en la población, es clara la relación directa existente entre la generación de residuos y la cantidad de habitantes, tamaño y expansión de las ciudades (Armenta et al., 2017).

En la ciudad de Santa Marta el manejo de residuos sólidos se realiza a través de la gestión de la empresa INTERASEO S.A. E.S.P. El manejo de los residuos sólidos municipales comprende la recolección, transporte, almacenamiento y disposición final de los mismos. La disposición final

¹ Comunicación vía correo electrónico con personal de la empresa GRADESA S.A. E. Lozano, emili900914@gmail.com, (2017, 17 de Abril).

² Comunicación vía correo electrónico con personal de la empresa C.I. FAMAR S.A. M. Armenta, Jefe Ambiental, ambiental@cifamar.com, (2017, 20 de Mayo).

se realiza a través de la operación del Relleno Sanitario de Palangana ubicado en el km 3 vía Bahía Concha (Ruiz, 2009).

El predio se compone de 52 ha, de las cuales 15 ha se utilizan para la disposición final, mientras que las hectáreas restantes funcionan como zona de amortiguamiento incluyendo un área de 10.5 ha como reserva de la sociedad civil. De acuerdo con la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, en el Relleno se gestionan en promedio 482 Mg/día de residuos sólidos y se estima un promedio de 80200 usuarios atendidos por año (Ruiz, 2009; Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2009).

El Relleno Sanitario de Palangana, obtuvo su licencia ambiental mediante la Resolución 1581 del 17 de noviembre de 2000 otorgada por CORPAMAG, la misma fue ratificada a través de la Resolución 0672 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y por último en el año 2006 fue ampliada por 20 años mediante la Resolución 2075 de 2006 de CORPAMAG (Ruiz, 2009).

-Aviación

Se encuentra representada por las actividades de vuelo desarrolladas en el Aeropuerto Simón Bolívar de la ciudad de Santa Marta, acorde con los registros de la Aeronáutica Civil de Colombia, el consumo promedio de combustible de un avión comercial es de 8935 Ton de Combustible por año (Aeronáutica Civil, 2014). En Santa Marta se registra en promedio un total de 32 vuelos nacionales por día en el Aeropuerto Simón Bolívar.

-Combustión residencial

La combustión residencial está referida al consumo de combustible gaseoso, para el caso está representado en el consumo de gas natural en la ciudad de Santa Marta. Acorde con el informe de la Unidad de Planeación Minero Energética se estimó un consumo de gas natural de 2.349.140 GJ/año (UPME, 2013).

-Transporte Marítimo

Como consecuencia de las actividades portuarias desarrolladas en la ciudad de Santa Marta el transporte marítimo incluye la llegada de buques a cada uno de los puertos que operan en la zona evaluada. Acorde con los registros publicados por la Sociedad Portuaria de Santa Marta, se tiene que a la sociedad llegan mensualmente 350 buques.

- Transporte Terrestre

Acorde con los registros de la Unidad de Tránsito y Transporte de la ciudad de Santa Marta, hay un total de 57928 vehículos distribuidos acorde con la tabla Tabla 3. La circulación de los vehículos en la ciudad está determinada por la categorización de la red vial de la ciudad. Conforme con el artículo 281 “Elementos constitutivos del Sistema Vial del área Urbana”, del acuerdo 005 de 2000, por medio del cual se expide el plan de ordenamiento territorial de Santa Marta, 2000-2009, se tiene que el sistema vial del área urbana distrital se encuentra conformado por las siguientes jerarquías:

-Corredores Urbanos Regionales de carga y pasajeros: está conformado por aquellas vías que permiten la movilización de carga para la exportación, importación o comercialización interna. Funcionan como corredor de carga, enlace interregional, acceso turístico y de relación del distrito con áreas y parques naturales del territorio.

-Sistema Arterial de Enlace Primario (AEP): está integrado por los ejes bidireccionales viales que estructuran el distrito, los cuales permiten articular funcionalmente desde los diferentes accidentes geográficos interconectándolos con las vías troncales. Están destinadas a facilitar el transporte público y privado de carga y de personas.

-Sistema Arterial de Enlace Básico (AEB): integrado por el sistema de vías bidireccionales y cuya longitud permite la conexión con las arterias de enlace primario. Permiten la articulación de las áreas residenciales entre sí, y la articulación con las zonas de concentración de empleos y de servicios institucionales. Comunican a los corregimientos, parques naturales y zonas de producción agropecuaria rural con el sistema vial primario, y simultáneamente soportan el flujo de transporte interurbano privado y público de pasajeros.

-Sistema Arterial de Enlace Secundario (AES): está conformado por aquellas vías que permiten conectar las arterias de enlace básico con las vías de barrios, parques, áreas peatonales, entre otros. Soportan básicamente el tráfico individual, sirviendo de soporte a algunas rutas de buses.

-Red de Vías Locales: Está conformada por las calles de servicio que seccionan manzanas y barrios; las calles y puentes peatonales y las ciclorutas.

Tabla 3. Número de Vehículos en Santa Marta y clasificación.

CLASE	PARTICULAR	PÚBLICO	OFICIAL
Automóvil	13879	3803	14
Bus	12	154	0
Buseta	16	505	2
Camión	294	244	14
Camioneta	4928	146	54
Campero	1617	6	26
Microbus	70	994	2
Tractocamión	8	48	1
Volqueta	26	32	4
Motocicleta	27962	0	126
RNMA (Registro Nacional de Maquinaria Agrícola y de Construcción Autopropulsada)	175	0	0
Motocarro	246	4	0
Cuatrimoto	61	0	1
RNRYS (Registro Nacional de Remolques y Semiremolques)	2454	0	0
Total	51748	5936	244

Fuente: Unidad de Tránsito y Transporte de la ciudad de Santa Marta, 2016

Las emisiones se generan como resultado del proceso de combustión en los vehículos que funcionan con distintos combustibles, gasolina, diesel y gas natural (emisiones menores). Las emisiones también son generadas por causa del asfalto erosionado y por restos de neumáticos dejados en las vías de tránsito.

Finalmente como resultado de las actividades antrópicas identificadas sobre las cuales se sustenta la economía de la zona objeto de estudio y en base a la información disponible, se toma como principales fuentes de emisión de origen antrópico los puertos de carbón, las canteras de extracción, las fábricas de producción de aceite vegetal y el Relleno Sanitario Palangana.

-Fuentes Naturales

En adición a las actividades de origen antrópico identificadas en la zona costera del departamento del Magdalena, la existencia de eventos de origen natural también contribuye en la emisión de material particulado en la zona, acorde con la revisión documental realizada la presencia de aerosol marino, la erosión y el desnudamiento de los cerros son las principales fuentes de origen natural.

- Aerosol Marino: El aerosol marino consiste en gotas de agua de mar presentes en suspensión en el aire y partículas formadas por la evaporación del agua en el aire. Se genera por la acción mecánica del viento sobre la superficie de los mares y océanos. El aerosol marino está compuesto principalmente por cloruro de sodio, y otras formas de cloruros y sulfatos, como el sulfato de sodio y el cloruro de magnesio. Acorde con el Informe del IPCC la contribución marina de aerosoles, es la mayor fuente de aerosoles en la atmósfera (Fernández, 2017).

El departamento del Magdalena, como departamento costero se encuentra rodeado por 220 km de costa, de los cuales 40 kilómetros corresponden al área de estudio en la ciudad de Santa Marta (CORPAMAG, 2015), a partir de lo anterior se calculó la presencia de aerosol marino.

- Erosión, desnudamiento de cerros:

El desgaste del suelo y pérdida de su capacidad productiva por acción de agentes externos como el agua, el viento y las actividades humanas ayudan a la generación de material particulado en la zona de estudio. En el departamento del Magdalena la información publicada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, muestran varios grados de erosión clasificados como erosión ligera, moderada, severa y muy severa, registrándose como principales causas antrópicas las actividades como la ganadería y los usos mixtos del suelo: agricultura y minería. Básicamente la utilización del suelo para una actividad distinta de su vocación natural, incrementa los efectos negativos sobre las características y propiedades del suelo (IGAC, 2011; IDEAM, 2009).

Por otro lado la influencia de agentes hidrodinámicos como el viento, las olas, tormentas, mareas, corrientes litorales y el aumento del nivel del mar ayudan de forma importante en los procesos de erosión de las costas de la zona objeto de estudio. De igual manera actividades antrópicas como la extensión de áreas portuarias, la extracción de arenas para rellenos de playas, y la construcción de infraestructura turística principalmente, contribuyen a los procesos de erosión de las costas (Posada et al., 2008).

El cálculo para la determinación de las áreas erosionadas se realizó en base al mapa elaborado por el IGAC, con información proporcionada por el IDEAM.

c) Clasificación de Fuentes Identificadas

Las fuentes identificadas se clasificaron en fuentes fijas y móviles. A su vez las fuentes fijas se subdividieron en fuentes puntuales y fuentes de área.

Fuentes Fijas

Fuentes de Área:

- Puertos de Carbón (Sociedad Portuaria, Drummod, Prodeco y Ex Vale)
- Canteras de Extracción: (Tritupisvar, La Carolina, Predio El Futuro, Minera Tayrona, Manuel Pertuz, Las Delicias, La Reserva, La Piedra, La Esmeralda, El Porvenir, El Futuro y Calderon, Sarita).
- Relleno Sanitario Palangana

Fuentes Puntuales:

- Fábrica de producción de Aceite C.I. FAMAR S.A.
- Fábrica de producción de Aceite GRADESA S.A.

Fuentes Móviles: Transporte Terrestre, marítimo y aéreo.

d) Clasificación de Principales Fuentes identificadas según Guía EMEP.

Se identificaron las principales categorías de fuentes, agrupándolas de acuerdo a los lineamientos EMEP de la siguiente manera:

Categoría 1: Energía (Quema de Combustible)

- 1.A.3.a ii Aviación Civil
- 1.A.3.d Navegación
- 1.A.4.b Combustión Residencial

Categoría 2: Procesos Industriales (Sin Combustión)

- 2.A.5.a. Canteras y extracción de minerales distintos del carbón.
- 2.A.5.c Almacenamiento, Manejo y Transporte de Productos Minerales

Categoría 3. Utilización de Productos

- 3.D. Producción de Cultivos y Suelos Agrícolas
- 5.A. Disposición de Residuos Sólidos sobre el suelo

e) Selección de Factores de Emisión para Fuentes Antrópicas y Fuentes Naturales

Se seleccionaron los factores de emisión para cada fuente identificada:

- Para las fuentes de origen natural (aerosol marino, erosión y desnudamiento de cerros) se utilizaron factores de emisión por defecto. Para Aerosol Marino se utilizó el factor 6.61×10^{-3} lb/m² año. En el caso de las emisiones relacionadas con la erosión y desnudamiento de cerros se utilizaron como factores de emisión 0.4 kg/ha/hr para PST y 0.2 kg/ha/hr para MP₁₀.

Los factores de emisión genéricos fueron tomados del Manual técnico de estimación de emisiones para minería y procesamiento de minerales no metálicos Versión 2.1 del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Australiano.

-Para las fuentes móviles se utilizaron los factores detallados en la Tabla 4, de acuerdo al tipo de vehículo. Para el cálculo se utilizaron factores genéricos debido a que no se contó con información específica de los vehículos, como clasificación detallada del vehículo, tipo de motor, consumo de combustible, velocidades, modelo del vehículo y demás características que permitieran el uso de factores específicos. En este sentido como se indica en el Apéndice F, seleccionar un factor genérico constituye una de las fuentes de incertidumbre del estudio.

Tabla 4. Factores de Emisión para MP₁₀ por tipo de combustible

Tipo de Combustible Vehículo	Factor de Emisión MP ₁₀ (g/km)
GASOLINA AUTOS LIVIANOS	0.019
GASOLINA CARGA PESADA	0.472
DIESEL AUTOS LIVIANOS	0.062
DIESEL CARGA PESADA	0.494
DIESEL CARGA PESADA SEMI RREMOLQUE	0.072
BUS DIESEL	0.585
MOTOCICLETAS	0.085

Fuente: Puliafito et al., 2015a; Puliafito et al., 2015b; Puliafito et al., 2017a; Puliafito et al., 2017b.

-Factores para emisiones por carga y descarga de material: El cálculo de las emisiones por carga y descarga de contaminantes se realizó a partir del cálculo del factor de emisión acorde con la siguiente ecuación (USEPA, 2008):

$$FE = \frac{0.580}{(M)^{1.2}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

FE = Factor de emisión para carga y descarga de PST

M= Porcentaje del contenido de humedad del material (carbón)

Acorde con los estudios disponibles se tomó como porcentaje de humedad un valor de 10% para el cálculo de carga y descarga (Unidad de Planeación Minero energética, 2005).

-Los factores de emisión para fuentes fijas fueron tomados directamente de la guía EMEP, de acuerdo a las categorías identificadas. La emisión para las categorías seleccionadas se calculó a partir de los factores de emisión y datos de la actividad.

Para el cálculo de las emisiones de origen antrópico asociadas a las fuentes fijas en la zona y acorde a lo establecido en la guía EMEP, se aplicó el cálculo Nivel 1. Para la actividad almacenamiento, manejo y transporte de productos minerales, se aplicó el cálculo Nivel 2.

Las emisiones de las categorías: 1.A.3.d, 1.A.4.b, 2.A.5.a, 2.A.5.c, 3.D y 5.A., fueron estimadas a partir de la siguiente ecuación general:

$$E_i = DA_i * FE_i \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

E_i = Emisión del contaminante (PST/MP₁₀)

DA_i = Dato de Actividad acorde con la categoría detallado en Tabla 5

FE_i = Factor de emisión del contaminante evaluado (PST/MP₁₀) y en el caso del aerosol marino corresponde al factor de emisión para cloruros.

Tabla 5. Datos de Actividad

Categoría EMEP	Actividad	Dato de Actividad (DA _i)
1.A.3.d	Navegación	Masa tipo de combustible vendido en el país.
1.A.4.b	Combustión Residencial	Consumo de Combustible (gas natural) en GJ/año
2.A.5.a	Canteras y extracción de minerales distintos del carbón	Cantidad de material extraído en Mg/año
2.A.5.c	Almacenamiento de Productos Minerales.	Área para almacenamiento en Ton/año
	Manejo de Productos Minerales	Cantidad de Material en operación en Ton/año
3.D	Producción de Cultivos y Suelos Agrícolas	Área sembrada con palma de aceite en hectáreas
5A	Disposición de Residuos Sólidos sobre el suelo	Cantidad de Residuos dispuestos en relleno en Mg/d
N/A	Para Erosión, desnudamiento de cerros:	Área erosionable en hectáreas
N/A	Aerosol Marino	Área alrededor de la costa en m ²

En el caso de las fuentes naturales (erosión y desnudamiento de cerros) el área erosionable se estimó a partir de información de mapas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y de estudios de erosión de la zona realizados por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés (Posada et al., 2008; IGAC, 2011). Para el aerosol marino el área se estimó a partir de mapas y estudios de la zona (Posada et al., 2008).

Por último, el cálculo de las emisiones provenientes de fuentes móviles se realizó a través de la siguiente ecuación, acorde con el estudio realizado por la Unidad de Planeación Minero Energética en la ciudad de Bogotá, Colombia en el año 2003:

$$E_i = DR_v * N^\circ \text{ de Vehículos} * FE_i \text{ (Ecuación 5)}$$

E_i = emisión de contaminante en gramos.

DR_v = distancia recorrida por vehículo (km)

FE_i = Factor de emisión por tipo de vehículo (g/km).

La ecuación 5 se aplicó después de realizar la categorización del sistema vial en la ciudad de Santa Marta.

Posterior a la jerarquización del sistema vial se identificaron las zonas atractoras de vehículos con base a las actividades (Comercio, Educación, Salud, Administración) desarrolladas en la ciudad de Santa Marta, y se consideraron los sectores que atraen el mayor número de viajes de vehículos (Figura 6).

Debido a que no se pudo contar con información exacta de conteo de vehículos por calles, para el estudio sólo se trabajó con la información suministrada por la Unidad de Tránsito y Transporte de Santa Marta, es decir con el total de vehículos por día en la zona de estudio. Acorde con lo anterior para la identificación de las zonas atractoras y basados en el estudio Puliafito et al, 2010, subjetivamente se tomaron en cuenta los siguientes aspectos para realizar la selección de las zonas:

- Zonas dentro de la ciudad de Santa Marta que concentran actividades comerciales como centros comerciales, locales de indumentaria, locales de comidas, locales para compras en general y que por tanto cuentan con mayor afluencia de personas.
- Zonas dentro de la ciudad donde se concentran actividades de educación, para el caso zonas de universidades caracterizadas por la afluencia de estudiantes.

- Zonas en donde se encuentran ubicados los hospitales de mayor complejidad en la ciudad.
- Zonas que por su ubicación geográfica constituyen puntos importantes de circulación y conexión dentro de la ciudad.
- Zonas de avenidas principales y puntos de acceso y salida de la ciudad.

A partir de las zonas atractoras identificadas se calculó la distancia de cada punto de la grilla a cada zona atractora, aplicando el Teorema de Pitágoras. Seguidamente se otorgó un peso distinto a cada una de las zonas identificadas (Tabla 6).

Tabla 6. Peso asignado a Zonas Atractoras

Zona Atractora	Identificación	Peso Asignado
ZA1	“Y” de Ciénaga	0.3
ZA2	Universidad del Magdalena	0.1
ZA3	Carrera Quinta y Calle 22	0.1
ZA4	Rotonda la Lucha	0.1
ZA5	Avenida del Ferrocarril y Av. del Libertador	0.1
ZA6	Carrera Primera	0.08
ZA7	Avenida del Libertador	0.07
ZA8	Central de transportes	0.06
ZA9	Avenida del Ferrocarril y Avenida del Río	0.05
ZA10	Carrera Primera-El Rodadero	0.04
	Total	1

Posteriormente se calculó la distancia total a zonas atractoras multiplicando la distancia calculada con el teorema de Pitágoras, por el peso asignado. Finalmente se sumaron todas las distancias para cada celda y se calculó un nuevo factor de distribución de las emisiones, utilizando el inverso de la distancia para obtener las emisiones vehiculares finales.

Es conveniente aclarar que el número de vehículos es inversamente proporcional a la distancia a las zonas atractoras, por lo tanto el número de vehículos de todas las categorías se distribuyó en el sistema grillado, de forma proporcional a la cercanía de las zonas atractoras usando una distancia normalizada

f) Georeferenciación de las emisiones

Por último, se georeferenciaron las emisiones en el área de estudio teniendo en cuenta sus características.

Las fuentes fijas y móviles identificadas se representaron geográficamente con el software QGIS 2.18, se generó una grilla con una resolución 500m x 500m para cada celda. Para la representación geográfica de las emisiones calculadas de acuerdo a las ecuaciones presentadas en el punto e) del inventario de emisiones, se dividieron los datos en fuentes puntuales y fuentes de área. Para las fuentes de área se utilizaron coeficientes de proporcionalidad, se organizó la información obtenida y se trabajaron los datos procesados y la información correspondiente a las fuentes puntuales en el Software QGIS.

Para la representación de las emisiones de fuentes móviles se utilizaron los datos registrados de número de vehículos y tipo de combustible, se realizó la distribución por la red de carreteras de la zona de estudio y se calcularon las emisiones conforme a la ecuación 5 presentada en la sección e) del inventario de emisiones y se sumaron las contribuciones de cada celda de la grilla elaborada.

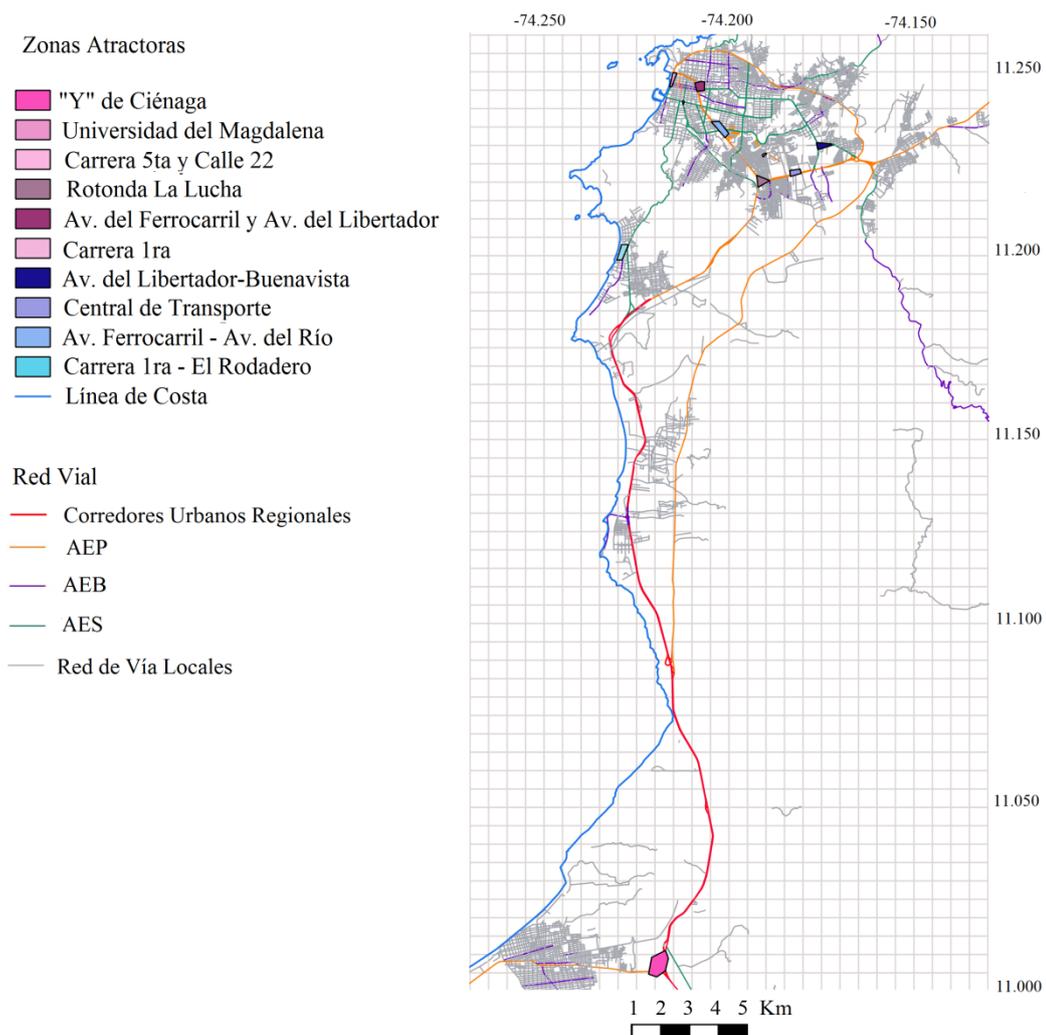


Figura 6. Zonas atractoras de vehículos.

5.4 Evaluación meteorológica relevante

Se recolectó información meteorológica de la zona para alimentación del modelo a utilizar y el análisis de resultados. Se descargaron los registros horarios de la estación Ernesto Cortissoz (Tabla 7) cercana a la zona de estudio. Los datos descargados corresponden a los registros de velocidad y dirección del viento, cobertura de nubes, punto de rocío, temperatura, altura.

Tabla 7. Estación Ernesto Cortissoz

Código	Nombre	Dpto.	Municipio	Coordenada	Elevación (m)
800280	ERNESTO CORTISSOZ	Atlántico	Barranquilla	10.890 N 74.781 O	29.2

Se trabajaron los datos de dirección y velocidad del viento y se elaboró la rosa de vientos para los años 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013. El programa utilizado para la elaboración de la rosa de vientos fue WRPLOT View. De los 14 años de mediciones se tomó como muestra para la elaboración de las rosas de vientos del presente capítulo los datos de solo cinco años, debido a que los registros de dirección y velocidad del viento de los años tomados como muestra no presentaron variaciones significativas indicando con ello un comportamiento predominante en el tiempo de estos dos parámetros.

Por último, se organizó la información suministrada y se preparó para su utilización en el modelado de contaminantes.

5.5 Modelado de dispersión de contaminantes

Para este trabajo se utilizó el modelo AERMOD, que es uno de los modelos recomendados por la Environmental Protection Agency de Estados Unidos (EPA USA) para evaluaciones ambientales de proyectos. Existen diversas publicaciones con el objetivo de comparar el modelo AERMOD con bases de datos reales y con otros modelos, obteniéndose, con pocas excepciones, rendimientos superiores en comparación con otros modelos testeados (Perry et al., 2005).

Es un modelo de dispersión atmosférica en estado estacionario. Se basa en la caracterización de la capa límite atmosférica (CLA), utilizando los datos medidos de variables meteorológicas convencionales. En la capa límite estable el modelo asume que la distribución horizontal y vertical de la pluma es gaussiana, mientras que para condiciones convectivas, si bien asume que la distribución horizontal también es gaussiana, describe la distribución vertical con una función de densidad de probabilidad bi-gaussiana (EPA, 2004).

El modelo consta de un programa principal AERMOD y dos preprocesadores: a) de datos meteorológicos (AERMET) y b) de información del terreno (AERMAP). El principal objetivo de AERMET es calcular los parámetros de la CLA para su uso por AERMOD, la interfaz meteorológica interna a AERMOD utiliza estos parámetros para generar perfiles de las variables meteorológicas necesarias (EPA, 2004). La Figura 7 muestra el flujo y el procesamiento de la información en AERMOD.

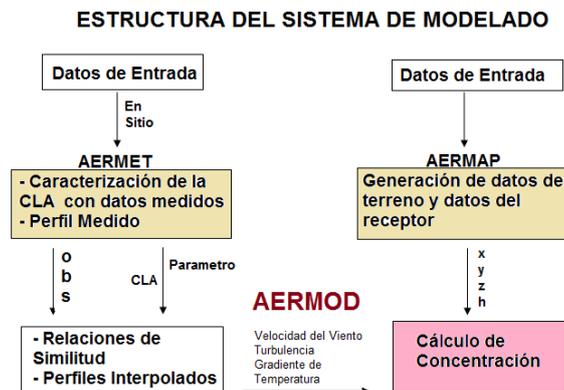


Figura 7. Estructura procesamiento de la información en AERMOD. Fuente: EPA, 2004.

Información de Entrada

Datos de la Fuente: tipos de fuentes, ubicación, altura y diámetro de las chimeneas, temperatura y velocidad de salida de los gases de emisión, dimensiones de las fuentes areales y volumétricas, y elevación del terreno en donde están localizadas las fuentes (EPA, 2004).

Datos meteorológicos: el preprocesador meteorológico AERMET requiere como datos de entrada las características de la superficie, incluyendo el parámetro de rugosidad de la superficie, la relación de Bowen y el albedo, así como datos horarios de velocidad del viento, dirección del viento, cobertura de nubes, punto de rocío, temperatura, un radiosondeo representativo de la estación aerológica, latitud, longitud, hora local y velocidad del viento umbral.

AERMET requiere datos de superficie y de altura. Dado que el programa no permite datos de superficie en un formato libre, se desarrolló un código en Matlab para convertir datos de estación meteorológica en un formato SAMSON compatible con AERMET.

Por otro lado, AERMET estima la altura de capa de mezcla en base a la teoría de Similaridad de Monin-Obukhov utilizada para determinar su dependencia de los procesos convectivos y mecánicos. Un inconveniente para dicha estimación es la necesidad de datos en altura, para realizar el cálculo; estos datos no suelen medirse habitualmente en el sitio de estudio. En tal

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

sentido, se utilizaron los radiosondeos más cercanos al área de estudio y con la disponibilidad necesaria para el cálculo, que corresponden a la estación del Aeropuerto El Dorado (código 80222), ubicado en 4.70° N, 74.13° O.

Otra forma de obtener los datos de altura de capa de mezcla podría haber sido por medio de la implementación de un modelo de mesoescala en 3D, como WRF (Weather Research and Forecasting), sin embargo este procedimiento escapa a los alcances de esta tesis.

Asimismo, era esperable que AERMOD proporcionara una estimación razonable de las concentraciones a sotavento de las fuentes, dado que las mismas son por lo general muy sensibles a las velocidades y direcciones de viento en superficie. Asimismo, la influencia del coeficiente de dispersión vertical, dependiente de la estructura vertical de la atmósfera, y parece no ser tan relevante en la estimación de impactos en microescala, como se muestra en Hamby, 2002. De igual manera es oportuno mencionar que se probaron otros algoritmos para la determinación de alturas de capa de mezcla con base a datos de superficie, tales como las ecuaciones mostradas en Turtos Carbonell y otros (2010) y las referencias ahí incluidas, obteniéndose alturas de capa de mezcla similares a las estimadas por AERMET y no logrando cambios significativos en las concentraciones de contaminantes finales.

La información utilizada para alimentar el modelo debe contener un grado de representatividad, para asegurar con ello la confianza en los resultados de los parámetros tomados con el área en donde están situadas las fuentes (EPA, 2004).

Información de Salida

El archivo de salida incluye información de entrada, tablas resúmenes de las concentraciones más altas por receptor para tiempos especificados de promedio, tablas resúmenes con las concentraciones máximas y los valores concurrentes por receptor para cada hora o día procesado. En adición a lo anterior es posible generar archivos de salida opcionales como por ejemplo listados de: las ocurrencias de excedencias de valores umbrales especificados, los resultados concurrentes en cada receptor para cada una de las horas modeladas, los valores de diseño que puedan ser importados en gráficos para dibujar contornos, los resultados mayores que un valor umbral, las concentraciones por rangos (EPA, 2004).

AERMOD permite modelar la dispersión de material particulado, gases y vapores a una distancia de hasta 50 km a partir de las fuentes de emisión como chimeneas, fuentes de línea, fuentes de

área y de volumen, así como antorchas o quemadores elevados. Las fuentes de emisión pueden estar localizadas en zonas rurales o urbanas y los receptores en terrenos planos o complejos. El modelo AERMOD utiliza datos meteorológicos horarios procesados secuencialmente para calcular las concentraciones de contaminantes en aire para distintos períodos de tiempo que van desde una hora hasta un año (EPA, 2004).

En el caso de Colombia, ha sido utilizado para simular el efecto de contaminantes como PST y MP_{10} asociados a distintos procesos productivos, como así también para determinar la incidencia de los sectores industriales en las concentraciones de material particulado en cada una de las zonas estudiadas (Uribe y Suarez, 2009; Pinto y Mendez, 2015; Arrieta, 2016).

Características del modelado

Información de Entrada: los datos de altura y diámetro de las chimeneas, temperatura y velocidad de salida de los gases de emisión, fueron proporcionados por las empresas incluidas en el estudio caracterizadas como fuentes puntuales, es el caso de C.I. FAMAR S.A. y GRADESA S.A.

En el caso de la información de entrada correspondiente a las dimensiones de las fuentes de área, elevación del terreno de las fuentes identificadas y elevación del terreno de las estaciones de CORPAMAG, se utilizó como herramienta el programa Google Earth y los datos obtenidos se utilizaron para la modelación.

El modelado se realizó con AERMOD, se generó la topografía para la alimentación del modelo con datos de World Elevation Data Japan Aerospace Exploration Agency (AJAX), los cuales fueron cargados en AERMAP. Por su parte los datos de temperatura, cobertura de nubes, punto de rocío, velocidad y dirección del viento de la estación Ernesto Cortissoz Tabla 7, fueron ingresados en AERMET. La estación Ernesto Cortissoz está localizada en la ciudad de Barranquilla a unos 110km de distancia de Santa Marta, ciudad en donde se desarrolló el estudio.

Posteriormente se incorporó la información resultante de los módulos AERMAP y AERMET en el archivo base para correr el modelo. En el archivo base se incluyeron además las fuentes de emisión puntuales, de área y vehiculares con la emisión expresada en g/s para las fuentes puntuales y en $g/s.m^2$ para las fuentes de área, y la altura de emisión de 3 m para fuentes fijas y 2 m para fuentes móviles para un período de 24 horas. Los datos de emisiones se tomaron del inventario de emisiones anuales; para las fuentes puntuales se tomó una producción anual

homogénea en el tiempo y se llevaron los datos de kg/año a g/s, escalando el tiempo, sin contemplar picos de producción durante el año o día específico. Del mismo modo se llevaron las emisiones correspondientes de fuentes de área incluyendo las vehiculares a $g/s.m^2$, sin contemplar picos en las actividades.

Se definió una malla de receptores, compuesta por una grilla con una resolución de 500x500m para cada celda, y se incluyeron 7 receptores discretos para el modelado de PST y 6 receptores discretos para el modelado de MP_{10} expuestos a las fuentes de emisión.

5.6 Validación del modelo de dispersión

Para la validación del modelo se realizó la comparación de los datos registrados por las estaciones de CORPAMAG, y las concentraciones resultantes del modelo. Se utilizó un análisis de frecuencias que permitió observar la distribución de ambas variables tanto de PST como de MP_{10} y verificar las similitudes en el comportamiento de lo medido y lo simulado con AERMOD.

Adicionalmente y a pesar de que no se incluyeron variaciones temporales en el inventario de emisiones se verificaron los siguientes indicadores estadísticos: Sesgo fraccional (FB), Sesgo Media Geométrica (MG), Error cuadrático medio normalizado (NMSE), Varianza geométrica (VG), Coeficiente de Correlación (R) y la fracción de predicciones dentro de un factor de dos observaciones (FAC2).

$$FB = \frac{\overline{C_o - C_p}}{0.5 (C_o + C_p)} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$MG = \exp(\overline{\ln C_o - \ln C_p}) \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$NMSE = \frac{(\overline{C_o - C_p})^2}{\overline{C_o} \overline{C_p}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$VG = \exp \left[\overline{(\ln C_o - \ln C_p)^2} \right] \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$R = \frac{(\overline{C_o - C_o})(\overline{C_p - C_p})}{\sigma_{C_p} \sigma_{C_o}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

FAC2=Fracción de datos que satisfacen

$$0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2.0 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

C_p: Datos Modelados

C_o: Datos medidos

\bar{C} Barra arriba: Promedio sobre los datos

σ_C : Desviación estándar sobre los datos

5.7 Proyecciones, análisis de datos y salidas del modelo.

En esta etapa se organizaron y clasificaron los resultados obtenidos en las diferentes fases del presente proyecto, se elaboraron tablas comparativas y gráficos para facilitar la visualización de tendencias, patrones identificados y comportamiento temporal del material particulado. También se presentaron las salidas del modelo utilizado, seguidamente se analizaron los resultados con base a estudios y publicaciones de la zona y se compararon con los límites normativos aplicables para concentraciones de material particulado en la zona costera del departamento del Magdalena. Finalmente, si bien no se estimó la incertidumbre, sí se realizó un análisis de las posibles fuentes que pueden contribuir a la misma, el análisis ayudó a la evaluación de las salidas generadas y fue utilizado como referencia para la elaboración de las conclusiones finales del proyecto. El análisis es presentado en el Apéndice F.

6. RESULTADOS

6.1 CONCENTRACIONES PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y MATERIAL PARTICULADO MP₁₀

6.1.1. Concentraciones Diarias de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tabla 8. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) máximas y mínimas diarias de PST en las estaciones de monitoreo de CORPAMAG en el periodo 2000–2014.

Estación	Conc. Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fecha	Conc. Min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fecha
Aeropuerto	525.0	29/01/2006	11.6	06/09/2001
	369.3	23/02/2007	16.1	24/06/2000
	302.9	14/02/2007	16.7	25/07/2003
	294.7	26/02/2007	17.4	23/09/2010
Alcatraces	208.0	22/03/2007	1.4	14/05/2006
	186.2	05/04/2002	2.1	13/06/2006
	173.8	18/02/2012	12.2	12/10/2001
	169.1	03/02/2012	13.4	29/05/2004
Batallón	244.6	01/04/2000	8.9	01/02/2000
	219.4	19/07/2006	12.2	10/11/2004
	216.8	15/04/2001	17.4	29/10/2002
	214.7	30/01/2004	18.6	21/11/2005
Centro Ejecutivo	473.1	22/09/2005	18.7	14/10/2014
	430.4	28/09/2005	28.9	30/11/2013
	308.1	07/10/2005	30.3	21/10/2011
	270.0	12/08/2006	30.7	21/11/2005
CAJAMAG	339.2	02/10/2006	18.3	04/11/2014
	319.2	17/12/2007	20.6	26/09/2014
	261.8	01/03/2007	21.0	17/10/2014
	249.9	13/03/2007	22.3	16/11/2014
Don Jaca	176.8	14/03/2013	14.7	23/10/2004
	171.0	09/02/2012	15.6	28/08/2008
	168.4	01/03/2007	15.7	02/11/2008
	163.4	17/06/2001	16.3	04/12/2003
INVEMAR	598.7	20/10/2002	18.0	08/08/2005
	452.7	14/05/2002	18.3	08/12/2008
	393.8	09/03/2002	23.6	10/11/2004
	381.3	31/07/2002	23.6	03/09/2008
	372.0	05/02/2001	26.9	02/11/2008
	347.7	21/01/2004	27.4	21/10/2007
	345.9	22/02/2000	28.4	25/11/2010
	343.1	07/10/2000	28.6	01/08/2008
	341.1	23/10/2002	28.8	30/07/2000
	339.5	14/09/2002	28.9	04/12/2003
	338.9	28/12/2003	30.0	11/09/2010
	337.3	02/02/2001	30.3	26/09/2002
	325.3	09/01/2004	30.8	05/08/2005
	304.0	03/01/2004	31.6	24/10/2007
	302.5	19/07/2003	32.1	29/11/2012
	302.4	31/12/2003	32.2	29/05/2004
290.6	05/01/2000	32.2	11/11/2007	

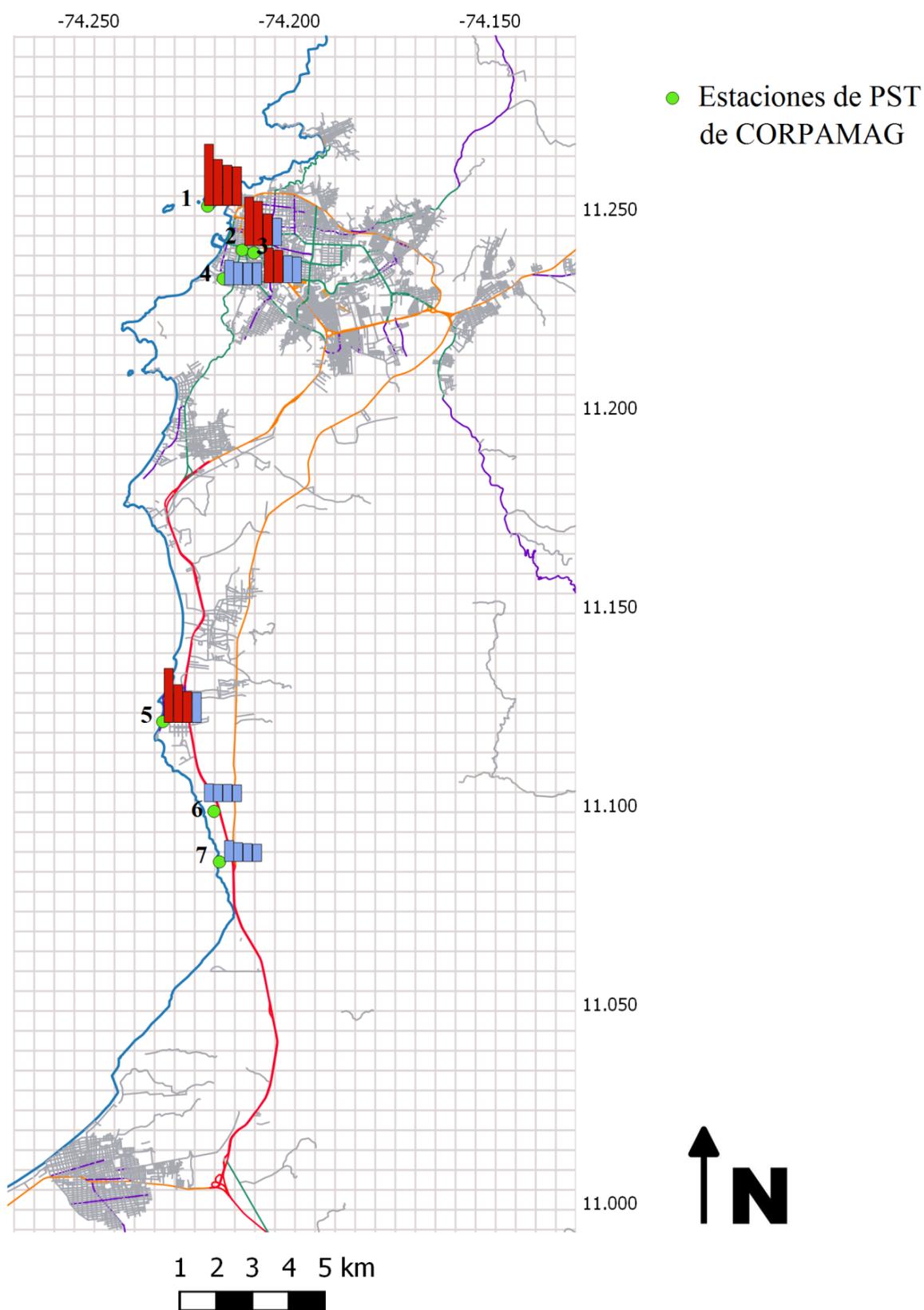


Figura 8. Concentraciones Máximas diarias de PST en las estaciones de monitoreo de CORPAMAG, período 2000–2014. Estaciones: 1 (INVEMAR), 2 (Centro Ejecutivo), 3 (Cajamag), 4 (Batallón), 5 (Aeropuerto), 6 (Don Jaca) y 7 (Alcatraces).

La Tabla 8 muestra que las estaciones de PST con mayores concentraciones diarias en el período 2000–2014, son Aeropuerto, Centro Ejecutivo, CAJAMAG e INVEMAR. La estación que presentó mayor número de concentraciones diarias altas en comparación con las estaciones restantes corresponde a la estación de INVEMAR. Las concentraciones máximas diarias de las estaciones Alcatraces, Batallón y Don Jaca, en comparación con las estaciones restantes presentaron valores más bajos.

En el caso de la estación INVEMAR, se presentaron mayor número de registros en la Tabla 8, para mostrar la totalidad de las fechas en donde se obtuvieron concentraciones altas en comparación con las estaciones restantes.

Los años en donde se presentaron los mayores registros de concentraciones diarias, corresponden a los años 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 y 2007. Las menores concentraciones se presentaron en las estaciones de Alcatraces y Batallón. Los registros de las condiciones meteorológicas de la Tabla 1 en el Apéndice D muestran que los días con mayores registros de concentración de material particulado coinciden en su mayoría con los períodos de calmas y menores velocidades del viento.

Los valores marcados en color rojo en la Tabla 8 corresponden a los registros superiores a $296.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (norma para 24 horas PST). Para la comparación con la norma de 24 horas de Colombia para PST y MP_{10} , debe estimarse el promedio para conjuntos de 24 datos horarios de un mismo día. Este procedimiento solo podrá seguirse en caso de contar con equipos automáticos en donde se tengan por lo menos, reportes horarios de concentración (Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Si bien los registros de la red de calidad del aire de CORPAMAG no son suficientes para realizar la comparación con la norma para 24 horas dado que solo se cuenta con un registro diario y no con un conjunto de 24 datos horarios de un mismo día; se aclara que el valor de $296.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se utilizó solo como guía para analizar las concentraciones diarias de PST de las estaciones de CORPAMAG y no como límite de incumplimiento de la norma.

El detalle por año de las concentraciones diarias de PST de las estaciones evaluadas se puede verificar en el Apéndice A.

6.1.2. Concentraciones Diarias de MP₁₀ (µg/m³)**Tabla 9.** Concentraciones (µg/m³) Máximas y Mínimas diarias de MP₁₀ en las estaciones de CORPAMAG, período 2008–2014.

Estación	Conc. Max (µg/m ³)	Fecha	Conc. Min. (µg/m ³)	Fecha
Alcatraces	73.4	30/07/2013	3.0	05/07/2008
	68.7	01/02/2010	7.0	16/08/2008
	66.8	13/02/2010	7.1	02/11/2008
	62.3	15/02/2012	8.2	16/01/2009
Carbogranules	90.3	16/01/2008	4.2	02/11/2008
	82.6	12/06/2013	7.0	01/01/2009
	79.6	19/01/2012	7.5	26/11/2008
	79.0	11/04/2010	7.8	23/11/2008
Club Santa Marta	90.6	07/06/2014	7.9	25/01/2008
	82.4	10/01/2012	9.0	07/12/2010
	81.9	14/04/2014	10.9	11/06/2011
	80.8	06/08/2014	11.2	15/05/2011
Costa Verde	93.6	22/02/2014	9.7	14/09/2010
	89.8	06/02/2012	9.9	05/10/2010
	89.1	25/07/2014	10	23/10/2010
	86.8	07/06/2014	10.2	02/11/2008
Don Jaca	99.2	11/08/2013	6.1	03/09/2008
	89.0	07/06/2014	7.4	20/12/2008
	87.5	06/03/2014	7.9	02/11/2008
	86.5	03/05/2012	9.5	13/11/2010
Zuana	144.5	06/03/2014	7.2	15/11/2009
	96.7	10/02/2014	7.9	13/08/2008
	95.5	14/09/2014	11.6	03/11/2009
	92.0	15/05/2014	11.9	24/04/2011

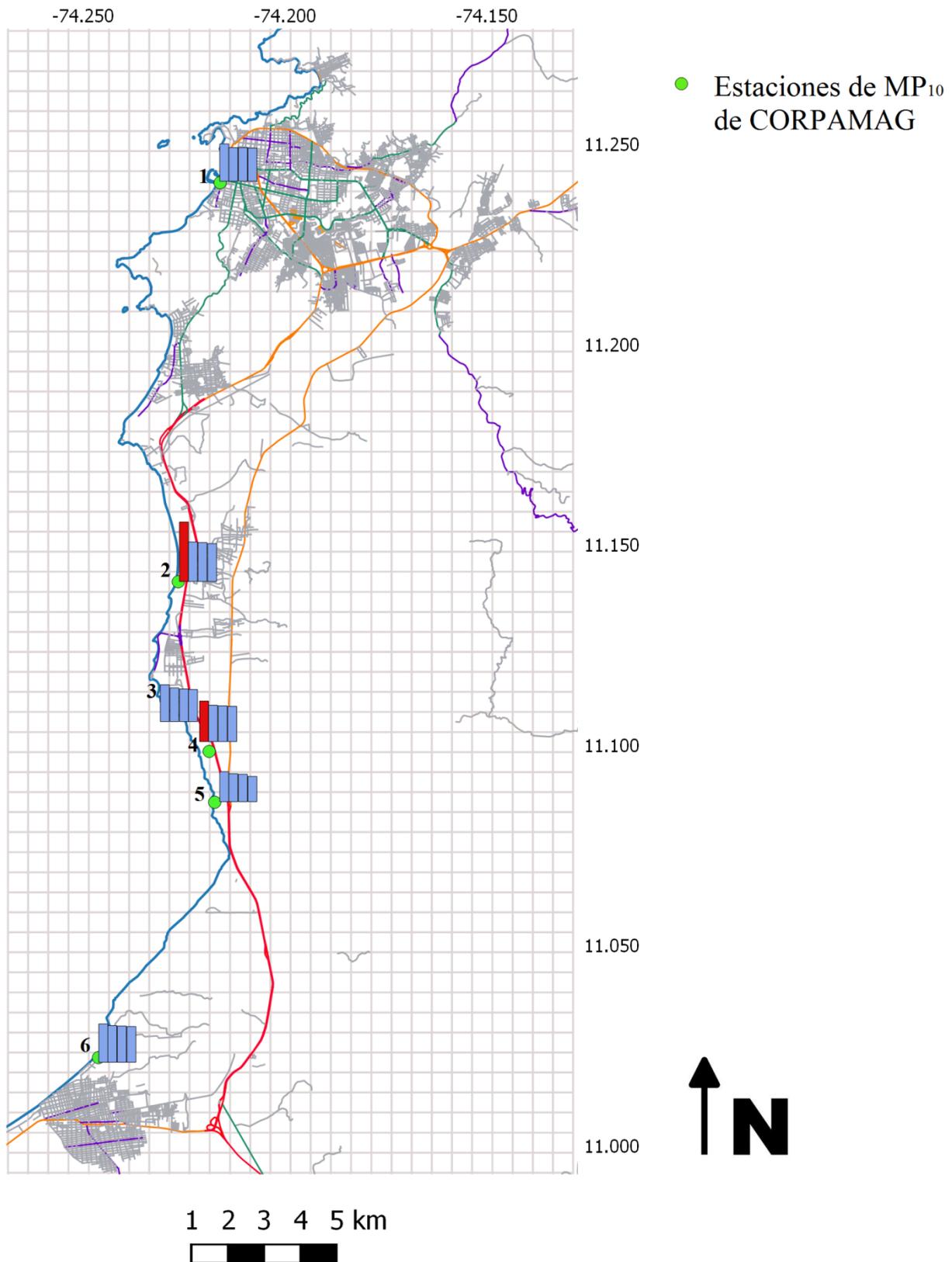


Figura 9. Concentraciones diarias máximas diarias de MP_{10} en las estaciones de CORPAMAG, período 2008–2014. Mapa en coordenadas geográficas. Estaciones: 1 (Club Santa Marta), 2 (Zuana), 3 (Carbogranes), 4 (Don Jaca), 5 (Alcatraces) y 6 (Costa Verde).

La Tabla 9 muestra que las máximas concentraciones diarias de MP₁₀ ocurrieron el día 6 de marzo de 2014 en la estación Zuana y el 11 de agosto de 2013 en la estación Don Jaca con concentraciones de 144.5 µg/m³ y 99.2 µg/m³ respectivamente. Las estaciones restantes reportaron concentraciones máximas de 96.7 µg/m³, 95.5 µg/m³ y 93.6 µg/m³. Las concentraciones más bajas se obtuvieron los días 02 de noviembre y 05 de julio de 2008 con valores de 4.2 µg/m³ y 3 µg/m³ en las estaciones Carbogranales y Alcatraces.

Los registros de las condiciones meteorológicas de la Tabla 2 en el Apéndice D muestran que los días con mayores registros de concentración de material particulado coinciden en algunos casos con los períodos de calmas y menores velocidades del viento.

Los valores marcados en color rojo en la Tabla 9 corresponden a los registros superiores a 98.7 µg/m³ (norma para 24 horas MP₁₀).

De la misma manera y acorde con lo explicado sobre la norma diaria para MP₁₀ en el apartado anterior, se aclara que si bien los registros de la red de calidad del aire no son suficientes para realizar la comparación con la norma para 24 horas para MP₁₀ dado que solo se cuenta con un registro diario; el valor de 98.7 µg/m³ se utilizó sólo como valor de referencia para analizar las concentraciones diarias de MP₁₀ de las estaciones de CORPAMAG y no como límite de incumplimiento a la norma.

6.1.3. Medias Geométricas mensuales de las concentraciones diarias de PST

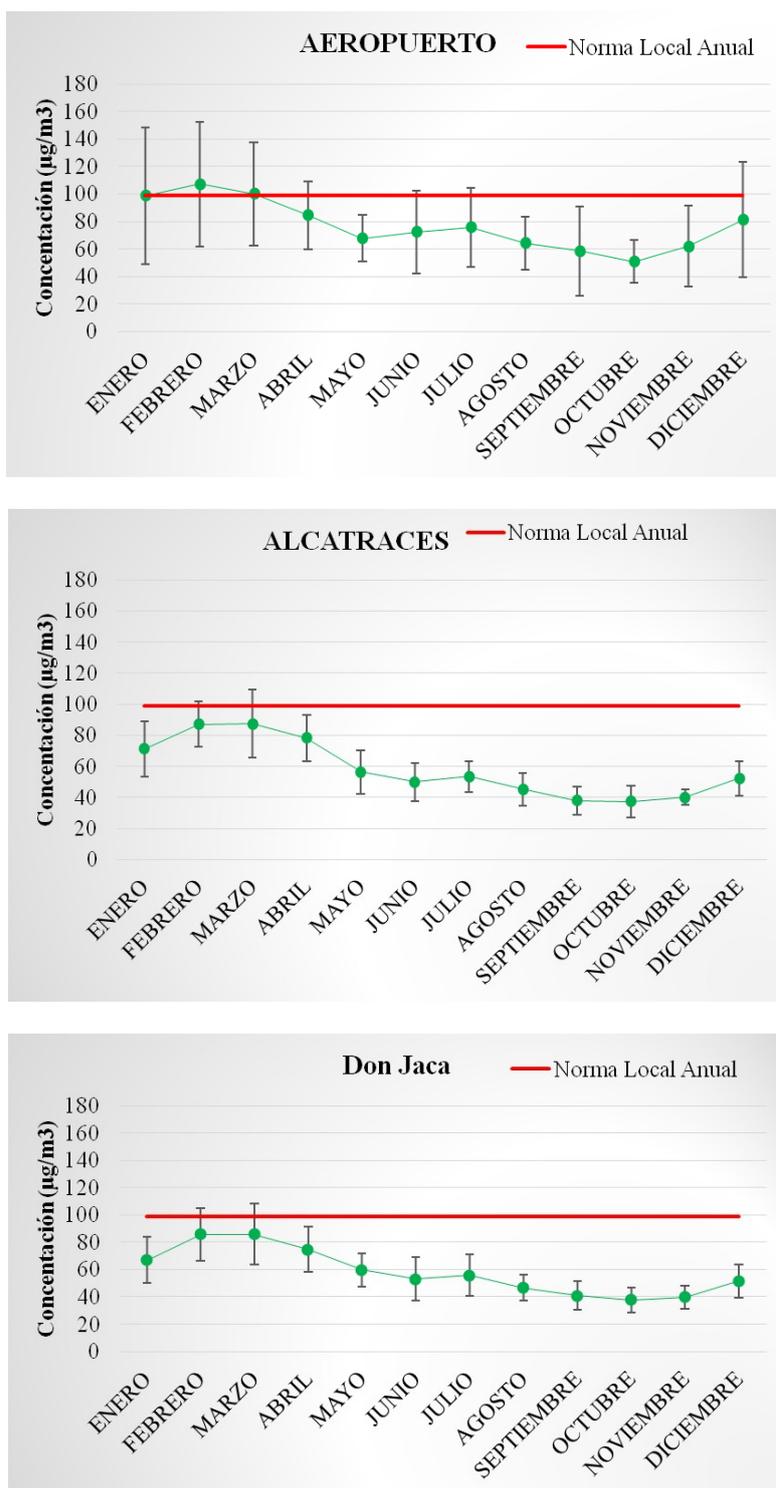


Figura 10. Promedios de las Medias Geométricas mensuales de las concentraciones diarias de PST para el período 2000–2014 (valores en puntos verdes, desvío estándar en barras negras) en comparación con la norma anual colombiana (línea roja), para las estaciones Aeropuerto, Alcatraces y Don Jaca.

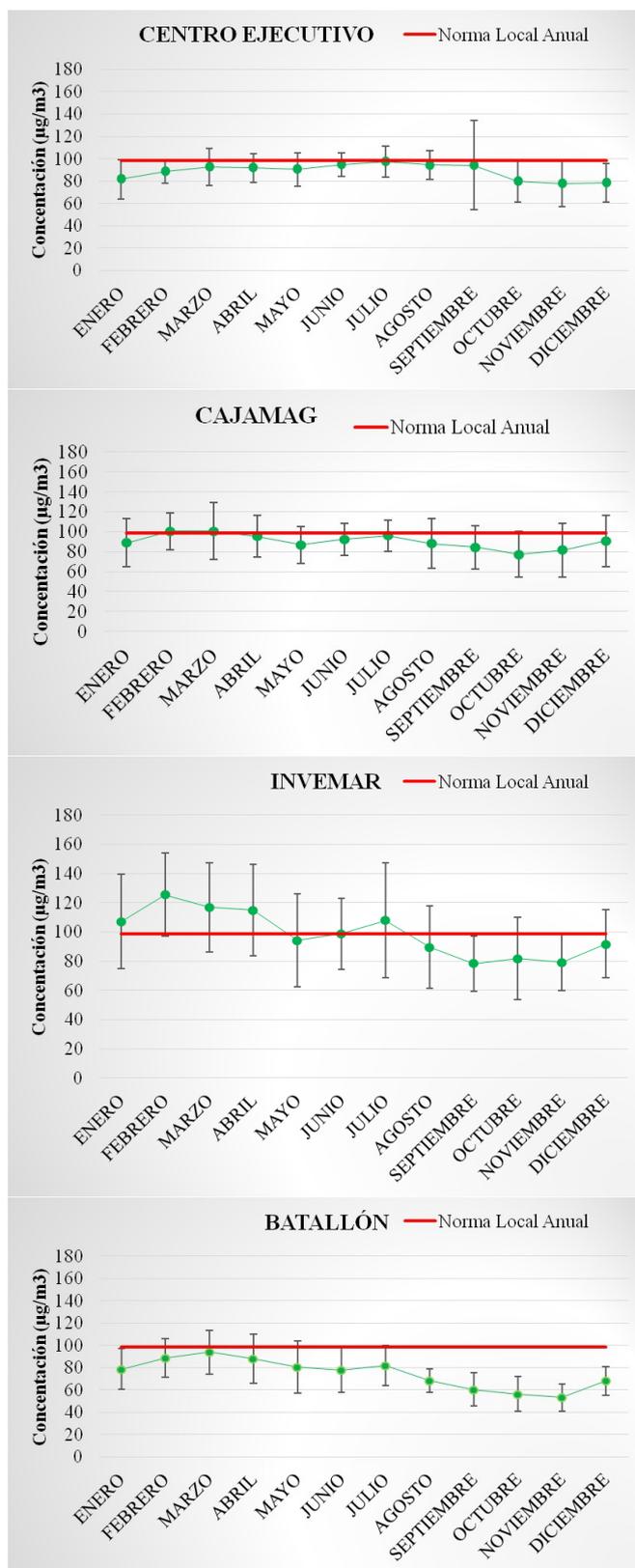


Figura 11. Promedios de las Medias Geométricas mensuales de las concentraciones diarias de PST para el período 2000–2014 (valores en puntos verdes, desvío estándar en barras negras) en comparación con la norma anual colombiana (línea roja), para las estaciones Centro Ejecutivo, CAJAMAG, INVEMAR y Batallón.

Debido a que no se cuenta con datos horarios de medición de partículas de PST, no es posible realizar la comparación con la norma para 24 horas. Por lo tanto, la comparación de las concentraciones medidas por las estaciones de CORPAMAG, se realizó solo con el límite anual

de la norma, a partir de la comparación de las medias geométricas de las concentraciones diarias como se indica en la metodología. En adición se presentaron gráficos de las medias geométricas de PST calculadas por mes de las concentraciones diarias (Figura 1, 2, 3 y 4 del Apéndice B) y gráficos del promedio para todo el período de las medias geométricas calculadas por mes, de las concentraciones diarias (Figura 10 y Figura 11).

La Figura 10 y Figura 11, muestra que las estaciones con promedios de medias geométricas mensuales de concentraciones diarias más altas durante los años 2000-2014 son las estaciones de Aeropuerto, CAJAMAG e INVEMAR con registros superiores al límite de referencia. En el caso de la estación Aeropuerto y CAJAMAG los registros más altos se presentaron en los meses de febrero y marzo. Para la estación INVEMAR los valores más altos se presentaron en los meses de enero, febrero, marzo, abril y julio. Adicionalmente se observó mayor dispersión de los datos en las estaciones de Aeropuerto e INVEMAR.

Por otro lado el análisis de los resultados (Figura 1, 2, 3 y 4 del Apéndice B) muestra que durante los catorce años estudiados, la estación que obtuvo mayor número de medias geométricas mensuales de concentraciones diarias que excedieron los $98.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ corresponden a INVEMAR con un total de 74 mediciones, seguida por la estación de CAJAMAG con 46 mediciones.

Para las estaciones restantes se obtuvo menor número de mediciones con excedencias del límite, en el caso de la estación Aeropuerto se obtuvo un total de 33 medias mediciones, 26 para la estación Batallón y 45 para Centro Ejecutivo.

Las estaciones con menor número de mediciones que excedieron los $98.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ corresponden a la estación de Alcatraces con 10 mediciones y Don Jaca con 9 mediciones.

Por último, las medias geométricas mensuales de concentraciones diarias más altas (Figura 1, 2, 3 y 4 del Apéndice B) se obtuvieron en la estación Aeropuerto, Centro Ejecutivo e INVEMAR con valores de $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en febrero de 2007, $217 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en septiembre de 2005 y $196 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en julio de 2002 respectivamente. Las medias geométricas mensuales de concentraciones diarias más bajas se presentaron en las estaciones Alcatraces y Don Jaca en el mes de septiembre de 2010 con valores de $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Exceptuando la estación Centro Ejecutivo, los resultados evidencian que todas las figuras muestran una tendencia similar en la evolución de las concentraciones medidas a lo largo del año.

6.1.4. Medias Geométrica Anuales de las concentraciones diarias de PST

La Figura 12 y Figura 13 muestra que los años en los que las concentraciones superaron el límite anual para PST de $98.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ norma local, (calculado a partir de la ecuación detallada en el anexo 1 de la Resolución 601 de 2006), fueron los años 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 y 2014. Las estaciones en donde se superó el límite de la norma anual fueron las estaciones de Aeropuerto, CAJAMAG, Centro Ejecutivo e INVEMAR.

En las estaciones de Aeropuerto e INVEMAR se observaron niveles críticos de partículas suspendidas totales, especialmente en la estación de Aeropuerto en el año 2007 con una media geométrica anual de $142 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para los años siguientes las medias geométricas de la mayoría de las estaciones mostraron descensos apreciables, visibles principalmente en la estación de Aeropuerto. No obstante la Figura 12 muestra que la estación de INVEMAR nuevamente superó en el año 2014 el límite anual, registrando mediciones de $101 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

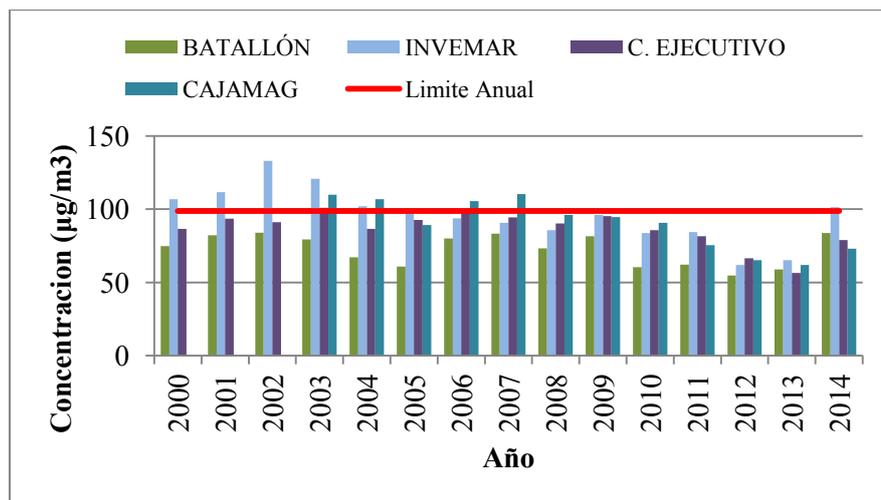


Figura 12. Media Geométrica Anual de las concentraciones diarias de PST durante el período 2000–2014

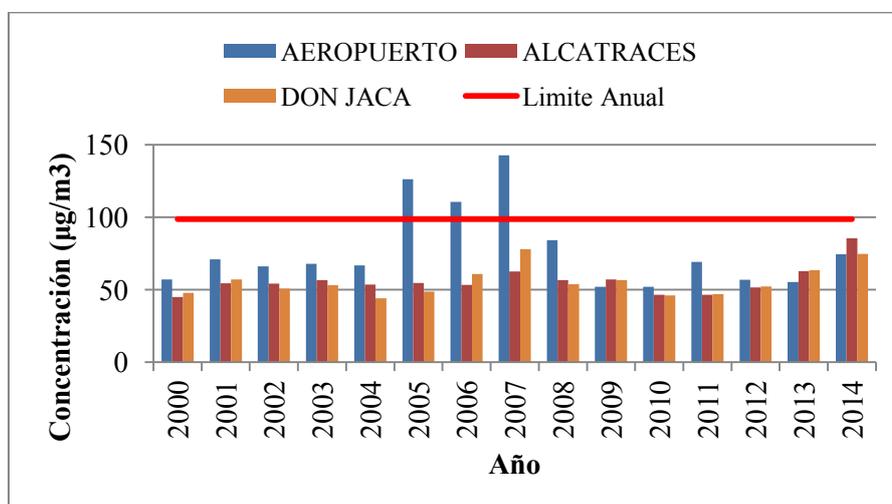


Figura 13. Media Geométrica Anual de las concentraciones diarias de PST durante el período 2000–2014

6.1.5. Medias Aritméticas mensuales de las concentraciones diarias de MP₁₀

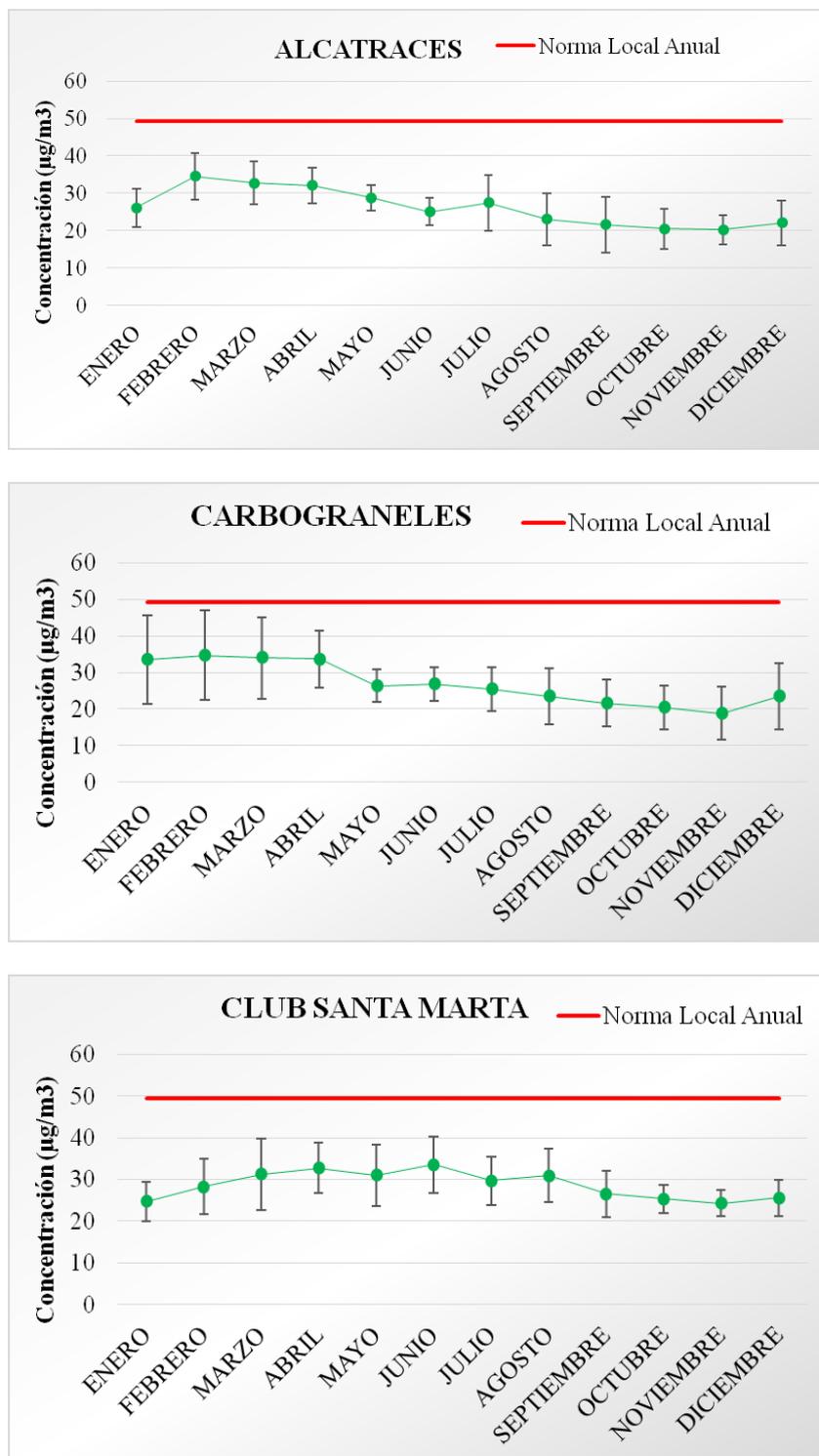


Figura 14. Promedio de las medias aritméticas mensuales de las concentraciones diarias de MP₁₀ para el período 2008–2014 (valores en puntos verdes, desvío estándar en barras negras) en comparación con la norma anual colombiana (línea roja), para las estaciones Alcatraces, CarboGraneles y Club Santa Marta.



Figura 15. Promedio de las medias aritméticas mensuales de las concentraciones diarias de MP₁₀ para el período 2008–2014 (valores en puntos verdes, desvío estándar en barras negras) en comparación con la norma anual colombiana (línea roja), para las estaciones Costa Verde, Don Jaca y Zuana.

Para el caso de las concentraciones de MP₁₀, en concordancia con lo indicado para PST, la comparación se realizó con el límite anual de la norma para MP₁₀, pero a partir de las medias aritméticas de las concentraciones diarias. También se presentaron gráficos de las medias

aritméticas de MP_{10} calculadas por mes de las concentraciones diarias (Figura 5 y 6 del Apéndice B) y gráficos del promedio para todo el período de las medias aritméticas calculadas por mes, de las concentraciones diarias (Figura 14 y Figura 15).

La Figura 14 y Figura 15, muestra que la estación con promedios de medias aritméticas mensuales de concentraciones diarias más altos durante los años 2008–2014 es Costa Verde con registros superiores al límite de referencia en el mes de febrero. Las estaciones restantes presentaron valores por debajo del límite de referencia.

En los siete años analizados se observa además que los meses en donde las estaciones presentaron valores más altos para los promedios calculados fueron los meses de febrero y marzo. Se observó mayor dispersión de los datos en las estaciones de Costa Verde, Carbogranes y Don Jaca.

Por otro lado los resultados (Figura 5 y 6 del Apéndice B) muestran con mayor detalle que las estaciones en donde se obtuvieron mayor número de medias aritméticas mensuales de concentraciones diarias que excedieron los $49.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (nivel de referencia) en el período comprendido entre los años 2008-2014 corresponden a Costa Verde con 9 mediciones, seguidas por Don Jaca con 7 mediciones. La Figura 5 y 6 del Apéndice B muestran además que los años en los que hubo mayor número de excedencias en las medias aritméticas de concentraciones diarias fueron los años 2010 con 3 mediciones y 2014 con 12 mediciones.

Exceptuando la estación Club Santa Marta, los resultados evidencian que todas las figuras muestran una tendencia similar en la evolución de las concentraciones medidas a lo largo del período estudiado.

6.1.6. Medias Aritméticas Anuales de las concentraciones diarias de MP_{10}

La Figura 16 a diferencia del resultado observado con las medias aritméticas mensuales calculadas para todas las estaciones durante los años 2008 a 2014, muestra que solo hay excedencias en el límite de la norma anual ($49.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en la estación Costa Verde en el año 2014. Por otro lado, si bien no fue superado el límite de referencia, la estación Don Jaca reportó valores relevantes.

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

Observando los registros de las estaciones restantes (Figura 17) se evidencia que en el año 2013 y 2014 se presentaron los mayores registros, aunque es importante aclarar que se encuentran dentro del límite anual de la norma. Cabe aclarar que la ausencia de datos en algunas estaciones obedeció en algunos casos a fallas en el fluido eléctrico y en otros casos a daños en la estructura de soporte del equipo de medición.

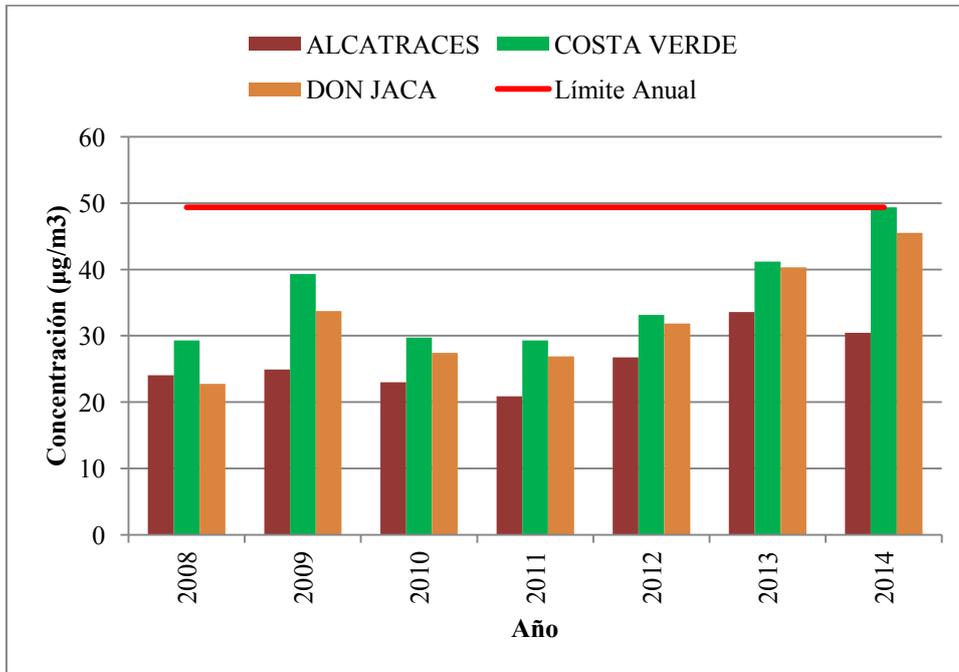


Figura 16. Media aritmética Anual de las concentraciones diarias de MP₁₀ durante el período 2008–2014

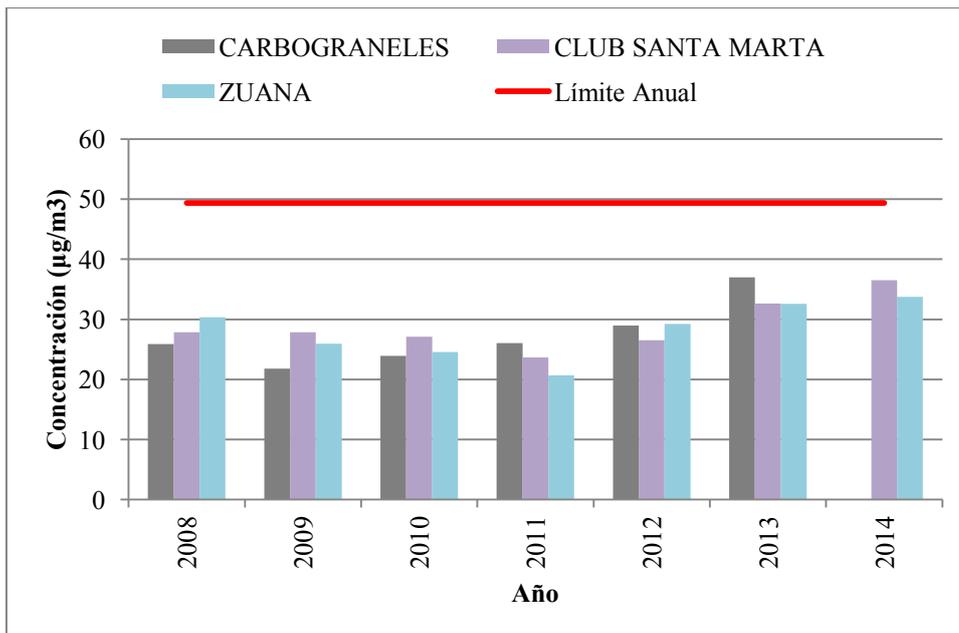


Figura 17. Media aritmética Anual de las concentraciones diarias de MP₁₀ durante el período 2008–2014

Resumen de Resultados Concentraciones Partículas Suspendidas Totales y Material Particulado MP₁₀

Medias mensuales de las Concentraciones diarias de PST y MP₁₀

Para PST las estaciones con promedios de medias geométricas mensuales de las concentraciones diarias más altas durante los años 2000–2014 son las estaciones de Aeropuerto, CAJAMAG e INVEMAR. Para MP₁₀ la estación con promedio de medias aritméticas mensuales de concentraciones diarias más alto durante los años 2008–2014 es Costa Verde.

Las estaciones de PST que obtuvieron mayor número de medias geométricas mensuales de concentraciones diarias que excedieron los 98.7 µg/m³ corresponden a INVEMAR con un total de 74 mediciones, seguida por la estación de CAJAMAG con 46. Para MP₁₀ las estaciones con mayor número de medias aritméticas mensuales de concentraciones diarias que excedieron los 49.3 µg/m³ (norma local) corresponden a Costa Verde y Don Jaca.

Para PST los meses en donde las estaciones presentaron mayor número de determinaciones con excedencias fueron febrero, marzo y abril. Para MP₁₀ el mayor número de mediciones con excedencias sobre el nivel de referencia se presentó en febrero y marzo.

Para PST los años en los que hubo mayor número de excedencias fueron 2007 y 2006, y para MP₁₀ los años 2010 y 2014.

Concentraciones Anuales de PST y MP₁₀

El límite anual de PST se superó en los años 2000 a 2007 y en el año 2014 en las estaciones Aeropuerto, CAJAMAG, Centro Ejecutivo e INVEMAR. Para MP₁₀ sólo hubo excedencia en el límite de la norma anual en la estación Costa Verde en el año 2014.

6.2 CLÚSTERES

6.2.1 Clústeres Concentración estaciones PST

Tabla 10. Formación de Clústeres para estaciones de PST, período 2000-2014.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Aeropuerto												
Alcatraces												
Batallón												
Centro Ejecutivo												
CAJAMAG												
Don Jaca												
INVEMAR												

Clúster 1	
Clúster 2	
Clúster 3	
Clúster 4	
Clúster 5	

La Tabla 10 muestra la formación de clústeres en cada una de las estaciones de PST. Se observa la formación de tres clústeres para la estación Aeropuerto, Alcatraces, Batallón y Don Jaca, la formación de cuatro clústeres para la estación Centro Ejecutivo y CAJAMAG, y la formación de cinco clústeres para la estación INVEMAR.

La Tabla 10 muestra además que los meses con el mismo color en cada estación son homogéneos entre sí, es decir que pertenecen al mismo clúster. Por otro lado aquellos meses pertenecientes a otros grupos (identificados con distinto color en la tabla) son heterogéneos si se comparan con el primer clúster identificado.

Para la mayoría de las estaciones la Tabla 10 muestra la formación de tres y cuatro períodos temporalmente diferenciables indicando similitudes en relación a la concentración de PST acorde con la época del año. Por otra parte también pueden identificarse períodos de cambio o transición entre un período y otro, como es el caso del mes de diciembre en la estación Aeropuerto.

6.2.2 Clústeres Concentración estaciones MP₁₀

Tabla 11. Formación de clústeres estaciones de MP₁₀, período 2009-2013

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Alcatraces	Clúster 1	Clúster 3	Clúster 3	Clúster 3	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 2				
Carbogranales	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 2							
Club Santa Marta	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 3	Clúster 4	Clúster 5	Clúster 4	Clúster 5	Clúster 5	Clúster 2	Clúster 2	Clúster 2	Clúster 2
Costa Verde	Clúster 1	Clúster 2	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 3	Clúster 4	Clúster 4	Clúster 3	Clúster 3	Clúster 3	Clúster 4
Don Jaca	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 2							
Zuana	Clúster 1	Clúster 2	Clúster 2	Clúster 2	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 1	Clúster 3	Clúster 3	Clúster 3	Clúster 3	Clúster 1

Clúster 1	Clúster 1
Clúster 2	Clúster 2
Clúster 3	Clúster 3
Clúster 4	Clúster 4
Clúster 5	Clúster 5

La Tabla 11 muestra la formación de clústeres en cada una de las estaciones de MP₁₀. Se observa la formación de cinco clústeres para la estación Club Santa Marta, la formación de cuatro clústeres para la estación Costa verde, tres clústeres para la estación Alcatraces y Zuana., dos clústeres para las estaciones Carbogranales y Don Jaca.

Los meses con el mismo color forman parte del mismo clúster por tanto son homogéneos entre sí, es el caso de los meses de septiembre, octubre y noviembre de todas las estaciones estudiadas. Las diferencias en los colores muestran la formación de distintos grupos entre los meses evaluados lo que implica que son heterogéneos si se comparan entre sí.

Para la mayoría de las estaciones la tabla muestra la formación de dos y tres períodos temporalmente diferenciables. Sólo en dos estaciones se identificaron más de tres períodos, es el caso de las estaciones Costa Verde y Club Santa Marta con cuatro y cinco clústeres respectivamente.

Las figuras del Apéndice C, muestran en mayor detalle la distribución y comportamiento de cada clúster en cada una de las estaciones de PST y MP₁₀ durante el período estudiado para cada una.

Resumen de Resultados Clústeres

Los clústeres mostraron comportamientos similares entre las estaciones ubicadas en la zona urbana; y la formación de grupos homogéneos similares para las estaciones ubicadas en la zona alejada del centro urbano, lo que sugiere similitud entre las estaciones con ubicaciones más cercanas.

Los clústeres reportaron la formación de grupos homogéneos acorde con la época del año en cada estación, es el caso del clúster formado por los meses de enero, febrero, marzo y abril que se presenta en las estaciones de Aeropuerto, Don Jaca y CAJAMAG.

De la misma forma el clúster formado por los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre se presenta en los dendogramas de las estaciones Aeropuerto, Alcatraces y Batallón, lo que sugiere una influencia de la época del año y de sus condiciones meteorológicas.

6.3 INVENTARIO DE EMISIONES

6.3.1 Identificación de Fuentes

Tabla 12. Fuentes Identificadas y Clasificación por Categorías

Fuentes	Actividad	Contaminante	Proceso*	Categoría			
Fuentes Naturales	Erosion, desnudamiento de Cerros	PST PM10	Erosión y desnudamiento de cerros por acción de agentes como viento, agua y actividades humanas (Construcción de obras).	N/A			
	Generación de Aerosol Marino	Cloruros	Incidencia del viento sobre la superficie del océano, que contribuye a la formación de olas y con ello de pequeñas burbujas que descargan en el aire partículas líquidas.				
SOCIEDAD PORTUARIA (PUERTO)	Almacenamiento Carbón	PST PM10	Traslado de camiones con Carbón en el puerto, carga/descarga de carbón de camiones en patios de almacenamiento, apilado del carbón, acción del viento en las áreas de almacenamiento de carbón, combustión de los vehículos utilizados para el transporte, carga de carbón en buques para exportación.	2A5c			
	Manejo de Carbon	PST PM10		2A5c			
	Carga de Camiones	PST		N/A			
	Descarga de Camiones	PST		2A5c			
PRODECO (PUERTO)	Almacenamiento Carbón	PST PM10		Traslado de camiones con Carbón en el puerto, carga/descarga de carbón de camiones en patios de almacenamiento, apilado del carbón, acción del viento en las áreas de almacenamiento de carbón, combustión de los vehículos utilizados para el transporte, carga de carbón en buques para exportación.	2A5c		
	Manejo de Carbon	PST PM10			2A5c		
	Carga de Camiones	PST			N/A		
Descarga de Camiones	PST	2A5c					
DRUMMOND (PUERTO)	Almacenamiento Carbón	PST PM10			Traslado de camiones con Carbón en el puerto, carga/descarga de carbón de camiones en patios de almacenamiento, apilado del carbón, acción del viento en las áreas de almacenamiento de carbón, combustión de los vehículos utilizados para el transporte, carga de carbón en buques para exportación.	2A5c	
	Manejo de Carbon	PST PM10				2A5c	
	Carga de Camiones	PST				N/A	
	Descarga de Camiones	PST				2A5c	
EX VALE (PUERTO)	Almacenamiento Carbón	PST PM10				Traslado de camiones con Carbón en el puerto, carga/descarga de carbón de camiones en patios de almacenamiento, apilado del carbón, acción del viento en las áreas de almacenamiento de carbón, combustión de los vehículos utilizados para el transporte, carga de carbón en buques para exportación.	2A5c
	Manejo de Carbon	PST PM10					2A5c
	Carga de Camiones	PST					N/A
	Descarga de Camiones	PST					2A5c
Cantera Tritupisvar	Extracción de materiales	PST PM10	Perforación de la roca, explosiones controladas para la extraacción de material, carga y descarga de escombros, carga y descarga del material, transporte por carretera por caminos sin pavimentar, trituración del mineral.				2A5a
Cantera La Carolina	Extracción de materiales	PST PM10					2A5a
Cantera Predio El Futuro	Extracción de materiales	PST PM10					2A5a
Cantera Minera Tayrona	Extracción de materiales	PST PM10					2A5a
Cantera Manuel Pertuz	Extracción de materiales	PST PM10		2A5a			
Cantera Las Delicias	Extracción de materiales	PST PM10		2A5a			
Cantera La Reserva	Extracción de materiales	PST PM10		2A5a			
Cantera La Piedra	Extracción de materiales	PST PM10		2A5a			
Cantera La Esmeralda	Extracción de materiales	PST PM10		2A5a			
Cantera El Porvenir	Extracción de materiales	PST PM10		2A5a			
Cantera El Futuro	Extracción de materiales	PST PM10		2A5a			
Cantera Calderon	Extracción de materiales	PST PM10		2A5a			
Cantera Sarita	Extracción de materiales	PST PM10		2A5a			
GRADESA S.A.	Producción de grasas y aceites vegetales comestibles	PM10		Cultivo de palma de aceite, ploteo mecánico, poda, cosecha, postcosecha, recolección, carga en camiones de fruto de palma de aceite, descarga del fruto en tolva de almacenamiento, emisiones mínimas de MP por combustión de calderas a gas natural.	3D		
CI FAMAR S.A.		PM10			3D		
Relleno Sanitario	Disposición Final en Relleno Sanitario Santa	PST PM10		Emisiones de la carga de desechos en pilas de almacenamiento, erosión eólica de las pilas y las áreas del terreno.	5A		
Aviación	Aviación Civil: Comercial y General	PST PM10	Emisiones muy bajas en proceso de combustión durante despeque, aterrizaje y actividades realizadas a alturas superiores a 914 m.	1A3aii			
Combustion Residencial	Combustible Gaseoso (gas Natural)	PST PM10	Combustion del gas natural	1A4b			
Buques	Navegación Nacional	PST PM10	Combustión del combustible en el motor. El MP es derivado del hollín, y está asociado principalmente a la tecnología del motor, y también a partir de la especiación del combustible.	1A3d			
	Navegación Internacional	PST PM10					

*Proceso mediante el cual se incorpora material particulado a la atmósfera.

En la Tabla 12, se muestran las fuentes identificadas y la clasificación correspondiente de acuerdo a la guía EMEP. Se identificaron fuentes antrópicas asociadas a siete categorías de la guía EMEP para los contaminantes PST y MP₁₀ objeto de estudio.

Con la revisión de información secundaria se identificaron como Fuentes Naturales el Aerosol Marino, Erosión y Desnudamiento de cerros, y como fuentes antrópicas Fijas Puertos de carbón (Sociedad Portuaria, Prodeco, Drummond y Ex Vale), Canteras para la extracción de materiales (Tritupisvar, La Carolina, Predio el Futuro, Minera Tayrona, Manuel Pertuz, Las Delicias, La Reserva, La Piedra, Cantera La Esmeralda, El Porvenir, El Futuro, Calderón y Sarita), Relleno Sanitario, Fábricas de aceite vegetal (Gradesa S.A. y CI FAMAR S.A) y el tráfico vehicular.

En la Tabla 3 del apéndice E, se detallan los datos relevantes para el cálculo de emisiones del inventario, datos como fuente, tipo de fuente, factor de emisión, datos de actividad y año base. Para fuentes móviles solo se incluyó una muestra del cálculo dada la cantidad de datos trabajados (Tabla 4 del apéndice E).

Emisiones estimadas por actividad

Para PST se obtuvieron mayores valores para las emisiones de origen antrópico, mientras que para MP₁₀ se presentaron mayores valores para las emisiones asociadas a fuentes naturales erosión y desnudamiento de cerros (Tabla 13 y Tabla 14).

Tabla 13. Emisión estimada por Actividad y contaminante para fuentes naturales identificadas.

Actividad	Emisión PST (Kg/año)	Emisión MP ₁₀ (kg/año)
Erosión, desnudamiento de cerros	11.068.610	5.534.305

Tabla 14. Emisión Calculada por Actividad y contaminante para fuentes antrópicas identificadas.

Actividad	Emisión PST (kg/año)	Emisión MP ₁₀ (kg/año)
Almacenamiento Carbón	275.062	137.531
Manejo de Carbón	660.000	330.000
Carga y Descarga de Carbón	11.234.461	
Extracción de Materiales	1.701	834
Disposición Final de Residuos Sólidos	81.456	38.529
Aviación	0	0
Combustión Residencial	2.819	2.819
Navegación Nacional	100.558	100.558
Navegación Internacional	25.733	25.733
Fábrica de Aceite Vegetal Comestible		7.800

Todas las actividades identificadas relacionadas con fuentes antrópicas mostraron valores mayores para el contaminante PST y menores registros para MP₁₀. La actividad carga y descarga de carbón obtuvo el mayor valor para emisiones de PST. Para MP₁₀ la actividad con mayores registros corresponde a manejo de carbón, mientras que la actividad extracción de materiales obtuvo el menor valor para ambos contaminantes.

La Figura 18, Figura 19 y Figura 20 muestran con mayor detalle el porcentaje y la influencia de cada actividad sobre las emisiones calculadas para cada fuente. La Figura 18 muestra que el 66% de las emisiones de PST asociadas a fuentes naturales provienen de eventos como la erosión y el desnudamiento de los cerros. De igual manera muestra que un 33% aproximadamente corresponde a emisiones de MP₁₀ también asociadas a la erosión y desnudamiento de los cerros.

En relación a las actividades relacionadas con fuentes antrópicas se evidencian (Figura 19 y Figura 20) mayores valores de emisión para las actividades de carga, descarga, manejo y almacenamiento de carbón, y menores porcentajes para extracción de materiales y combustión residencial.

Comparando las emisiones de PST y MP₁₀, se observa que después de las actividades de carga y descarga que obtuvieron mayor porcentaje para las emisiones de PST, las actividades siguientes manejo y almacenamiento de carbón tiene un efecto significativo en la distribución de los porcentajes de emisiones tanto de PST como de MP₁₀. La Figura 20 también mostró que actividades como la fabricación de aceite vegetal, aunque contribuyen al total de emisiones de MP₁₀, realizan un aporte bajo en contraste con las fuentes restantes.

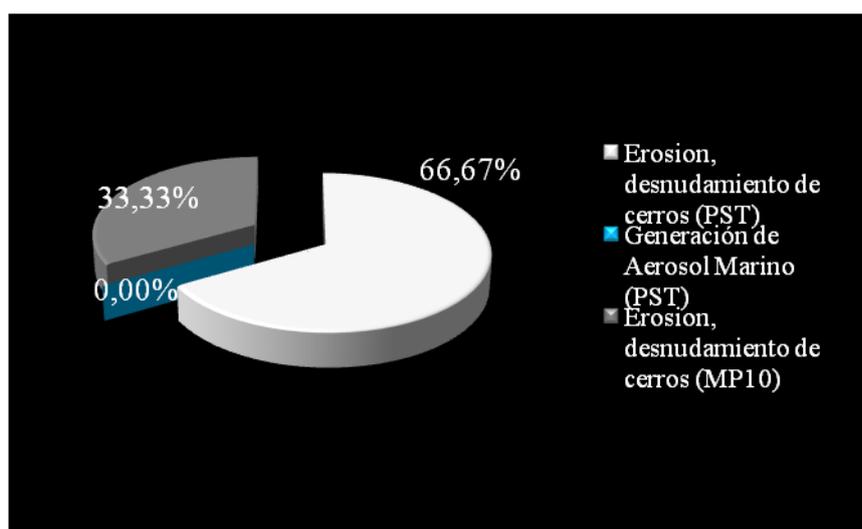


Figura 18. Emisión de PST y MP₁₀ (Kg/año) por actividades de origen Natural

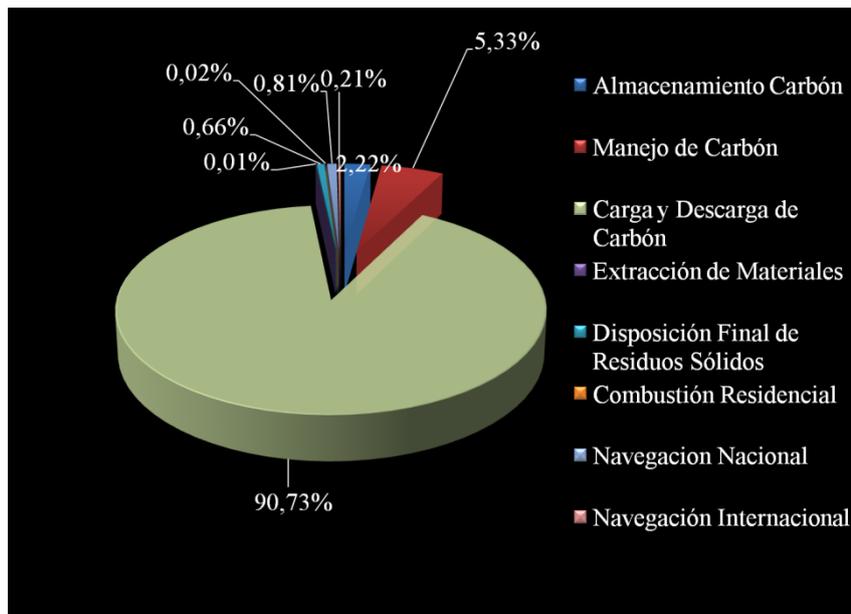


Figura 19. Emisión de PST (Kg/año) por actividades de origen Antrópico

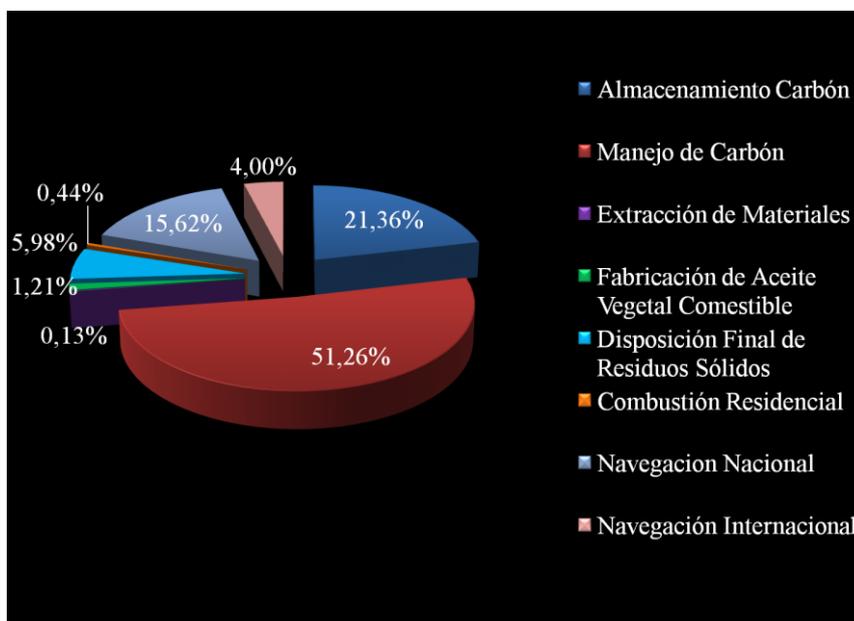


Figura 20. Emisión de MP₁₀ (Kg/año) por actividades de origen Antrópico

6.3.2 Representación de emisiones en área de Estudio

La representación se realizó en base a los resultados de la clasificación de las fuentes fijas en fuentes puntuales y de área y a la información disponible para realizar la representación de las emisiones. Las fuentes representadas en la Figura 21 hacen referencia a las fuentes puntuales GRADESA S.A. y CI FAMAR S.A. y a las fuentes de área Sociedad Portuaria, Prodeco, Drummond, Ex Vale, Canteras para la extracción de materiales (Tritupisvar, La Carolina, Predio el Futuro, Minera Tayrona, Manuel Pertuz, Las Delicias, La Reserva, La Piedra, Cantera La Esmeralda, El Porvenir, El Futuro, Calderón y Sarita) y Relleno Sanitario.

Las fuentes de área de la Figura 21 se encuentran distribuidas a lo largo de la zona de estudio, algunas se encuentran ubicadas hacia el norte, otras en la parte central y una pequeña parte se encuentran hacia el sur de la zona estudiada. Las dos fuentes puntuales identificadas se encuentran ubicadas hacia el sur de la zona objeto de estudio.

De igual forma como resultado de la categorización de la red vial en la Figura 21 se encuentran diferenciadas por colores las siguientes categorías: Corredores Urbanos Regionales de carga y pasajeros, Sistema Arterial de Enlace Primario (AEP), Sistema Arterial de Enlace Básico (AEB), Sistema Arterial de Enlace Secundario (AES) y Red de Vías Locales.

Convenciones Figura 21

Red Vial	● Fuentes Puntuales	■ Puerto Río Córdoba (Ex-Vale)
— Corredores Urbanos Regionales	■ Puerto Sociedad Portuaria	■ Puerto Prodeco
— AEP	■ Puerto Drummond	■ Relleno Sanitario
— AEB	■ Aeropuerto	■ Canteras
— AES	— Línea de Costa	
— Red de Vía Locales		

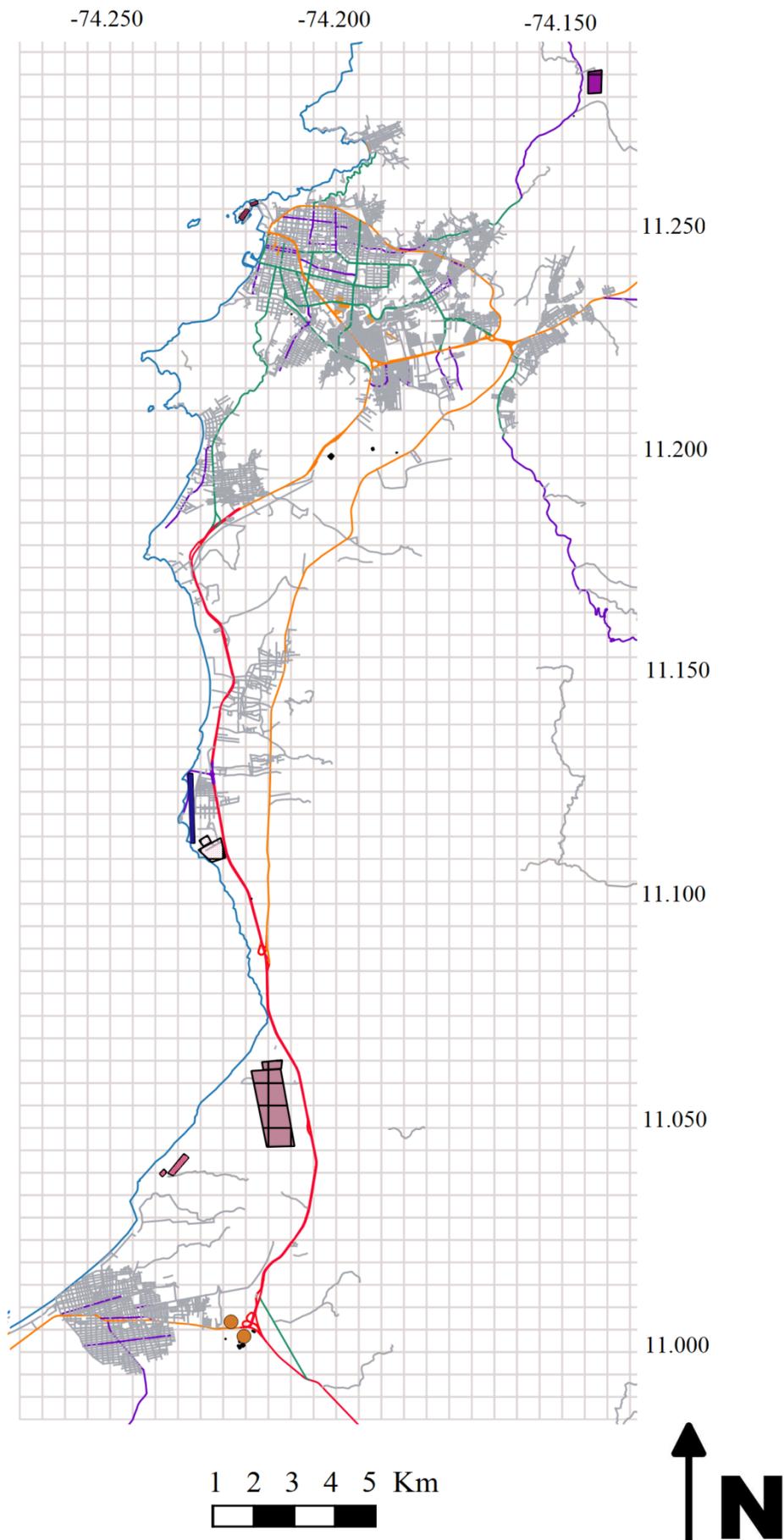


Figura 21. Fuentes de área y Puntuales de la zona Costera del Departamento del Magdalena. Coordenadas Geográficas.

6.3.3 Emisiones PST y MP₁₀ para fuentes puntuales y de área

Las mayores emisiones de PST se presentaron en los puertos de carbón seguidas por las emisiones obtenidas para el relleno sanitario. De igual manera la Figura 22 mostró que el mayor valor de emisión de PST se obtuvo hacia el sur de la ciudad en el puerto Drummond con algunas contribuciones en menor escala de las canteras de extracción de materiales identificadas, cuyas emisiones son pequeñas en comparación con las representadas para las fuentes restantes.

Por su parte, la Figura 23 muestra la distribución de las emisiones de PST de origen natural. Si bien realizan un aporte a las emisiones totales de PST, su contribución es menor en comparación con los registros reportados para las actividades antrópicas.

En relación a las emisiones de MP₁₀ para cada una de las fuentes de área y puntuales identificadas, la Figura 24 muestra que las mayores emisiones de MP₁₀ se concentran en los puertos de carbón seguidas de las emisiones estimadas para el Relleno Sanitario ubicado al norte de la zona estudiada, y una contribución inferior de parte de las canteras de extracción de materiales, comportamiento similar al reportado por las concentraciones de PST.

Comparando los resultados de ambos contaminantes PST y MP₁₀ es claro que los valores de emisión más altos se obtuvieron para PST. Las comunas con valores de emisión más altos de PST y MP₁₀ son las comunas 3 y 8. El relleno Sanitario si bien obtuvo un valor importante se encuentra alejado del perímetro urbano.

6.3.4 Emisiones MP₁₀ para fuentes móviles y Zonas atractoras

La distribución de vehículos en la red de carreteras de la zona estudiada mostró mayores valores de emisión de MP₁₀ hacia el norte de la zona en donde se encuentran ubicadas la mayoría de las comunas de la zona estudiada, de la misma manera se observaron valores considerables sobre las vías en dirección al sur.

Las comunas sobre las que se observa influencia de las emisiones de MP₁₀ como resultado de las emisiones vehiculares son las comunas 1, 2, 4, 7 y 8. Estas comunas se encuentran sobre vías clasificadas como Sistema Arterial de Enlace Primario (AEP), Sistema Arterial de Enlace Secundario (AES) y Corredores Urbanos Regionales de carga y pasajeros. Para las jerarquías restantes las emisiones presentaron menores valores entre 1–4 kg/año.

Zonas Atractoras

Las zonas identificadas en orden descendente con respecto a la cantidad de vehículos son las siguientes:

-“Y” de Ciénaga: Punto de conexión entre la ciudad de Santa Marta y el municipio de Ciénaga. Tiene circulación importante de vehículos provenientes de otros municipios del departamento del Magdalena.

-Universidad del Magdalena: Zona caracterizada por la afluencia de estudiantes, docentes, y personal administrativo que desempeña labores dentro del plantel.

-Carrera Quinta y Calle 22: Zona Comercial y Administrativa de alto impacto en la ciudad. En la intersección de estas calles se encuentra ubicado un semáforo.

-Rotonda la Lucha: Es un punto de conexión importante de la ciudad de Santa Marta, conecta el municipio de Ciénaga con la ciudad de Santa Marta.

-Avenida del Ferrocarril y Av. Del Libertador: Punto de conexión importante de la ciudad, se seleccionó debido a la afluencia de vehículos con destino hacia el Mercado Público de la ciudad.

-Carrera Primera: Es una zona administrativa (Oficinas Instituciones Públicas), Comercial y turística.

-Avenida del Libertador: Es un punto de conexión importante de la ciudad. Se ubica uno de los tres centros comerciales de la ciudad (CC Buenavista).

-Central de transportes: Punto de ingreso de vehículos provenientes de otras ciudades del país, llegada de vehículos particulares, taxis, motos, entre otros vehículos para recoger pasajeros y conducirlos a destino final dentro de la ciudad.

-Avenida del Ferrocarril y Avenida del Río: Zona importante de restaurantes, se encuentra uno de los tres centros comerciales de la ciudad de Santa Marta (C.C. Ocean Mall), adicionalmente se localiza el único Hospital de la ciudad y es un punto de conexión importante para la movilidad en la ciudad. Hay tres semáforos en la intersección.

-Carrera Primera-El Rodadero: punto que se caracteriza por la afluencia de turistas y por tanto mayor número de vehículos, especialmente en temporada alta.

La representación de las zonas atractoras con QGIS (Figura 25), mostró una redistribución de las emisiones calculadas inicialmente para las fuentes móviles, mostrando mayores registros sobre las zonas identificadas como atractoras.

Para el caso se observaron puntos con mayores emisiones, especialmente en las zonas atractoras identificadas como Avenida del Ferrocarril y Av. del Libertador, Carrera Primera, y la “Y” de

Ciénaga, las zonas atractoras restantes mostraron menor peso por lo tanto son bajas en contraste con las zonas de mayor peso.

Las comunas con mayores emisiones de MP₁₀ acorde con la distribución de las zonas atractoras en el área de estudio, son la comuna 7 y 8. Es notable la mayor influencia de las emisiones sobre la zona atractora “Y” de Ciénaga con registros de emisiones de MP₁₀ entre 10-14kg.

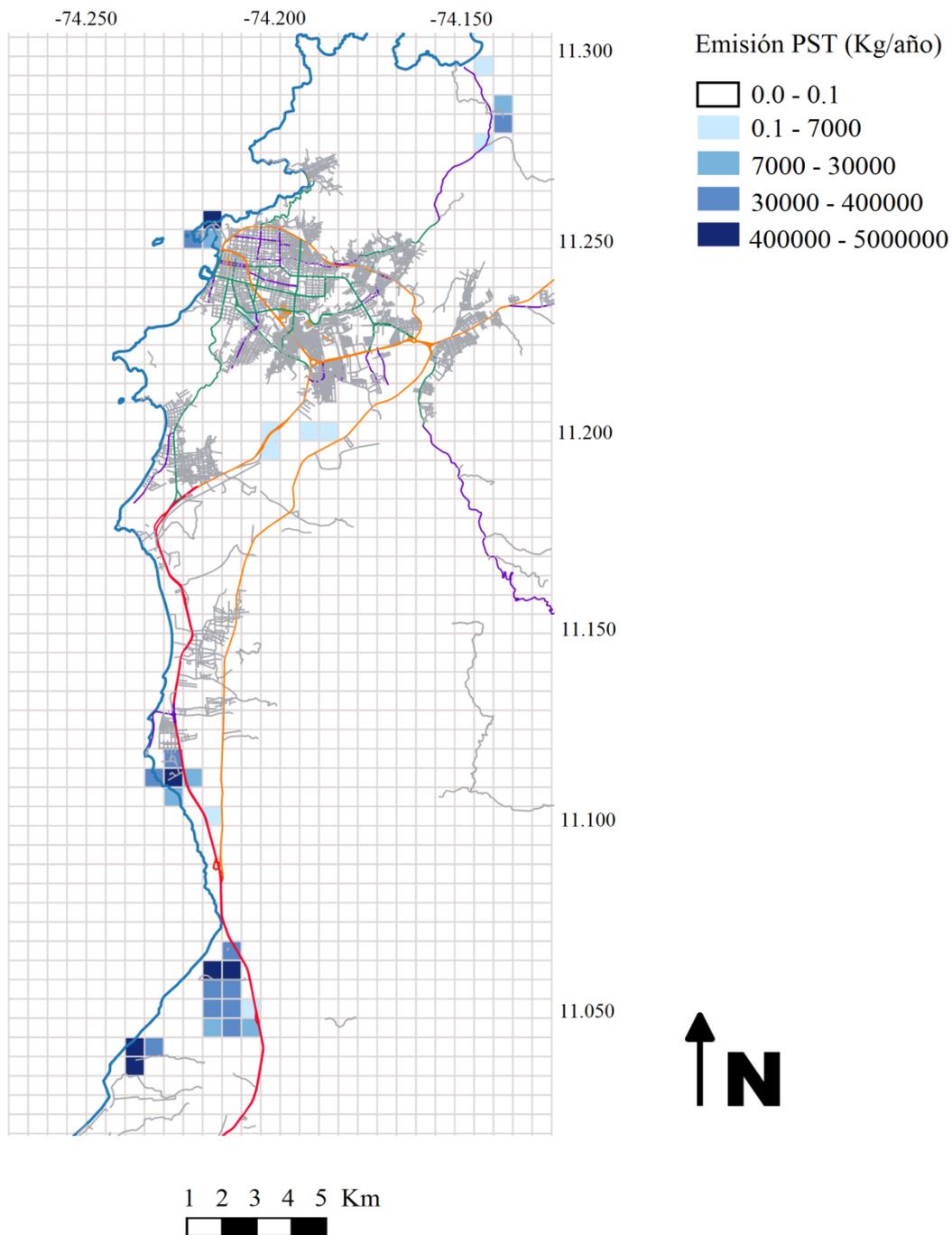


Figura 22. Emisión PST (Kg/Año) Fuentes de Área Antrópicas en zona costera del departamento del Magdalena. Coordenadas Geográficas.

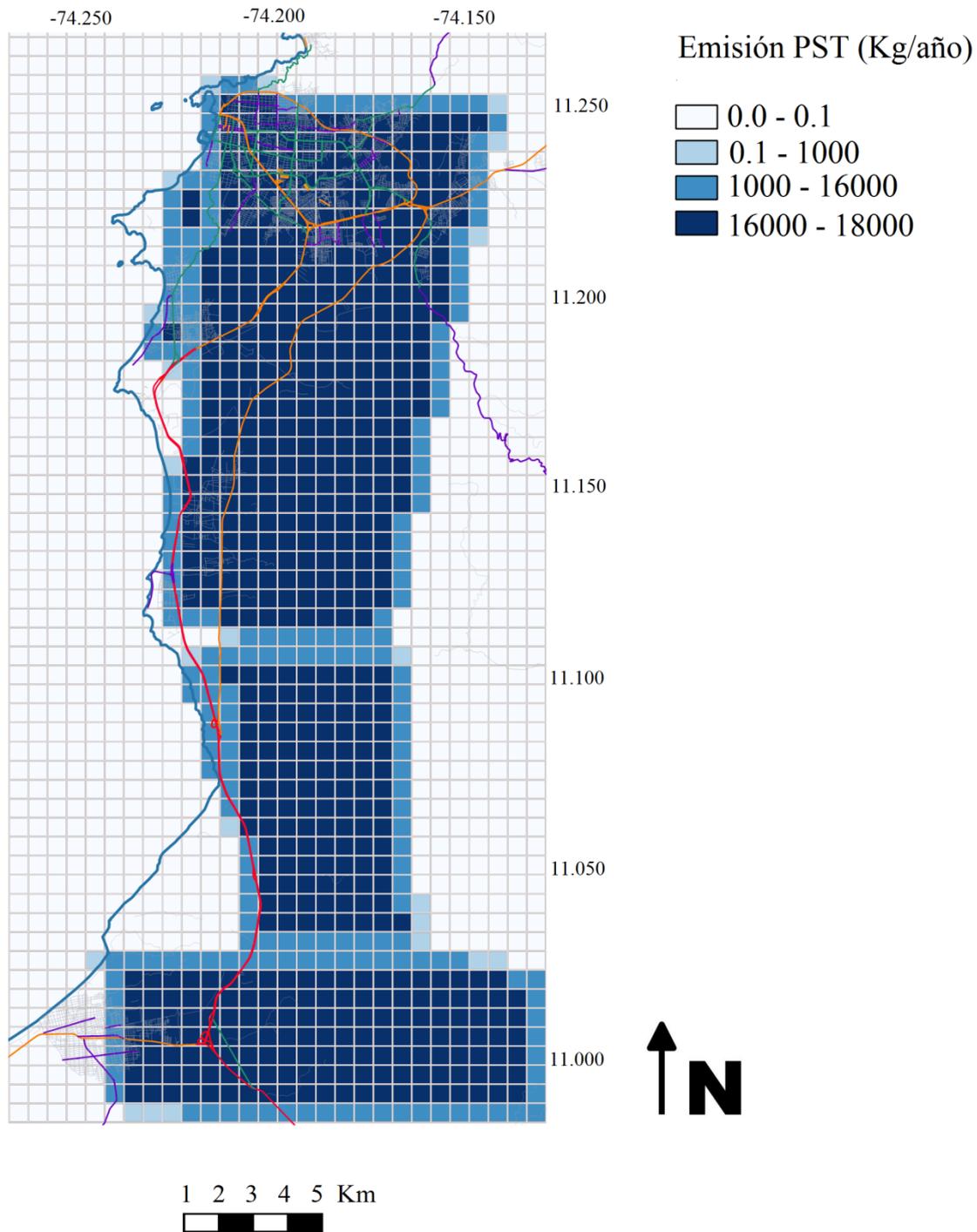


Figura 23. Emisión PST (Kg/Año) Fuentes de Área Naturales (Erosión) en zona costera del departamento del Magdalena. Coordenadas Geográficas.

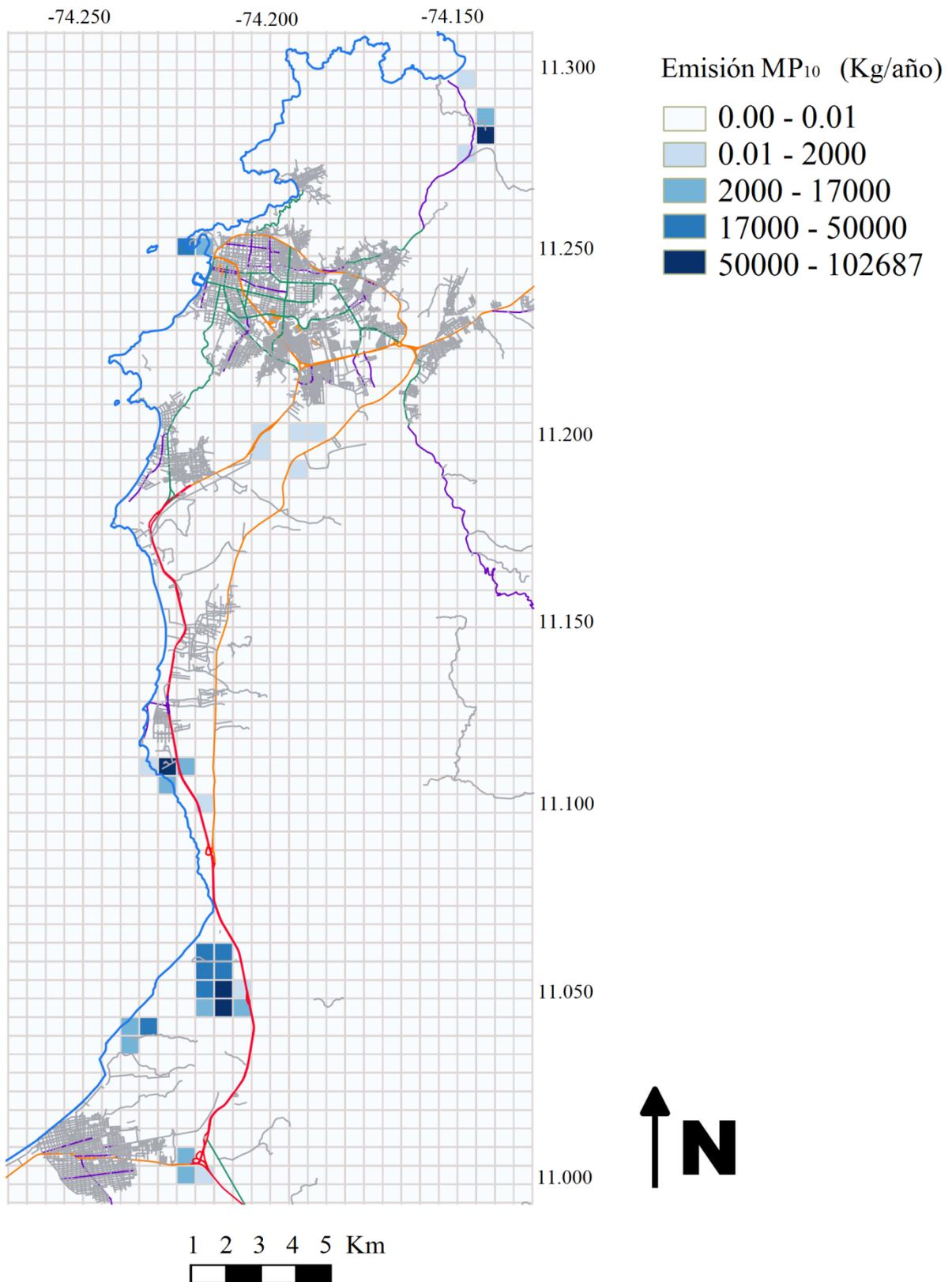


Figura 24. Emisión MP₁₀ (kg/año) Fuentes Puntuales y de Área zona costera del departamento del Magdalena. Coordenadas geográficas.

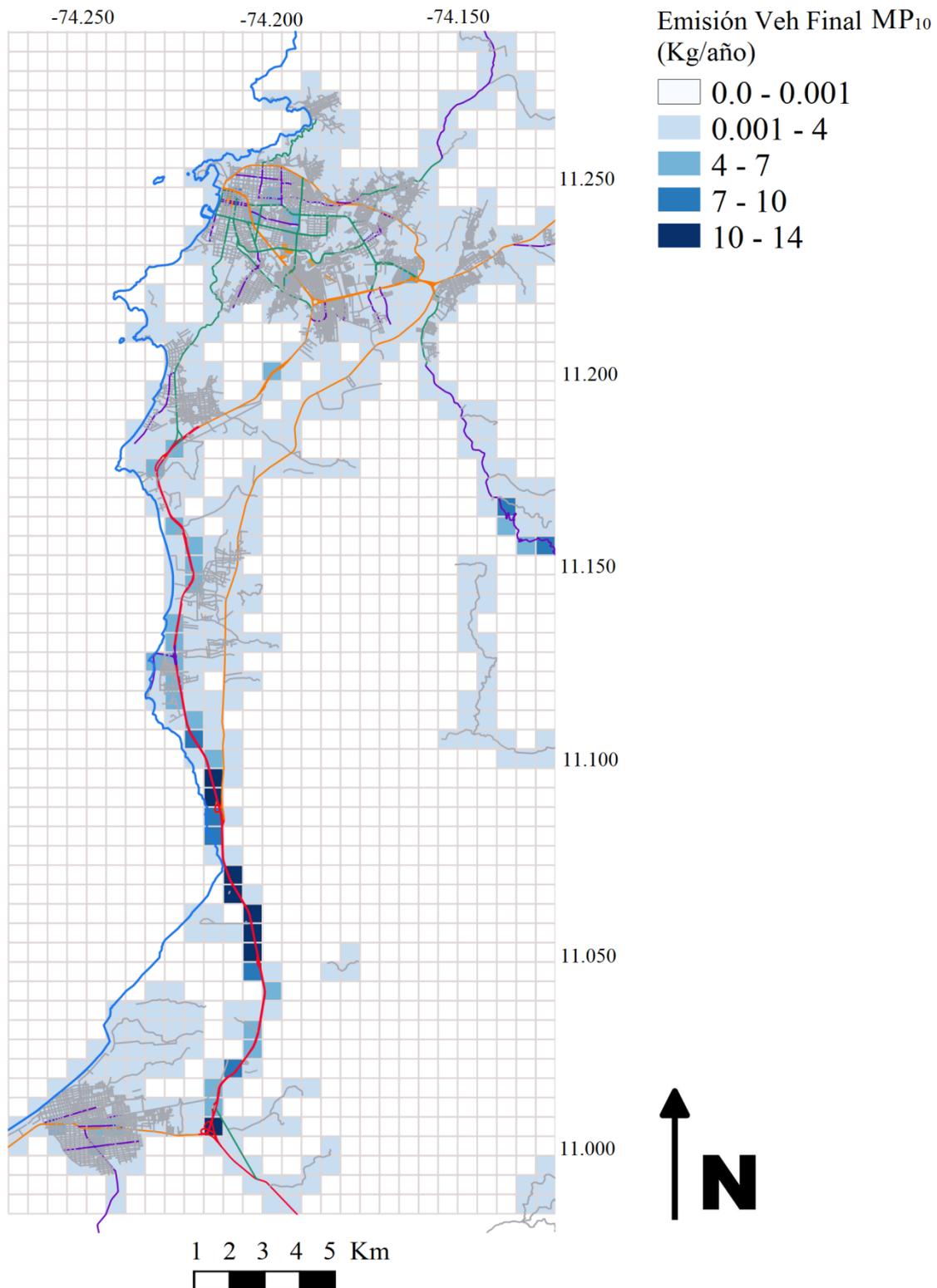


Figura 25. Emisión (Kg/año) de MP₁₀ originada por el tráfico Vehicular con zonas atractoras. Coordenadas Geográficas.

Resumen de Resultados Inventario de Emisiones

En el inventario de emisiones las fuentes naturales identificadas están asociadas a la erosión y desnudamiento de cerros. Por otro lado las fuentes antrópicas identificadas se encuentran asociadas a las actividades de carga, descarga, manejo y almacenamiento de carbón, extracción de materiales, navegación, disposición final de residuos sólidos y fábricas de aceite vegetal.

Para fuentes fijas las mayores emisiones se presentaron en los puertos de carbón y las menores en las canteras para extracción de materiales. Los resultados mostraron que se obtuvieron valores más altos para las emisiones de PST (0–5000 Ton/año) en comparación con las emisiones de MP₁₀ (0–102.68 Ton/año). Las comunas sobre las que se observa mayor influencia de estas emisiones son las comunas 3 y 8.

En el caso de las emisiones asociadas a fuentes móviles se presentaron mayores valores en la zona identificada como la “Y” de Ciénaga, la Carrera primera y la Avenida del Ferrocarril con Avenida del Libertador con registros de emisiones entre 10-14 kg/año para la “Y” de Ciénaga y valores entre 7–10 kg para la carrera Primera y Avenida del Ferrocarril con Avenida del Libertador. Las comunas mayormente influenciadas son la comuna 7 y 8.

6.4 EVALUACIÓN METEOROLÓGICA RELEVANTE

Para la evaluación del comportamiento de la dirección y velocidad del viento se tomó un período de cinco años como muestra, desde el año 2009 al año 2013.

Como se observa en la Figura 26, la rosa de vientos muestra que en su mayoría los vientos provienen de las direcciones Norte-Noreste y Noreste. Adicionalmente se observa que un pequeño porcentaje proviene de las direcciones Este, Sur y Oeste. Las velocidades más comunes se encuentran entre 2.1 y 5.7 m/s. En menor proporción se registraron velocidades entre 5.7 y 8.8 m/s. El porcentaje de calmas registrado es de 0.13%.

De igual forma la Figura 27, Figura 28, Figura 29 y la Figura 30, confirman el comportamiento del viento en relación a su dirección y velocidad. Para los grupos estacionales seleccionados (verano, otoño, invierno y primavera), los vientos provienen principalmente de la dirección Norte-Noreste, seguida de la dirección Noreste. Se observó mayor similitud en el comportamiento de los vientos en los meses de verano y otoño, y similitudes entre los meses de invierno y primavera, dado que se observa una influencia importante de los vientos provenientes del Este y el Sur en estos últimos, a diferencia de verano y otoño en donde la influencia de las velocidades provenientes del Este y Sur es mínima.

De la misma manera que la Figura 26, las rosas de viento estacionales (Figura 27, Figura 28, Figura 29 y Figura 30) reportan que las velocidades más comunes se encuentran en el rango de 2.1 y 5.7 m/s y en menor proporción se observa la ocurrencia de velocidades entre 5.7 y 8.8 m/s. El porcentaje de calmas oscila entre 0.09 y 0.18%, registrando porcentajes más altos en Verano y porcentajes más bajos en invierno.

Por su parte la rosa de vientos de los registros horarios (Figura 31) también muestra mayor influencia de los vientos provenientes del Norte-Noreste y del Noreste y porcentajes de calmas entre 0.06 – 0.15%. Con respecto a las velocidades en el horario de 0–16 predominaron velocidades entre 2.1–3.6 m/s, mientras que en el horario de 16–23 horas predominaron velocidades entre 3.6–5.7 m/s.

El Apéndice D muestra el comportamiento de la dirección y velocidad del viento durante las fechas en donde se presentaron las concentraciones máximas diarias de PST y PM₁₀.

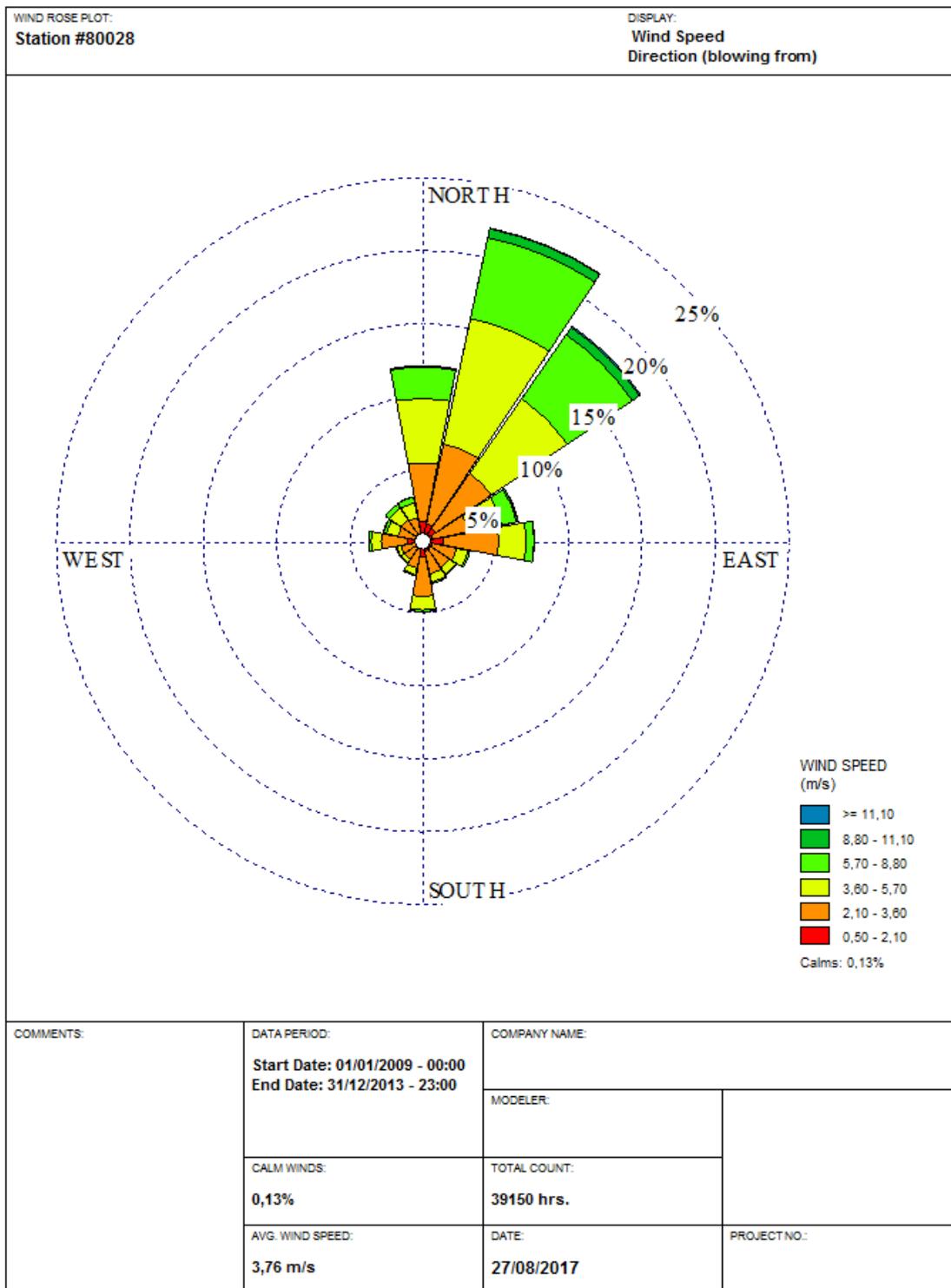


Figura 26. Rosa de vientos período 2009–2013

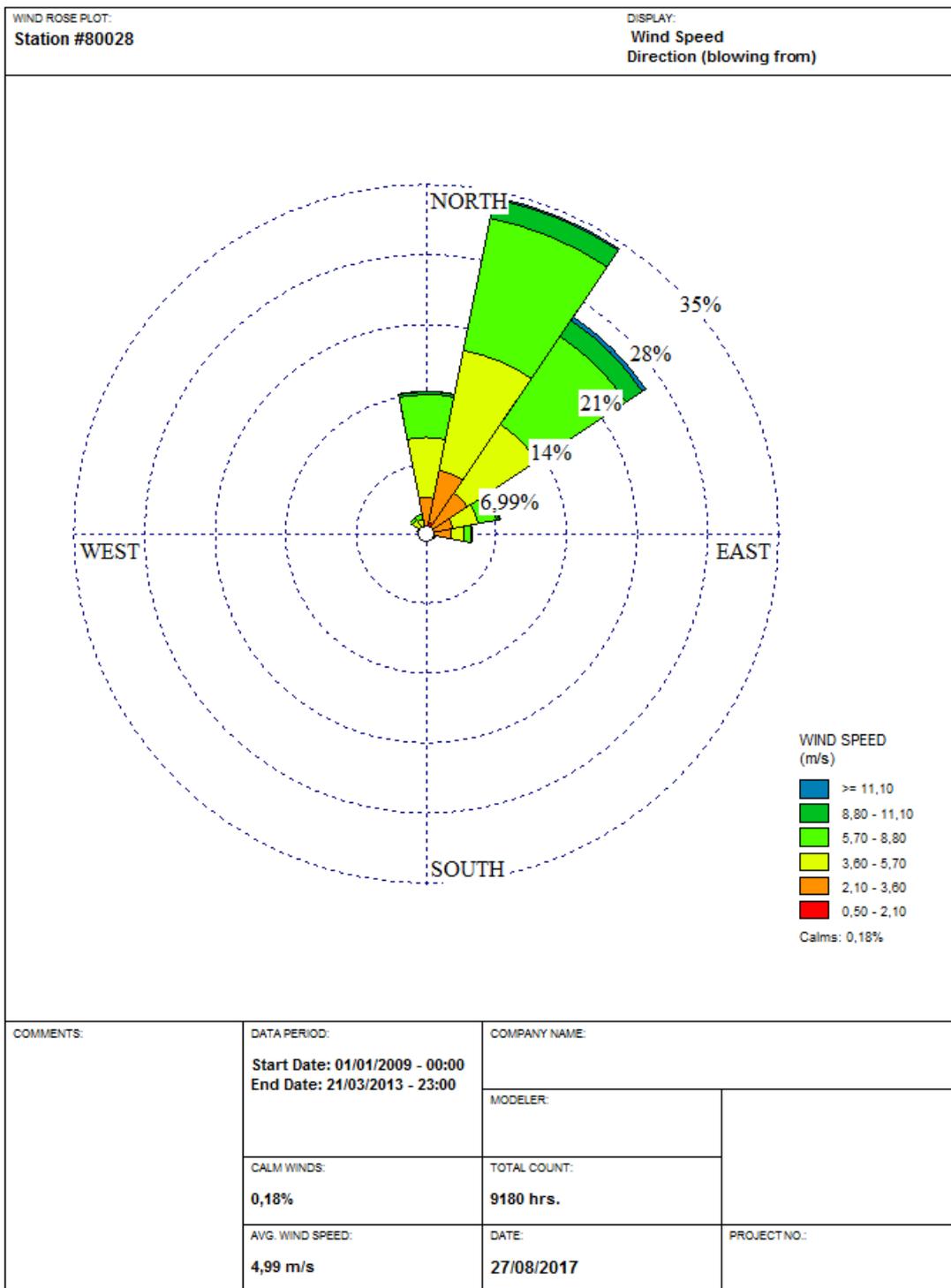


Figura 27. Rosa de vientos estación verano período 2009–2013

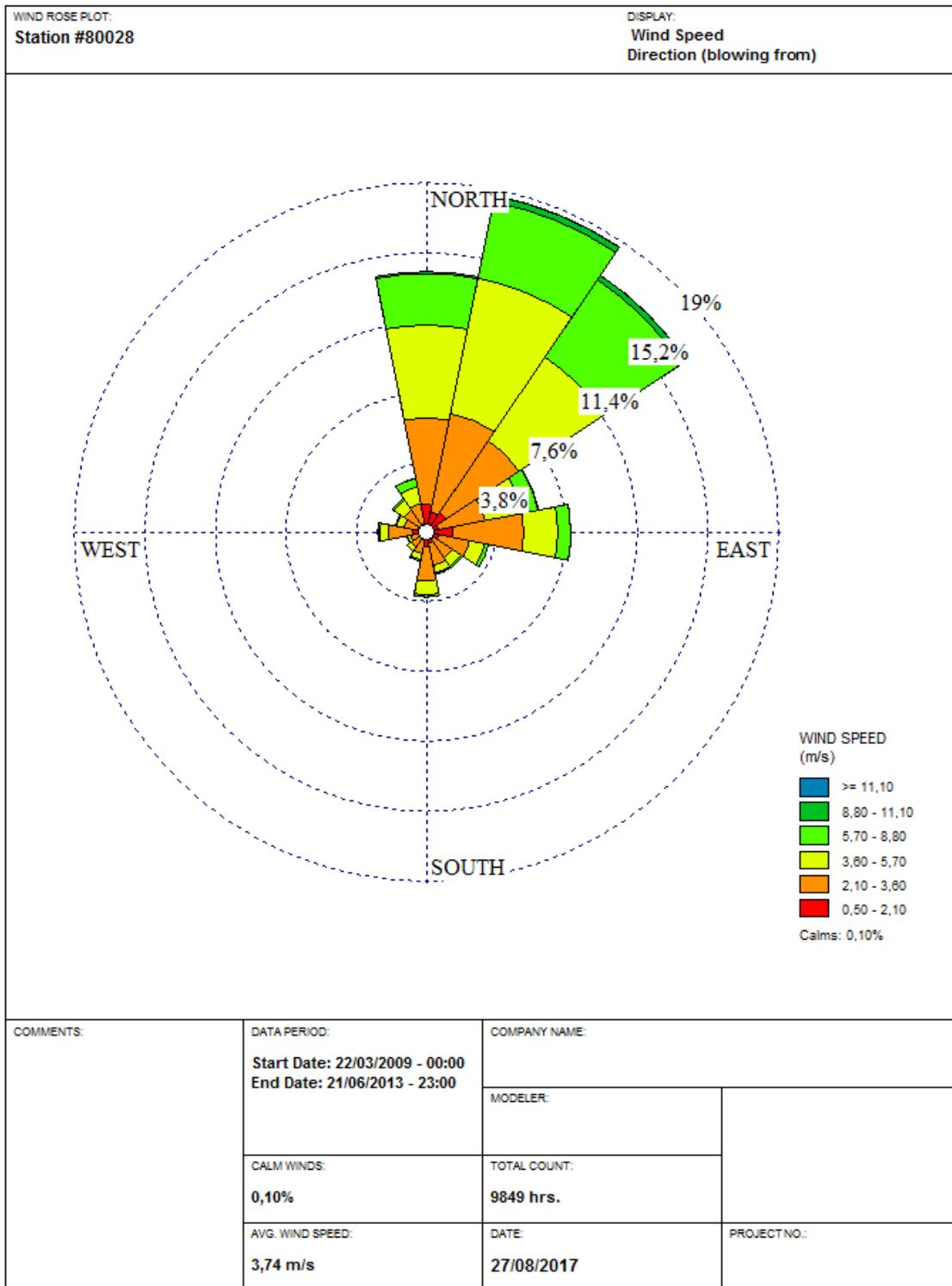


Figura 28. Rosa de vientos estación otoño período 2009–2013

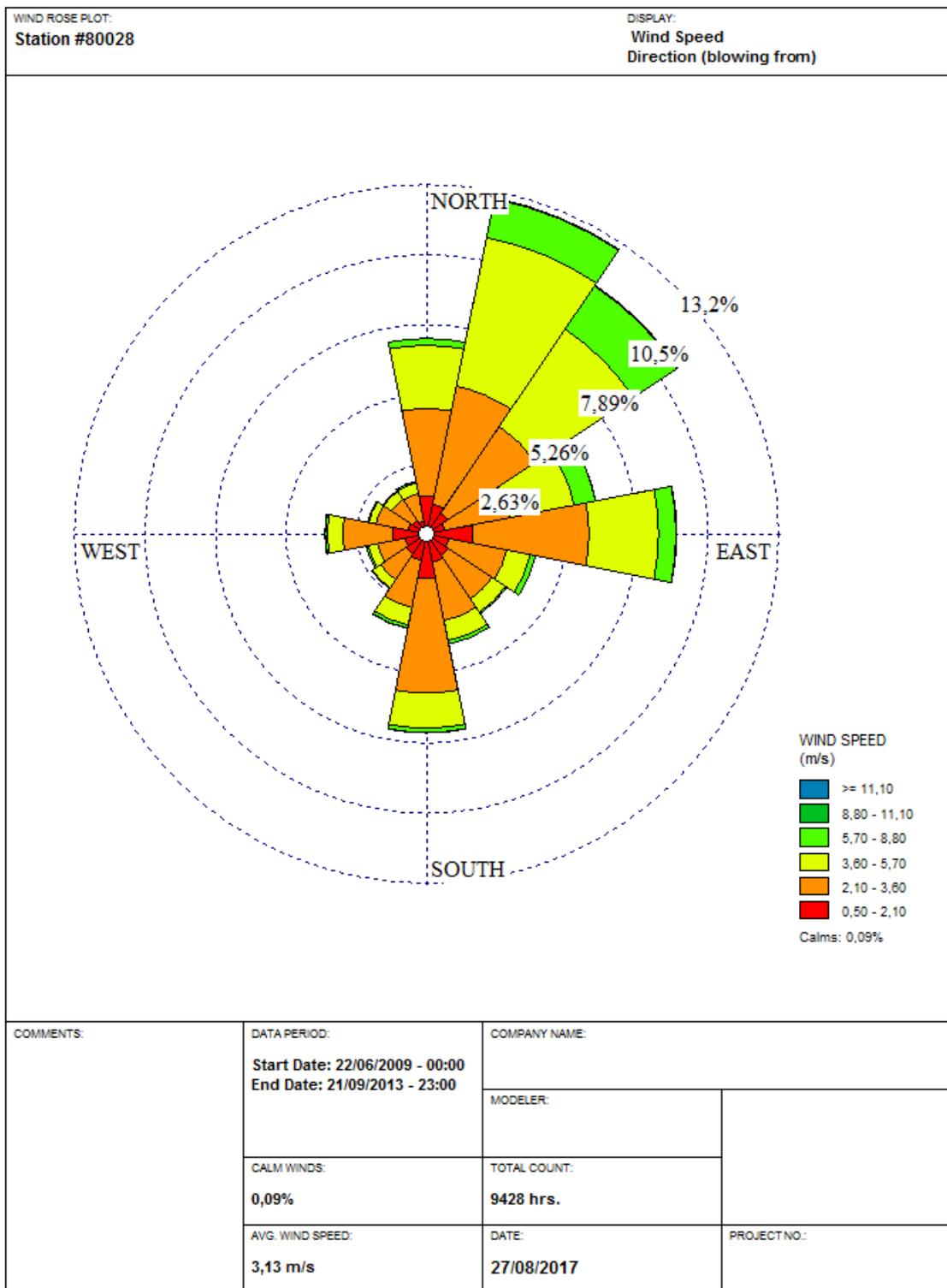


Figura 29. Rosa de vientos estación invierno período 2009–2013

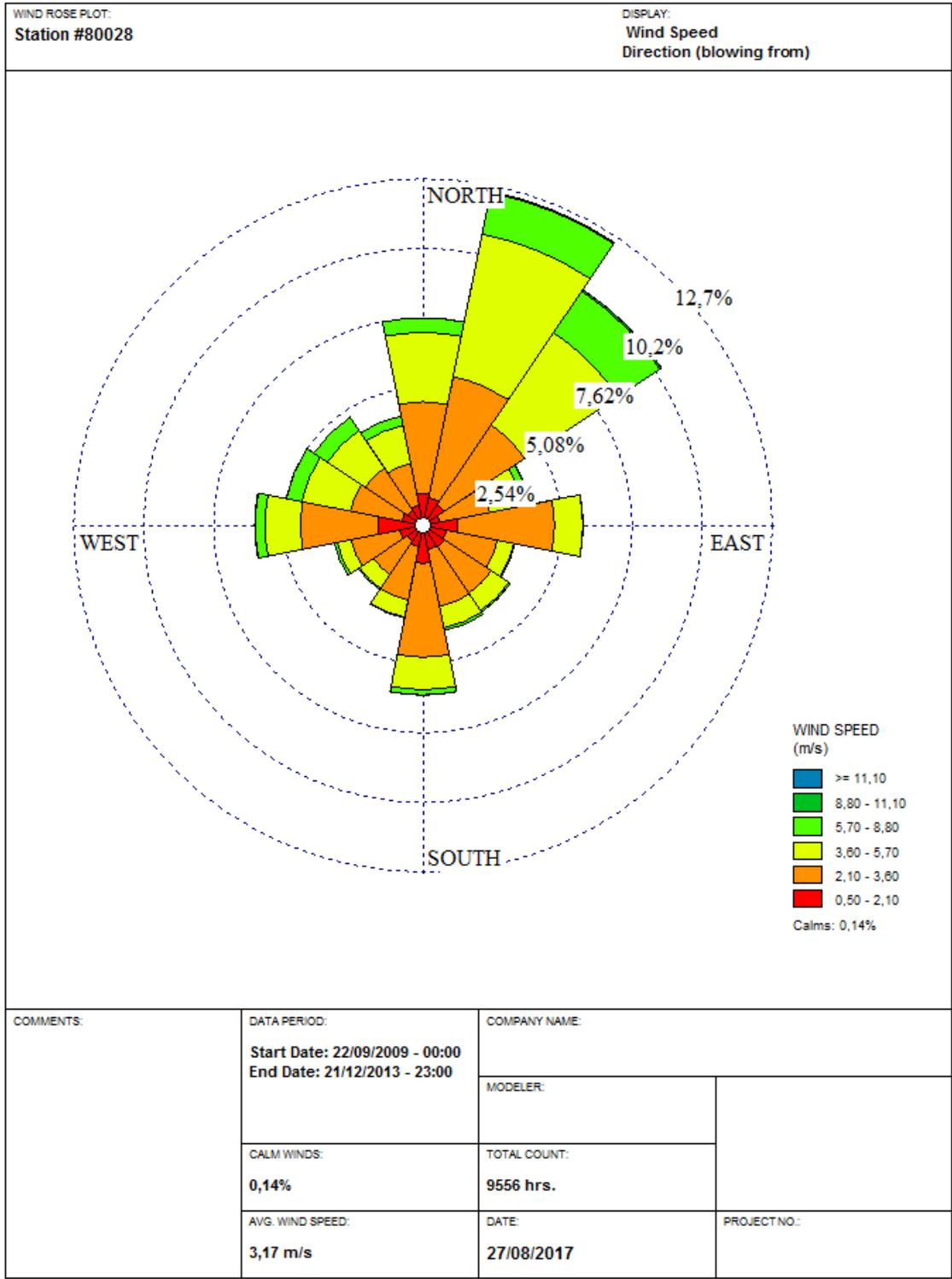


Figura 30. Rosa de vientos estación primavera período 2009–2013.

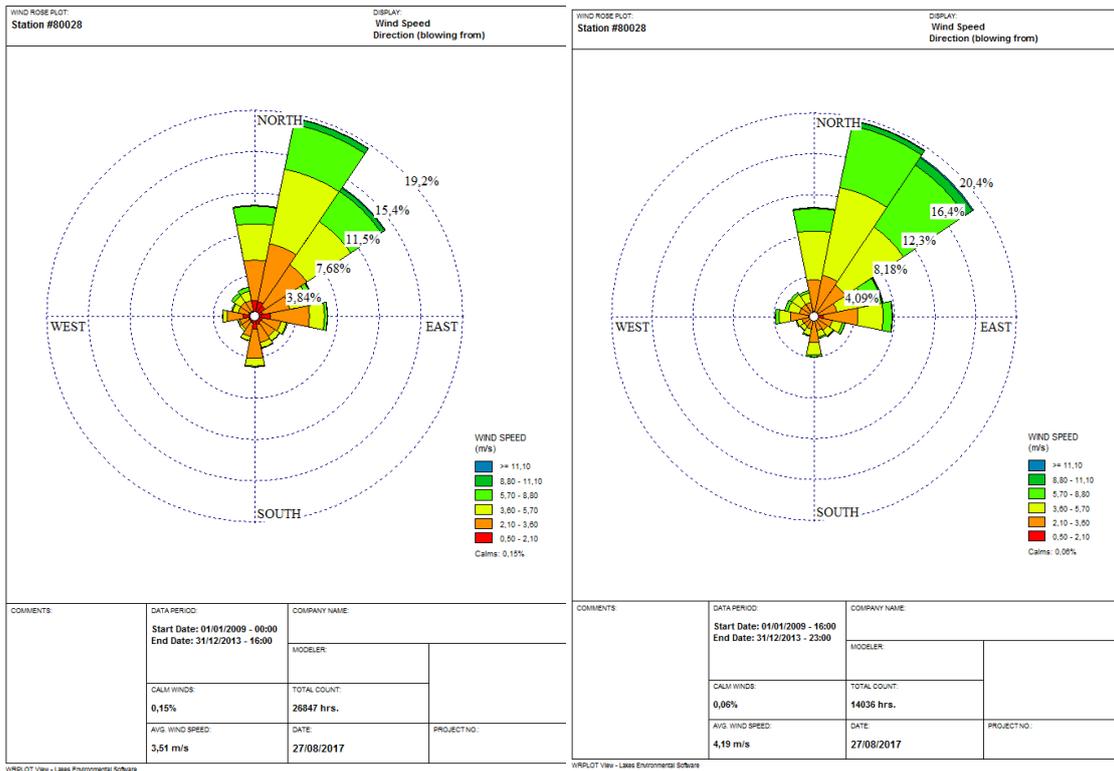


Figura 31. Rosa de vientos horario de 0–16 horas (izquierda) y de 16–23 horas (derecha) período 2009–2013.

6.5 MODELADO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

En los mapas generados con AERMOD (Figura 32 a la Figura 38), la escala con el color verde corresponde a las más bajas concentraciones, la escala en color amarillo corresponde a valores de concentraciones de material particulado cercanos al límite normativo, $49.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} y $98.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PST norma local. La escala en color rojo hace referencia a las concentraciones más altas durante el año analizado y que por ende superaron el límite de la norma para calidad del aire en Colombia.

Los resultados de la Figura 32 a la Figura 38, así como las figuras del Apéndice E, muestran que se supera el límite normativo anual para PST y MP_{10} en varias zonas del dominio analizado. Las concentraciones más altas de PST se presentaron en la zona rural muy cerca de la ubicación de los puertos de carbón localizados en el dominio, a una distancia aproximada de 100 m acorde con las coordenadas del modelo y en la zona urbana cerca del puerto identificado como fuente de emisión a una distancia de 80 m aproximadamente y de tres canteras a una distancia de 1 km y 1.7 km.

Para MP_{10} las concentraciones más altas se presentaron en la zona rural ubicada al sur de la ciudad de Santa Marta seguidas por pequeñas zonas ubicadas al norte de la ciudad, ambas concentraciones influenciadas principalmente por las emisiones de los puertos de carbón identificados en el estudio.

Para PST y MP_{10} las concentraciones más bajas se presentaron en las zonas con menor influencia de las fuentes de emisión ubicadas en su mayoría al norte del dominio analizado, no obstante los resultados para PST muestran en general altas concentraciones para todo el dominio analizado.

Las fuentes que muestran mayor influencia en el incremento de las concentraciones de PST y MP_{10} corresponden a los puertos de carbón: Sociedad Portuaria, ubicada al norte (Comuna 3), y los Puertos Prodeco, Drummond y Río Cordoba ubicados en la zona rural (Comuna 8). En menor medida se observa la influencia de la presencia de dos canteras y del relleno sanitario al norte de la ciudad fuera del área urbana.

Las comunas mayormente influenciadas para PST acorde con los resultados del modelo son la comuna 1, 2, 3, 4, 5, 6 en la Zona Urbana y comuna 8 en Zona Rural.

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

Para MP_{10} las comunas mayormente influenciadas son la comuna 1, 2, 3 y 4 ubicada al Norte y la comuna 8 ubicada al sur en zona Rural. Las comunas ubicadas al norte tienen mayor aporte de emisiones de origen vehicular en comparación con la comuna ubicada al sur de Santa Marta.

Para PST los años con mayor número de zonas con concentraciones que superan el límite de la norma corresponden a los años 2007, 2008, 2010, 2011 y 2013, no obstante en los años restantes se observa un número importante de zonas con concentraciones superiores a la norma. Los años con menor número de zonas que superan el límite son los años 2001 y 2012.

Para MP_{10} los años con mayor número de zonas que presentan concentraciones cercanas y por encima de la norma corresponden a los años 2008 y 2010, mientras que el año con menor número de zonas con concentraciones cercanas y que superan el límite anual corresponde al año 2012.

Comparando los resultados de concentraciones del archivo de salida de Aermod y los registros meteorológicos se encontró que algunos puntos con mayor concentración presentaron valores de velocidad de viento en el orden de 3.6 m/s, mientras que puntos con menores registros de concentración presentaron velocidades superiores en el orden de 5.7 m/s, lo que sugiere posible contribución de esta variable sobre el comportamiento de los registros de concentración.

Para PST se encontró que los resultados del modelo y de las mediciones de las estaciones de monitoreo de CORPAMAG muestran similitudes en las registros de las estaciones de INVEMAR, CAJAMAG y Centro Ejecutivo en los años 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 y 2007, y para la estación aeropuerto en los años 2005, 2006 y 2007 (Figura 32 a la Figura 34).

Para MP_{10} se encontraron similitudes en los registros de las estaciones Carbogranules, Don Jaca y Alcatraces en los años 2008, 2009, 2011, 2013 y 2014 como se observa en la Figura 36 y en las Figuras 21, 23, 24 y 25 del Apéndice E.

Los gráficos de torta de PST por año, para 5 puntos localizados en el dominio e identificados con números del 1 al 5 dentro de los mapas de la Figura 32 a la Figura 35, y de la Figura 20 del Apéndice E, muestran que en general hay mayor contribución de fuentes de origen industrial sobre las emisiones de PST con porcentajes superiores al 60%, comparado con el porcentaje de las emisiones de origen natural. No obstante se observa un número relevante de años (2002,

2008, 2009, 2012, 2013 y 2014) en donde la contribución de fuentes naturales es mayor en la zona urbana, mientras que el aporte de fuentes industriales es mayor en la zona rural.

Para MP_{10} las concentraciones dependen de la zona, el modelo muestra que las mayores concentraciones en la zona rural se atribuyen a las emisiones de originadas por fuentes fijas y un menor porcentaje en el orden del 15% obedece a emisiones por tráfico vehicular. Por otra parte en la zona urbana la Figura 36 muestra que las mayores concentraciones son aportadas por las emisiones origen vehicular, con un 80% del total de las emisiones.

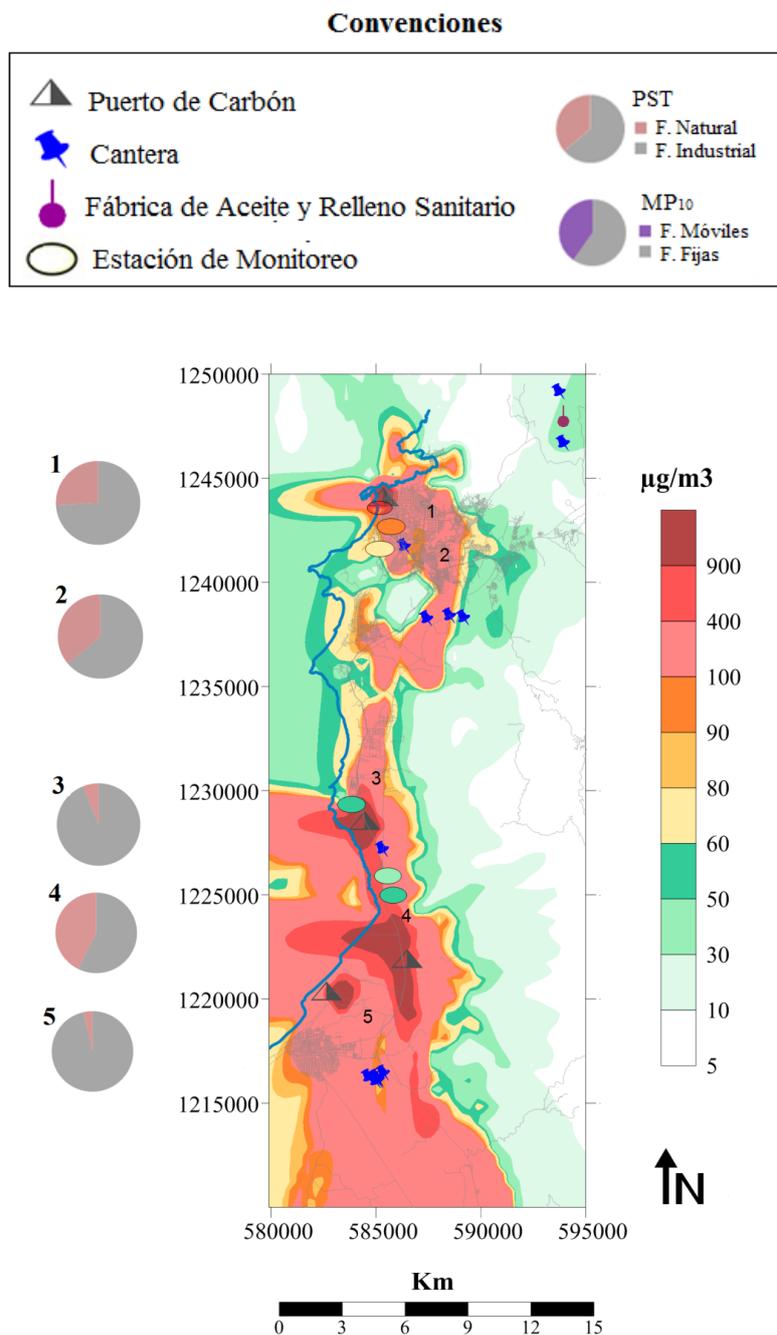


Figura 32. Concentraciones de PST año 2000 con malla vial. Coordenadas UTM.

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

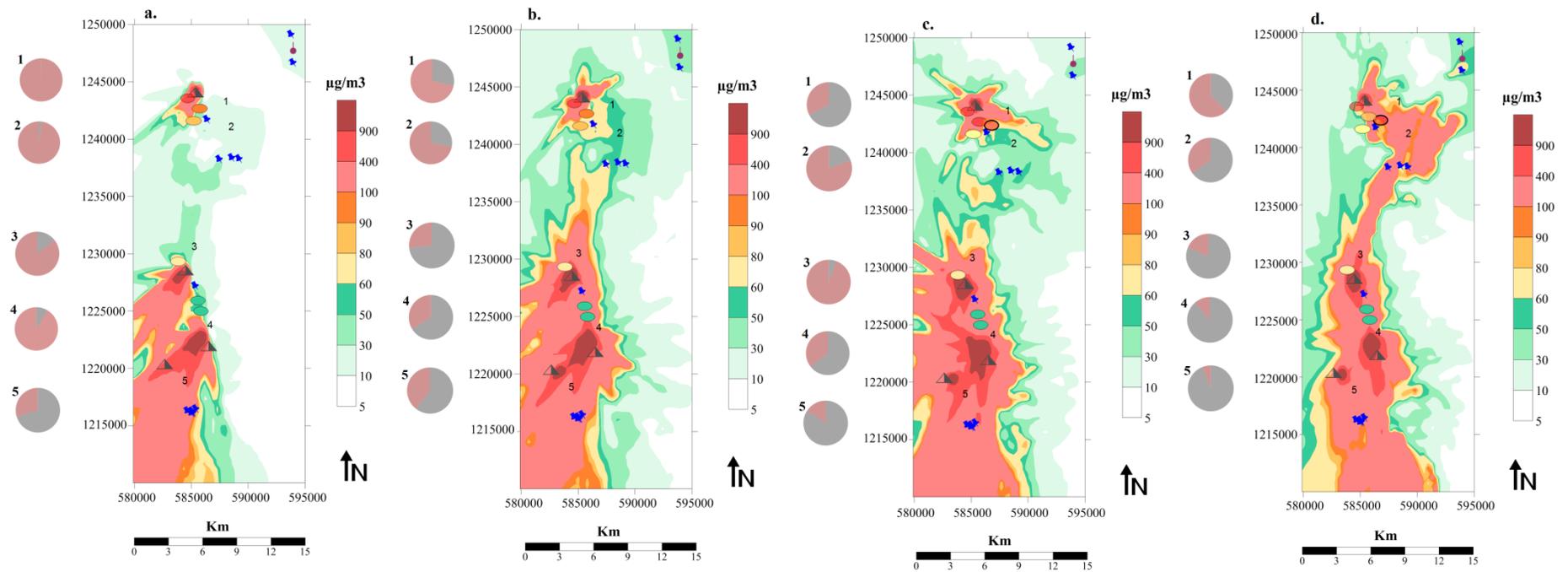


Figura 33. Concentraciones de PST a. Año 2001, b. Año 2002, c. Año 2003, d. Año 2004. Coordenadas UTM.

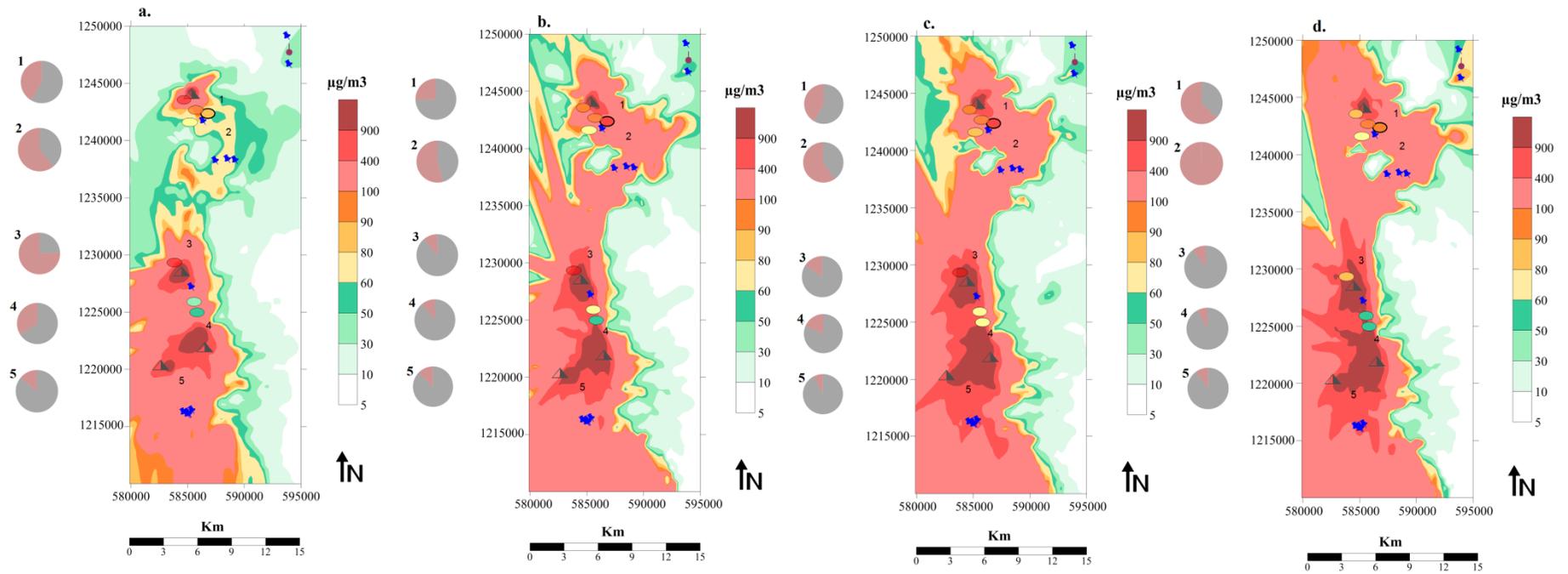


Figura 34. Concentraciones de PST a. Año 2005, b. Año 2006, c. Año 2007, d. Año 2008. Coordenadas UTM.

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

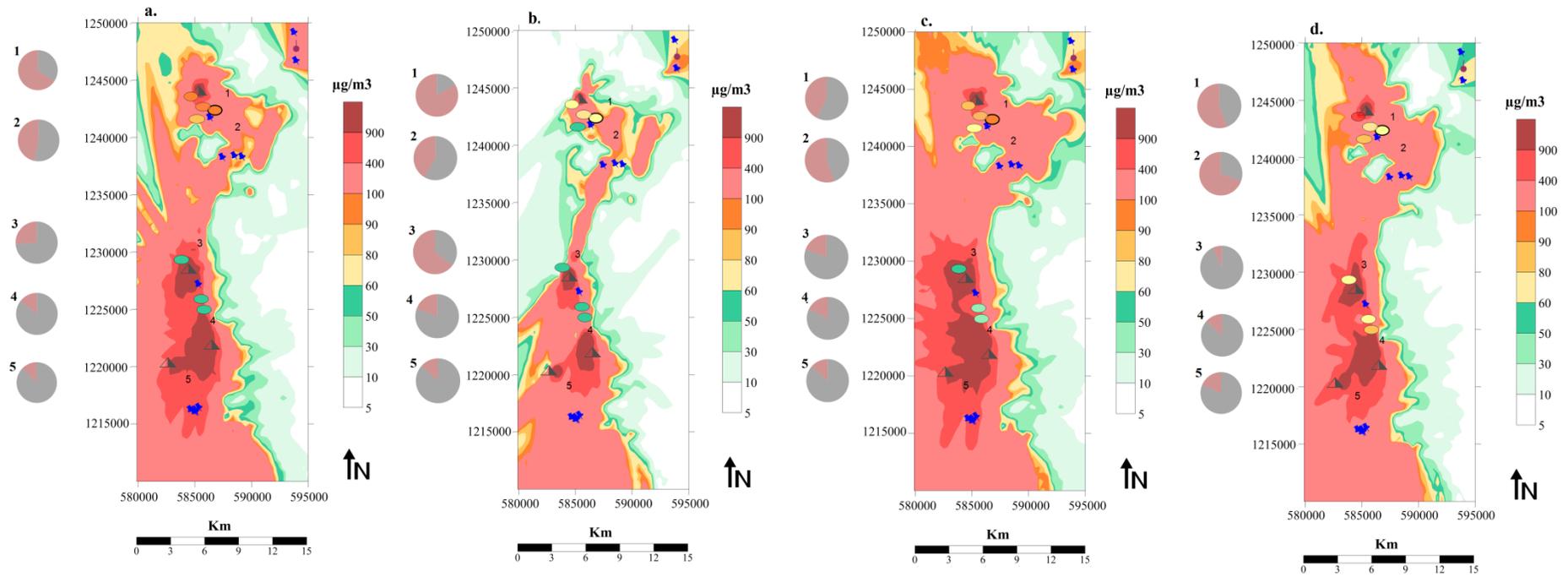


Figura 35. Concentraciones de PST a. Año 2009, b. Año 2012, c. Año 2010, d. Año 2014. Coordenadas UTM.

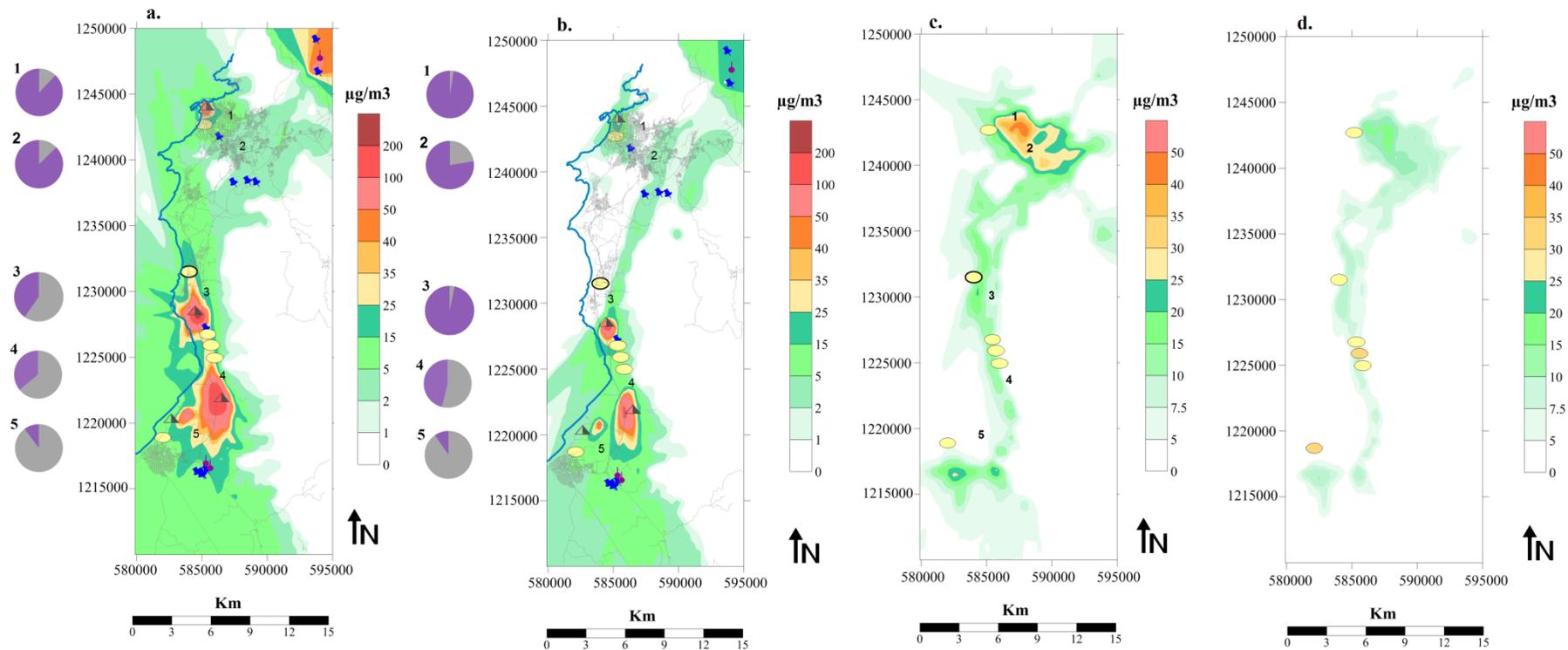


Figura 36. Concentraciones de MP₁₀ a. Fuentes fijas año 2008, b. Fuentes Fijas Años 2012, c. Fuentes Móviles año 2008, d. Fuentes Móviles años 2012.

Escenarios

Con el objeto de verificar posibles reducciones en las concentraciones mostradas del modelo y posible medidas de mitigación acorde con la tendencia mostrada por las concentraciones de salida del modelo, se tomaron las condiciones meteorológicas del año 2008 y se modelaron reducciones del 20% y 40% de las emisiones de las fuentes con mayor impacto sobre los registros de PST y MP₁₀, los resultados se presentan en la Tabla 15 y Tabla 16.

Los resultados de emisión indicados en cada escenario corresponden a las reducciones de las emisiones de los cuatro puertos de carbón: Sociedad Portuaria, Prodeco, Drummond y Ex Vale, que son las fuentes de mayor impacto. Las emisiones de las fuentes restantes no se modificaron.

Tabla 15. Escenarios concentraciones PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Estación	Contaminante	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Modelo PST	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Escenario 1	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Escenario 2
Invemar	PST	744.62	594.82	446.11
Centro Ejecutivo	PST	198.01	135.72	101.79
CAJAMAG	PST	439.01	334.19	250.64
Batallón	PST	213.61	166.35	124.76
Aeropuerto	PST	564.14	437.27	327.95
Don Jaca	PST	1334.57	1026.77	770.08
Alcatraces	PST	1256.33	959.92	719.94

Tabla 16. Escenarios concentraciones MP₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Estación	Contaminante	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Modelo MP ₁₀	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Escenario 1	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Escenario 2
Don Jaca	MP ₁₀	42.28	33.81	25.36
Alcatraces	MP ₁₀	33.37	26.49	19.86
Club Santa Marta	MP ₁₀	16.69	13.34	10.01
Zuana	MP ₁₀	21.26	16.91	12.68
Carbogranales	MP ₁₀	345.85	276.67	207.50
Costa Verde	MP ₁₀	14.02	11.19	8.39

La Tabla 15 y Tabla 16 muestran que cuando se logran disminuciones del 40% en las emisiones de las fuentes con mayor impacto, en este caso los puertos de carbón, se obtienen reducciones entre el 40 y 48% en las concentraciones de PST, y reducciones en el orden del 41% para MP₁₀.

En la Figura 37 y Figura 38 se observa una disminución importante de las concentraciones de PST, especialmente en la zona urbana. De la misma manera para MP₁₀ reducciones del 40% de las emisiones de las fuentes de mayor impacto correspondiente a los cuatro puertos de carbón, tienen un efecto significativo sobre las concentraciones, sacando de riesgo zonas que encuentran cercanas al límite de la norma.

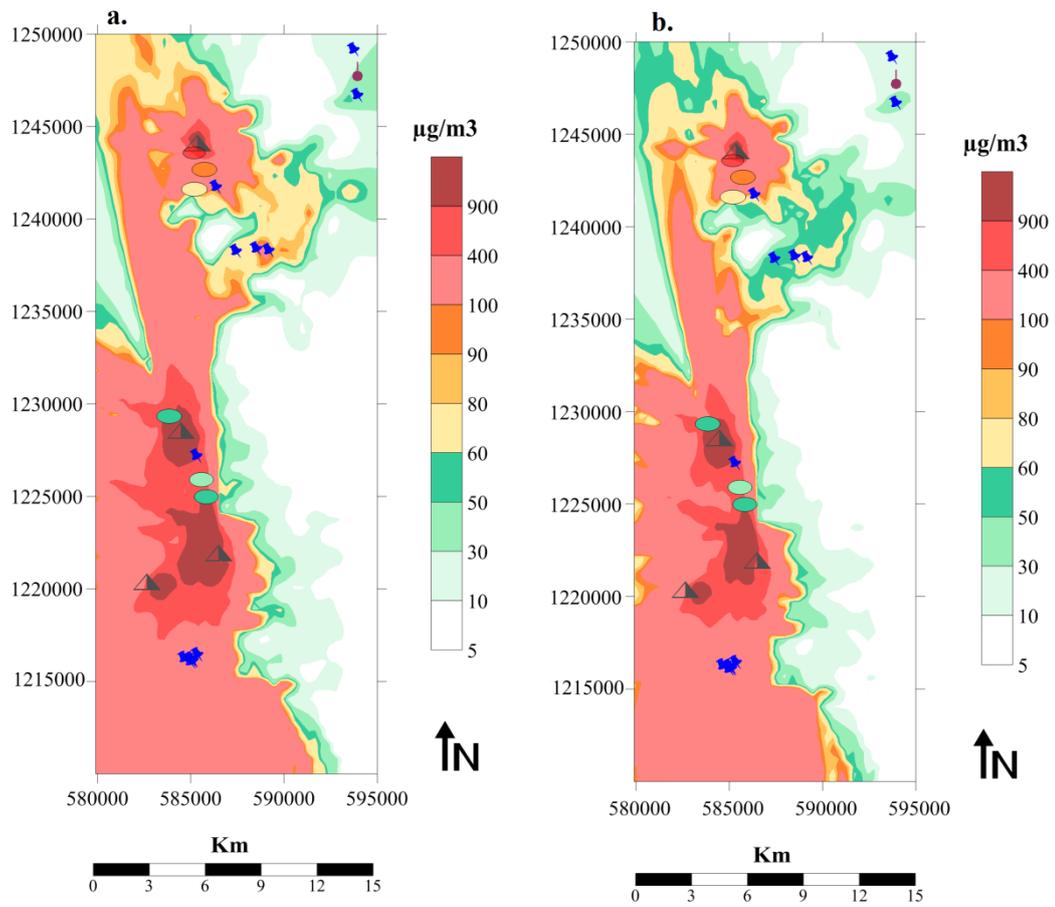


Figura 37. Concentraciones para PST a. Escenario 1, .b. Escenario 2. Coordenadas UTM.

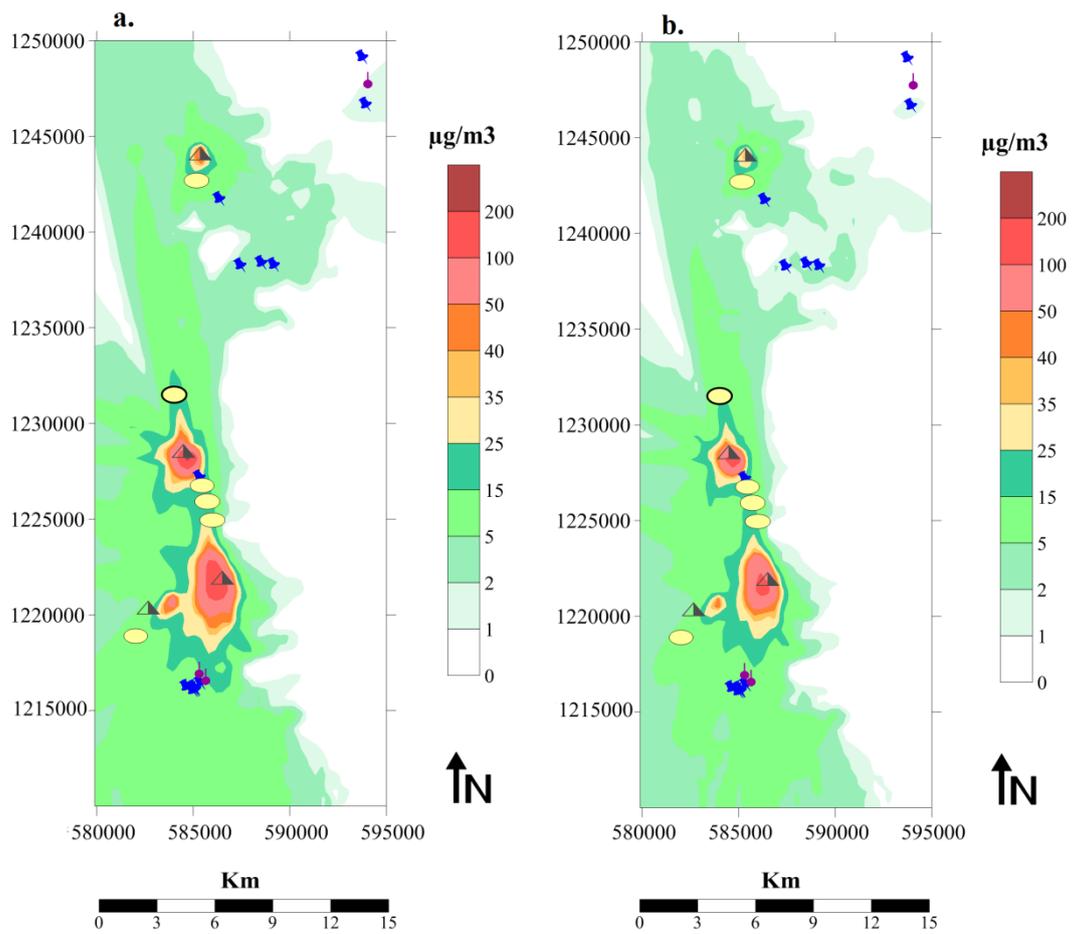


Figura 38. Concentraciones para MP₁₀ a. Escenario 1, b. Escenario 2. Coordenadas UTM.

6.5.1. Validación del Modelo

Para la validación del modelo se utilizó un análisis de frecuencias, herramienta que permite la descripción de la distribución de las variables medidas en este caso de la concentración de PST y MP_{10} . Se compararon las frecuencias de los datos medidos por las estaciones de PST y MP_{10} de la red de calidad de aire de CORPAMAG con los datos simulados con AERMOD.

La Figura 39 muestra una distribución similar para ambas variables como resultado del análisis de frecuencia de los registros de PST. No obstante también se observan algunas diferencias que podrían indicar la ausencia de fuentes ingresadas en el modelo. Por su parte, la validación para los registros de MP_{10} muestra que los datos medidos y simulados tienen distribuciones muy similares (Figura 40).

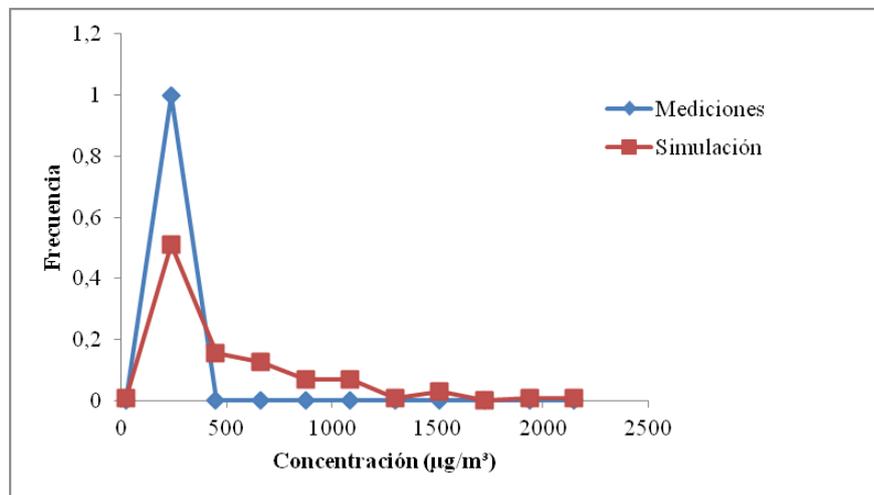


Figura 39. Análisis de Frecuencia concentraciones PST

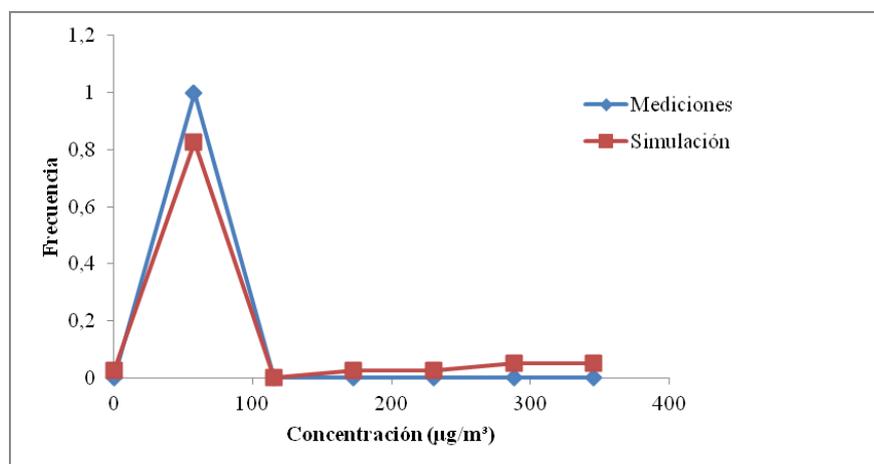


Figura 40. Análisis de Frecuencia MP_{10}

El resultado de los indicadores estadísticos se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Indicadores estadísticos

Estación	Contaminante	FB	MG	NMSE	VG	R	FAC2
Aeropuerto	PST	-0.82	0.15	14.93	117.96	0.07	0.13
Alcatraces	PST	-0.80	0.15	11.98	72.23	0.21	0.07
Batallón	PST	-0.25	0.67	0.63	1.54	0.15	0.73
Centro Ejecutivo	PST	-0.25	0.68	0.60	1.64	-0.25	0.73
CAJAMAG	PST	-0.38	0.53	1.37	2.35	0.00	0.40
Don Jaca	PST	-0.80	0.14	11.39	90.75	0.30	0.07
INVEMAR	PST	-0.68	0.21	4.16	16.47	-0.33	0.07
Alcatraces	MP ₁₀	0.16	1.44	0.26	1.30	-0.28	0.71
Don Jaca	MP ₁₀	0.15	1.43	0.39	12.46	-0.46	0.71
Carbogranes	MP ₁₀	-0.80	0.11	7.84	17.57	-0.40	0.00
Club Santa Marta	MP ₁₀	0.43	2.63	1.06	9.33	-0.59	0.43
Zuana	MP ₁₀	0.42	3.59	1.03	9.95	0.20	0.43
Costa Verte	MP ₁₀	0.51	3.18	1.58	4.27	0.06	0.00

El resultado cercano a cero de los indicadores calculados para las concentraciones medidas y simuladas de la mayoría de las estaciones muestra correspondencias entre los valores, no obstante se encontraron estaciones con diferencias marcadas es el caso de las estaciones Aeropuerto, Alcatraces, Carbogranes y Don Jaca, resultado asociado probablemente por la falta de fuentes cercanas a las estaciones que fueron consideradas en el estudio.

Resumen de Resultados Modelado de Dispersión de contaminantes

Para PST el resultado de la corrida del modelo de todas las fuentes juntas muestra que las concentraciones más altas ocurren tanto en la zona urbana como en la zona rural. Las comunas mayormente influenciadas son las comunas 1, 2, 3, 4, 5, 6 en zona urbana y comuna 8 en zona rural. Los años que mostraron concentraciones más críticas son los años 2007, 2008, 2010, 2011 y 2013.

Para MP_{10} el modelo muestra que las concentraciones más altas ocurren en la zona rural al sur de la ciudad de Santa Marta. La comuna mayormente influenciada es la comuna 3. Los años que mostraron concentraciones más críticas son los años 2008 y 2010.

Las fuentes con mayor influencia sobre las emisiones de PST son las fuentes de origen industrial con una contribución del 60% de las emisiones, principalmente los puertos de carbón y en menor medida contribuyen en las concentraciones de PST, fuentes como canteras y el Relleno Sanitario. Para el caso de MP_{10} la concentración varía acorde a la zona, en zona urbana las mayores concentraciones son aportadas por las emisiones de origen vehicular, con una contribución del 80% del total de las emisiones; mientras que las mayores concentraciones en zona rural se atribuyen al aporte de las fuentes fijas con un porcentaje en el orden del 85% del total de las emisiones.

El resultado de la validación muestra que las concentraciones resultantes del modelo tienen una distribución similar a la distribución de las concentraciones medidas en la zona de estudio en la mayoría de las estaciones.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Concentraciones de PST y MP₁₀

Como punto de partida para el análisis de resultados se tomaron las medias geométricas anuales de las concentraciones diarias de PST calculadas con base a la normativa vigente. Acorde con la norma anual para PST ($98.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), el límite es superado en tres estaciones de monitoreo de CORPAMAG: Aeropuerto, CAJAMAG e INVEMAR durante los años indicados en los resultados, cada una de las estaciones es influenciada por la realización de distintas actividades. La estación INVEMAR se encuentra localizada cerca al puerto de carbón Sociedad Portuaria, la estación Aeropuerto cerca al Puerto Prodeco y la estación CAJAMAG, se encuentra en un punto residencial influenciado en su mayoría por el tráfico vehicular y eventos puntuales que contribuyen con la generación de material particulado.

Según los informes publicados por la Red de Calidad del Aire de CORPAMAG (Informe mensual de resultados Red de Monitoreo de Calidad del Aire enero-diciembre, 2000-2014), las altas concentraciones en la estación INVEMAR durante el año 2000, pueden asociarse a las actividades de cargue y descargue de la terminal de carbón Carboandes (hoy Carbosan-operador portuario) y a la falta de humectación de las pilas de carbón. De la misma manera, según los informes de CORPAMAG los incrementos registrados en la estación INVEMAR en los años siguientes 2001, 2002, 2003 y 2004 están asociados a la actividad de la terminal Carboandes, que durante esos años registró un aumento de las exportaciones de carbón que pasaron de 800 toneladas a 2000.000 toneladas anuales. Adicionalmente se atribuye el incremento al arrastre de partículas generadas por la urbanización de los cerros de Santa Marta y que son arrastradas por la acción del viento. Para los años posteriores, excepto el año 2014, se observa un descenso general en las concentraciones de la estación INVEMAR asociado probablemente con el incremento de controles y la implementación de obras de carga directa de carbón. En el caso del incremento en el año 2014, los informes de CORPAMAG lo atribuyen principalmente a la influencia de incendios forestales en la zona: en este contexto, el análisis mineralógico de la muestra tomada en la estación de INVEMAR y reportado en el informe de CORPAMAG del año 2001, muestra alto contenido de partículas de carbón.

Por otro lado las altas concentraciones en la estación CAJAMAG durante los años 2003, 2004, 2006 y 2007 están relacionadas en los informes de CORPAMAG (Informe mensual de resultados Red de Monitoreo de Calidad del Aire enero-diciembre, 2000-2014), con la las actividades de construcción de los almacenes Olímpica.

En cuanto a la estación Aeropuerto, de acuerdo a la Figura 32 a la Figura 35 se pueden atribuir las altas concentraciones a la posible influencia de fuentes de emisión de material particulado ubicadas cerca de la zona como es el caso del Puerto Prodeco y también a la erosión por acción del viento en los cerros.

En el caso de MP_{10} , si bien la norma anual solo es superada en la estación Costa Verde en el año 2014, la estación Don Jaca presenta valores significativos, en algunos casos asociados en los informes de CORPAMAG (Informe mensual de resultados Red de Monitoreo de Calidad del Aire enero-diciembre, 2000–2014) con eventos como la obra de construcción de la doble calzada Ciénaga-Mamatoco en el año 2009 y algunos incendios forestales ocurridos en el año 2014.

Cabe resaltar que el resultado de las concentraciones calculadas para MP_{10} , mostró mayores excedencias en las medias aritméticas mensuales de las concentraciones diarias (estaciones Zuana, Don Jaca y Costa Verde) y menores excedencias de las medias aritméticas anuales de las concentraciones diarias, en donde solo hubo excedencia del límite normativo anual durante el año 2014 en la estación Costa Verde, esto probablemente asociado a la ocurrencia de eventos puntuales en las zonas cercanas a las estaciones referidas.

Variaciones meteorológicas

En los resultados obtenidos también son evidentes las similitudes entre la distribución temporal de las concentraciones de material particulado (PST y MP_{10}) y los cambios en variables meteorológicas como las precipitaciones. Revisando el comportamiento mensual de las concentraciones en cada una de las estaciones (Figura 1 a la Figura 6 del Apéndice B) se observa que los incrementos ocurren en su mayoría durante los primeros meses del año, especialmente en los meses de enero y febrero y que los descensos o concentraciones más bajas ocurren durante los meses de septiembre, octubre y noviembre. Esto está probablemente asociado a las épocas secas y lluviosas que experimenta la zona objeto de estudio; según los registros del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, en la zona se registran dos períodos, período seco y lluvioso, el período seco comprendido principalmente por los meses del primer semestre de año coincide con los meses en donde se obtuvieron concentraciones más altas, y el período lluvioso, comprendido en su mayoría por los meses del segundo semestre coincide con los meses de menores concentraciones de material particulado.

El anterior comportamiento se replica en el resultado de los clústeres para cada estación, debido a que los clústeres se agrupan en su mayoría en concordancia con los períodos climáticos

identificados en el área de estudio, se generaliza que los meses de enero, febrero y marzo tanto para PST como MP₁₀ forman un clúster para cada estación y los meses de septiembre, octubre y noviembre forman otro clúster.

Los resultados anteriores son coherentes con lo explicado por varios autores que indican que el comportamiento de variables meteorológicas de cada temporada determina los períodos con altas y bajas concentraciones de material particulado. Incrementos en los valores de variables como la precipitación facilitan procesos de dilución de material particulado, mientras que su disminución contribuye en la acumulación de material particulado (Vidal et al., 2010; Gaviria et al., 2011; Silva y Canchal, 2013; Candanoza et al., 2013).

Inventario de emisiones y AERMOD

La información del inventario de emisiones que alimentó los datos de entrada del modelo AERMOD muestra la influencia de las fuentes identificadas en la emisión de material particulado en la zona de estudio.

Para PST y MP₁₀, los resultados de la Figura 32 a la Figura 36, muestran que los puntos con altas concentraciones se encuentran asociados a la ubicación de las fuentes de emisión identificadas en el inventario de emisiones, mostrando una disminución notable de las concentraciones a medida que se alejan de la fuente identificada por efecto de dilución de la concentración del contaminante evaluado.

Comparando estos resultados con las concentraciones de las estaciones de monitoreo de CORPAMAG, se encontró que en algunos casos hay similitudes entre las concentraciones mostradas por el modelo y las concentraciones registradas por la estación de monitoreo en los años estudiados: es el caso de estaciones de PST de INVEMAR, CAJAMAG y Centro Ejecutivo en los años 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 y 2007, y el caso de la estación aeropuerto en los años 2005, 2006 y 2007. De igual manera se observaron similitudes entre las concentraciones medidas y simuladas en las estaciones de MP₁₀ Carbogranules, Don Jaca y Alcatraces en los años 2008, 2009, 2011, 2013 y 2014.

Estas similitudes encontradas también se extienden a las posibles causas en el incremento de las concentraciones referidas por los informes de CORPAMAG; es el caso de la estación INVEMAR que registra aumentos en los años 2000, 2003 y 2004 asociados al incremento de

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado carga y descarga en el puerto. Al verificar las tortas con los aportes por fuente de la Figura 32 se observa que el mayor aporte en esa zona es realizado por fuentes de origen industrial.

De la misma manera, la Figura 34 resultado de la corrida del modelo, muestra altas concentraciones de PST sobre el puerto Prodeco (cercano a la estación Aeropuerto de CORPAMAG), lo que coincide con las altas concentraciones de la estación registradas durante los años 2005, 2006 y 2007 y que por lo tanto podrían ser asociadas a las emisiones del puerto por su cercanía al mismo.

Además de lo presentado en la Figura 33 a la Figura 35, los gráficos de torta que acompañan a las mismas e identificados con el número 3, muestran tanto la influencia de fuentes de origen natural (erosión), como la influencia de las emisiones de fuentes de origen industrial entre ellas el Puerto Prodeco. Lo anterior coincide con las posibles causas del incremento de las concentraciones en la estación Aeropuerto ubicada cerca del puerto de carbón, y expuestas en la primera parte de la discusión de resultados.

En otros casos, si bien no se encontraron similitudes precisas entre el modelo y las mediciones, si se observó que los valores fueron cercanos a los reportados por las estaciones de CORPAMAG. Estas diferencias probablemente estén asociadas a la ocurrencia de eventos puntuales durante los años estudiados, o a la presencia de fuentes que no fueron tenidas en cuenta en los datos de entrada del modelo.

Es de esperar que el transporte de partículas siga la dirección predominante del viento, que en este estudio ha sido determinada como viento del Noreste. Esto también afectaría la concentración registrada por algunas estaciones puesto que la ubicación de la fuente con la relación a la ubicación de la estación reduce el nivel de influencia de las emisiones de la fuente sobre las concentraciones registradas por la estación.

Este es el caso de las estaciones Don Jaca, Alcatraces y Zuana que no muestran influencia de las emisiones de los puertos y otras fuentes cercanas. El comportamiento descrito puede estar asociado probablemente a la dirección predominante proveniente del Noreste, que implica que la dispersión del contaminante ocurra hacia el Sur y por tanto no se vean reflejadas las concentraciones en los registros de las estaciones Don Jaca, Alcatraces y Zuana, dada su localización respecto a la dirección del viento.

Comparación de resultados del estudio con Norma colombiana vigente

Revisando los límites presentados en la Norma colombiana se registran incumplimientos de la norma anual $98.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en varias estaciones de monitoreo de CORPAMAG y años estudiados para el caso de PST, mientras que para MP_{10} el límite anual de la norma local ($49.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) solo es superado en el año 2014 en la estación Costa Verde.

No obstante, si comparo este resultado de MP_{10} y la media aritmética anual de las concentraciones diarias de MP_{10} de la Figura 16 y Figura 17 con normas internacionales, se encuentra que en su mayoría las concentraciones son superiores a límites internacionales, teniendo en cuenta que en países como México el límite anual es de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el límite anual indicado por la organización mundial de la salud es de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Es conveniente agregar que si bien, a la fecha en el caso de MP_{10} se cumple con la norma vigente la Resolución 2254 de 2017, la misma exige como límite para el año 2030 una concentración límite para MP_{10} de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aplicando este límite a las concentraciones obtenidas en el estudio se registrarían incumplimientos en los años 2009, 2012, 2013 y 2014 en la mayoría de las estaciones de CORPAMAG.

Por su parte las concentraciones resultantes del modelo AERMOD, muestran valores por encima de lo establecido por la norma de Colombia tanto para PST como para MP_{10} . En el caso de PST, tanto en la zona rural como en la zona urbana se observan concentraciones superiores al límite normativo. Para MP_{10} , el límite normativo es superado principalmente en la zona Sur y en menor medida en las zonas restantes.

Tanto para PST como para MP_{10} las fuentes que mayor aporte realizan a las concentraciones son las fuentes de origen industrial, en especial los puertos de carbón. Los gráficos de tortas con el aporte de cada fuente confirman mayor aporte de origen industrial que de origen natural.

También es preciso aclarar que hay casos en donde los mayores aportes para la zona urbana son de origen natural mientras que los mayores aportes en la zona rural son de origen industrial. Éste último es el caso de los años 2002, 2008, 2009, 2012, 2013 y 2014, lo cual es consecuente y coincide con la ubicación de la mayoría de las fuentes de emisión con impactos importantes en las concentraciones de PST.

Con el resultado del inventario de emisiones y la aplicación del modelo se observó menor impacto de las emisiones de origen vehicular sobre las concentraciones generales de MP₁₀, en comparación con las emisiones originadas por las fuentes fijas identificadas, probablemente por la cantidad de vehículos identificados por segmento de calle.

También es importante resaltar que hay mayor influencia de las emisiones de origen vehicular sobre las concentraciones de la zona urbana que sobre las concentraciones del área rural, lo anterior es esperable, teniendo en cuenta que el mayor flujo vehicular se encuentra en la zona urbana.

Los resultados de las concentraciones presentados en el capítulo de concentraciones de PST y MP₁₀, y los resultados de las concentraciones del capítulo de modelado de las emisiones muestran un comportamiento consecuente con los estudios desarrollados de material particulado en la zona evaluada, en donde se asocia la influencia de las operaciones de la industria carbonífera con las concentraciones de material particulado (Camargo y Pérez, 2009; Vergara y García, 2013; Candanoza et al., 2013).

Los modelos de dispersión son instrumentos de apoyo en la vigilancia de la calidad ambiental y de protección de la salud pública, y son útiles en el campo de la prevención y mitigación de la contaminación. En ese contexto, los resultados de la modelación para dos escenarios sugieren que reducciones del 40% de las emisiones de PST y MP₁₀ provenientes de los puertos de carbón, representan una disminución de ~42% en las concentraciones de la zona urbana estudiada, con efectos importantes en zonas cercanas al límite de la norma para ambos contaminantes, se obtuvieron concentraciones que pasaron de 198 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 101 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PST y de 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP₁₀.

Por otro lado el modelo muestra que algunas estaciones podrían reubicarse con el objeto de cuantificar con mayor precisión los efectos de potenciales fuentes de contaminación sobre la calidad del aire. Por ejemplo las estaciones Alcatraces, Don Jaca y Zuana no muestran influencia de las fuentes potenciales de emisión de material particulado por su ubicación respecto a la dirección predominante del viento. En base a esto, se debería tener en cuenta además de la ubicación de las fuentes, la dirección predominante del viento y de esta manera poder contar con registros más acertados.

8. LIMITACIONES DEL ESTUDIO-CONSIDERACIONES PARA EL FUTURO

Para futuros estudios es necesario considerar las limitaciones durante el desarrollo del proyecto.

Las limitaciones de este trabajo se encuentran asociadas a la omisión de algunas fuentes de emisión, como las empresas productoras de cemento, por falta de información, y al origen de la información meteorológica, ya que se utilizó información tomada de una estación cercana a la zona de estudio, pero no dentro de ella.

Otra limitación del estudio es la asociada a la información de emisiones utilizada para alimentar el modelo. Las emisiones anuales obtenidas del inventario se llevaron de kg/año a g/s para las fuentes puntuales, escalando el tiempo, tomando una producción anual homogénea en el tiempo sin contemplar picos de producción durante el año o día específico. Del mismo modo se llevaron las emisiones correspondientes de fuentes de área incluyendo las vehiculares a g/s.m^2 , por lo tanto el enfoque dado al trabajo no permitió contemplar picos en las actividades ni identificar posibles hotspots de emisiones.

9. CONCLUSIONES

El análisis de las concentraciones de las estaciones de CORPAMAG, mostró que para PST los meses en los cuales las estaciones presentaron mayor número de determinaciones con excedencias al valor de referencia ($98.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), fueron febrero, marzo y abril. Para MP_{10} el mayor número de mediciones con excedencias sobre el nivel de referencia ($49.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se presentó en febrero y marzo. Los clústeres confirman la formación de grupos homogéneos en función de la época del año, predominando la formación de grupos para los meses de enero, febrero, marzo y abril, con menores registros de precipitaciones o período seco, y la formación de grupos para los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, en su mayoría correspondiente a la época del año considerada como período lluvioso.

En base al análisis de los promedios geométricos y aritméticos anuales de las concentraciones diarias, se observó que para PST la norma anual colombiana fue superada en los años 2000 a 2007 y 2014. Las estaciones en donde se superó el límite de dicha norma fueron Aeropuerto, CAJAMAG, Centro Ejecutivo e INVEMAR ubicadas al norte de la ciudad. Para MP_{10} solo hubo excedencia en el límite anual en la estación Costa Verde ubicada al sur de la ciudad en el año 2014.

Los resultados del inventario de emisiones indican que las principales actividades antrópicas que contribuyen a la emisión de material particulado, son las actividades de carga y descarga de carbón, manejo y almacenamiento de carbón y disposición final de residuos sólidos, y en menor medida extracción de materiales, las fábricas de aceite vegetal y el tráfico vehicular. Las principales actividades de origen natural que contribuyen a la emisión de material particulado son la erosión y desnudamiento de cerros. En el caso de MP_{10} se obtuvo mayor valor en las emisiones de origen natural, mientras que para PST se obtuvo mayores emisiones de origen antrópico, el resultado sobre las emisiones de PST se atribuye principalmente a la influencia de las actividades de carga y descarga de los puertos de carbón consideradas sobre las emisiones estimadas para PST.

Acorde con la aplicación del modelo y en función de las condiciones meteorológicas, tanto para el MP_{10} como para las PST, la comuna mayormente influenciada fue principalmente aquella ubicada en zona rural, aunque también se evidencia la influencia sobre las comunas ubicadas en la zona urbana. Los años que mostraron mayores concentraciones de ambos grupos de

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

contaminantes fueron los años 2008, 2010 y 2014, posiblemente asociadas a la ocurrencia de eventos puntuales o incrementos en las actividades de exportación de carbón, y a los incendios forestales ocurridos en al 2014 en la región, informados por CORPAMAG.

Las fuentes con mayor influencia sobre las emisiones de PST son las fuentes de origen industrial con una contribución del 60% de las emisiones, principalmente debida a los puertos de carbón y en menor medida contribuyen en las concentraciones de PST, fuentes como canteras y el Relleno Sanitario.

Para el caso de MP_{10} la concentración varía acorde a la zona, en zona urbana las mayores concentraciones son aportadas por las emisiones de origen vehicular, con una contribución del 80% del total de las emisiones; mientras que las mayores concentraciones en zona rural se atribuyen al aporte de las fuentes fijas con $\sim 85\%$ del total de las emisiones.

Como resultado de la modelación a partir del inventario de emisiones, las zonas mayormente afectadas por las emisiones de PST y MP_{10} , corresponden con las zonas cercanas a las actividades desarrolladas por los puertos de carbón, lo que coincide con los resultados mostrados por las mediciones de las estaciones de CORPAMAG, cuyos registros más altos se presentan en la mayoría de los casos en las estaciones ubicadas cerca de los puertos de carbón.

El resultado de la validación del modelo muestra que las concentraciones resultantes del modelo tienen una distribución similar a la distribución de las concentraciones medidas en la zona de estudio en la mayoría de las estaciones.

Finalmente con los resultados y conclusiones del estudio se observó que las zonas en donde se desarrollan actividades coinciden en su mayoría con las zonas en donde los registros de las estaciones de CORPAMAG superaron la norma anual de PST, es el caso de las estaciones de CAJAMAG, Centro Ejecutivo, Aeropuerto e INVEMAR, las dos primeras estaciones influenciadas por la construcción de un almacén, y las dos últimas por la presencia de dos puertos de Carbón, Prodeco y Sociedad Portuaria. Adicionalmente se encontró coincidencia entre las estaciones con los mayores registros de concentraciones para MP_{10} y la presencia de actividades en estas zonas, actividades como el tráfico vehicular y la presencia de los puertos de Carbón Drummond y Ex Vale.

De la misma manera con el inventario de emisiones de la zona y la modelación de las emisiones del inventario se comprobó que las fuentes que contribuyen en mayor medida con las emisiones de PST y MP₁₀ corresponden con las actividades desarrolladas en la zona costera que están asociadas con las altas concentraciones en las estaciones de CORPAMAG. Para PST la modelación mostró que las actividades de origen industrial contribuyen con el 60% de las emisiones debidas principalmente a la presencia de los puertos de Carbón y para el caso de MP₁₀, la correspondencia entre las emisiones de origen vehicular y las emisiones aportadas por las fuentes fijas como los puertos de Carbón muestran la influencia de las emisiones de estas actividades sobre las concentraciones de las zonas donde se encuentran las estaciones.

Por último con la modelación de las emisiones del inventario, se comprobó además que reducciones en las emisiones de las actividades registradas contribuyen a la disminución significativa de las concentraciones en las zonas donde están ubicadas las estaciones de CORPAMAG, lo que muestra que la Hipótesis planteada “Las actividades desarrolladas en la zona costera del departamento del Magdalena influyen de manera significativa sobre las concentraciones de material particulado PST y MP₁₀ registradas por la red de calidad del aire de CORPAMAG, representando un riesgo para la salud pública y el ambiente en general de la zona”, es correcta. Complementando lo anterior se encontraron estaciones en donde la norma anual de PST fue superada en más de una ocasión y estaciones en donde la norma anual de MP₁₀ también fue superada en una ocasión, y teniendo en cuenta que este último contaminante muestra concentraciones superiores a las indicadas por la Organización Mundial de la salud (20 µg/m³) se puede decir que el nivel de concentraciones registrado representa un riesgo para la salud pública y del medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agencia Europea de Medio Ambiente (2013). Guía EMEP / EEA Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos. Orientación Técnica para preparar inventarios nacionales de emisiones. Informe Técnico EEA N° 12 de 2013. Luxemburgo.
2. Alonso, S. (2007). Caracterización de las intrusiones de polvo africano en Canarias. Memoria presentada para optar al grado de doctor en ciencias físicas. Universidad de la Laguna. Tenerife, España. 396p. Obtenido el 01 de junio de 2016 de http://izana.aemet.es/publications/TESIS_SILVIA_ALONSO_PEREZ.pdf.
3. Alvarado, G. (2010a). Estudio integrado de factores que influyen sobre la contaminación atmosférica por material particulado respirable de Pudahuel. Tesis para optar al Grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 2010a. 117p. Obtenido el 18 de julio de 2016 de <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Alvarado,%20Gerardo.pdf>.
4. Álvarez, H. (2015). Técnicas experimentales IV (avanzadas): Conceptos de estadística. 52p. Universidad Santiago de Compostela. Obtenido el 20 de abril de 2018 de <http://www.usc.es/genp/docencia/ConceptosDeEstadistica.pdf>.
5. Álvarez, L. & Salazar, A. (2013). Síntomas respiratorios y función pulmonar en niños de 6 a 14 años de edad y su relación con la contaminación por material particulado PM10 en Santa Marta- Colombia [Versión electrónica]. Rev Esp Salud Pública, 87(3), 239–46.
6. Ambiental Consultores. (2010, Abril). Modificación del Plan de Manejo Ambiental Proyecto Puerto Río Córdoba: Capítulo 3 Caracterización del área de Influencia del proyecto. Bogotá (Colombia). Documento Interno no publicado.
7. Archila A. y Ortiz C. 2004. Factibilidad para el montaje y puesta en marcha de una planta extractora de los aceites de la fruta de palma africana en el municipio de sabana de Torres (Santander – Colombia). Universidad Industrial de Santander. Obtenido el 20 de abril de 2017 de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/11023/2/116834.pdf>.
8. Arciniegas, A., Rodríguez, C., Pachón, J., Sarmiento, H. & Hernández, L. (2004). Estudio de la morbilidad en niños menores a cinco años por enfermedad respiratoria aguda y su relación con la concentración de partículas en una zona industrial de la ciudad de Bogotá [Versión electrónica]. Acta Nova, 3(2), 145–54.
9. Arciniegas, C. (2011). Diagnóstico y Control De Material Particulado: Partículas Suspendidas Totales y Fracción Respirable PM₁₀. Luna Azul, 34, 195-213.
10. Arciniégas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀ [Versión electrónica]. Luna Azul, 34, 195–213.
11. Armenta, M., Camargo, L. & Vélez-Pereira, A. (2017). Modelación de la Producción de metano en el Relleno Sanitario Parque Ambiental Palangana (Santa Marta. [Versión electrónica]. Ingeniería. Investigación y Tecnología, 18(2), 183-192.
12. Armesto, A. & Lobo, R. (2014). Evaluación de la concentración de partículas PM₁₀ en zona urbana del municipio de Ocaña [Versión Electrónica]. Ingenio Ufpso, 7, 133–41.

13. Arrieta, A. (2016). Dispersión de material particulado (PM₁₀), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. [Versión Electrónica]. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, 16 (2), 43-54.
14. Baró, R. (2013). Caracterización del origen de los eventos extremos de contaminación atmosférica sobre la península ibérica mediante análisis multivariante de una simulación de calidad de aire-clima. 74p. Universidad Politécnica de Cartagena. Obtenido el 23 de Julio de 2017 de <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/3763/tfm236.pdf?sequence=1>.
15. Begum, B., Hopke P. & Markwitz, A. (2013). Air pollution by fine particulate matter in Bangladesh [Versión electrónica]. Atmospheric Pollution Research, 4, 75–86.
16. Bravo, H., Sosa Echeverria, R., Sánchez Álvarez, P. & Krupa, S. (2013). Air Quality Standards for Particulate Matter (PM) at high altitude cities [Versión electrónica]. Environmental Pollution, 173, 255–6.
17. Cámara de Comercio de Santa Marta, Aspectos Geográficos. Medio Ambiente. (2016). Obtenido el 01 de julio de 2016 de http://www.ccsm.org.co/es/camara/inst/magdalena/medio_ambiente.php.
18. Camargo, Y. & Pérez, P. (2009). Partículas Suspendidas Totales en el aire de la Zona Costera del Departamento del Magdalena-Colombia [Versión electrónica]. Revista Inge-CUC, 5(5), 43–54.
19. Candazona, S., Goribar, L. & García F. (2013). Relación partículas respirables (PM₁₀)/ partículas suspendidas totales (PST) en Santa Marta (Colombia) [Versión electrónica]. Dyna, 179, 157–64.
20. Cárdena, H. (2009). Consideraciones del material particulado en Bogotá. Alternativas tecnológicas de medición de la calidad del aire [Versión electrónica]. Tecnura, 25, 104–15.
21. Centro de Control de Calidad del Aire. Informe Anual Calidad del Aire Región de Murcia. (2012). La calidad del aire en la comunidad autónoma de la región de Murcia. Murcia, España. 65p. Obtenido el 01 de junio de 2016 de https://www.murcia.es/c/document_library/get_file?uuid=a2fbd0fb-981a-4c1b-b723-36a64b3b5aec&groupId=11263.
22. Chang, J. & Hanna, S. (2004). Air quality model performance evaluation. [Versión electrónica]. Meteorology and Atmospheric Physics, 87, 167–196.
23. Chile. Ministerio de Medio Ambiente. (2012). Contaminación del Aire. Santiago, Chile. 68p. Obtenido el 01 de junio de 2016 de http://www.mma.gob.cl/1304/articulos-52016_Capitulo_1.pdf.
24. Colombia. Congreso de Colombia (1973). Ley 23 de 1973. Bogotá. 3p.
25. Colombia. Congreso de Colombia (1979). Ley 9 de 1979. Bogotá. 84p.

26. Colombia. CORPAMAG - Corporación Autónoma Regional del Caribe. (2015). Información ambiental. Aire. Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire -SVCA- del Departamento del Magdalena. Obtenido el 25 de marzo de 2016 de <http://www.corpamag.gov.co/index.php/es/informacion-ambiental/aire>.
27. Colombia. CORPAMAG - Corporación Autónoma Regional del Magdalena e IC&C - Instituto de Capacitación y Consultoría Ltda. (2002). Caracterización del Departamento del Magdalena por Unidades Fisiográficas. 221p. Documento Interno.
28. Colombia. CORPAMAG – Corporación Autónoma Regional del Magdalena. 2000-2014. Informe mensual de resultados Red de Monitoreo de Calidad del Aire enero-diciembre. 1244p. Obtenido el 02 de marzo de 2017 de <http://www.corpamag.gov.co/>.
29. Colombia. CORPAMAG-Corporación Autónoma Regional del Caribe. (2015). Información Ambiental. Aire. Sistema de vigilancia de la calidad del aire -SVCA- del departamento del Magdalena. Obtenido el 25 de marzo de 2016 de <http://www.corpamag.gov.co/index.php/es/informacion-ambiental/aire>.
30. Colombia. CORPAMAG - Corporación Autónoma Regional de Magdalena. (2016). Comunicación escrita 1700-12-01- 0011396 del 25 de mayo de 2016, Respuesta a Solicitud de Información Radicado Corpamag 2622 de 2016.
31. Colombia. CORPAMAG - Corporación Autónoma Regional de Magdalena. (2016). Comunicación escrita 1700-12-01 – 0022098 del 25 de julio de 2016, Respuesta radicado N° 4233 de junio 07 de 2017.
32. Colombia. CORPAMAG - Corporación Autónoma Regional de Magdalena. (2016). Resolución 2971 de 2016. 14p. Santa Marta.
33. Colombia. DANE - Departamento Nacional de Planeación. (2011). Visión de Desarrollo Territorial Departamental Visión Magdalena 2032: Un mundo de oportunidades. Obtenido el 25 de marzo de 2016 de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Territorial/VISION%20MAGDALENA.pdf>.
34. Colombia. Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional. Universidad de Los Andes. (2014). Productos Analíticos para apoyar la toma de Decisiones sobre acciones de Mitigación a nivel sectorial. Bogotá, Colombia. 46p. Obtenido el 08 de agosto de 2016 de http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/estudios_de_costos_de_abatimiento/capitulos_sectoriales_/Transporte_Doc.pdf.
35. Colombia. IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2009). Temperatura, Evaporación, Precipitación, Dirección y Velocidad del Viento. Consulta Oficinas del IDEAM Santa Marta, Colombia. Documento Interno.
36. Colombia. IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2012). Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010. Publicación aprobada por el comité de comunicaciones y publicaciones del IDEAM. Bogotá. 311p. Obtenido el 01 de junio de 2016 de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022433/CALIDADDELAIREWEB.pdf>.

37. Colombia. IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2002). Guía para la utilización de Modelos de la Calidad del Aire. 36p. Bogotá. Obtenido el 20 de abril de www.documentacion.ideam.gov.co.
38. Colombia. IGAC-Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2009). Subdirección de Agrología Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras: departamento del Magdalena, escala 1:100.000. 2009. Obtenido el 02 de Agosto de 2016 de http://geoportal.igac.gov.co:8888/siga_sig/Agrologia.seam.
39. Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Diagnóstico de Salud Ambiental. Bogotá. 368p. Obtenido el 01 de junio de 2016 de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf>.
40. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2006). Resolución 601 de 2006. Bogotá. 130p.
41. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Resolución 610 de 2010. Bogotá. 8p.
42. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Resolución 650 de 2010. Bogotá. 1p.
43. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Resolución 2154 de 2010. Bogotá. 2p.
44. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Resolución 651 de 2010. Bogotá. 3p.
45. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Resolución 2254 de 2017. Bogotá. 11p.
46. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de operación de sistemas de Vigilancia de la calidad del aire. Bogotá. 2010. 141p.
47. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Protocolo para el control y Vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. 99p. Bogotá. Obtenido el 20 de abril de 2018 de [http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/docs/12-3-2012-0-21-6-396-1-1Protocolo para el control y vigilancia de la contaminaci%F3n atmosf%29rica generada por fuentes fijas.pdf](http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/docs/12-3-2012-0-21-6-396-1-1Protocolo%20para%20el%20control%20y%20vigilancia%20de%20la%20contaminaci%F3n%20atmosf%29rica%20generada%20por%20fuentes%20fijas.pdf).
48. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de Gases de Efecto Invernadero. Capítulo 7. Módulo de incertidumbre. 340p. Obtenido el 20 de abril de 2018 de http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Inventario_del_GEI_2000_-_2004/CAP.7_MODULO_DE_INCERTIDUMBRE.pdf.
49. Colombia. Ministerio de Medio Ambiente (1995). Decreto 948 de 1995. Bogotá. 57p.
50. Colombia. Ministerio de Salud (1982). Decreto 02 de 1982. Bogotá. 40p.

51. Colombia. Presidencia de la República de Colombia (1974). Decreto Ley 2811 de 1974, Código de Recursos Naturales Renovables. Bogotá. 244p.
52. Colombia. Secretaría Distrital de Ambiente. (2010). Informe trimestral de calidad del aire de Bogotá. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB. Informe primer trimestre sobre niveles de concentración de contaminantes, 2010. Bogotá. 115p. Obtenido el 01 de junio de 2016 de http://institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Calidad_Aire_Bogota/Calidad_Aire_Bogota_Informe_Trimestre_1-SDA-2010.pdf.
53. Colombia. Sociedad Portuaria de Santa Marta. (2016). Programación de Motonaves. Obtenido el 2 de marzo de 2016 de <http://www.spsm.com.co/PuertoLinea/Programacion.aspx>.
54. Colombia. Superintendencia de puertos y transporte. (2010). La logística Portuaria. Obtenido el 8 de marzo de 2018 de <http://www.supertransporte.gov.co/documentos/2014/delegada%20puertos/caracterizacion%20puertos/LOGISTICA%20PORTUARIA.pdf>
55. Colombia. Aeronáutica Civil. Unidad Administrativa Especial. (2014). Reunión Mensual CDM. Obtenido el 19 de mayo de 2016 de <http://www.aerocivil.gov.co/atencion/control/Documents/>
56. Colombia. Unidad de Transito y Transporte de Santa Marta. (2016). Comunicación escrita. Oficio N° 2920 Respuesta solicitud radicado 6576 de fecha 12 de agosto de 2016.
57. Colombia. UPME - Unidad de Planeación Minero Energética. (2005). La cadena del Carbón. El carbón colombiano fuente de energía para el mundo. 52p. Bogotá. Obtenido el 20 de abril de 2018 de http://www.upme.gov.co/docs/cadena_carbon.pdf.
58. Colombia. UPME - Unidad de Planeación Minero Energética. (2003). Línea Base para proyectos de transporte masivo. 27p. Bogotá. Obtenido el 01 de Junio de 2016 de <http://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1285/12/11%20linea%20base%20para%20proyectos%20transporte%20masivo.pdf>.
59. Colombia. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. (2013). Evaluación ambiental del impacto causado por la barcaza TS-115 en el área de anclaje de Puerto Drummond, Ciénaga Magdalena, Caribe colombiano. Santa Marta. 406p. Obtenido el 05 de abril de 2016 de <http://www.drummondltd.com/wp-content/uploads/3.-InformeFinalUJTL-Completo.pdf>.
60. Colombia. Universidad Nacional de Colombia. (2012). Informe final partículas, gases y meteorología. Bogotá, 255p. Obtenido el 01 de junio de 2016 de <http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/lsdocCalidadAire/Informe%20Final%20Red%20de%20Aire.pdf>.
61. Colombia. Universidad Pontificia Bolivariana. (2006). Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas en el Valle de Aburrá, Manual del usuario convenio 323 de 2005. 100p. Obtenido el 20 de Abril de 2018 de <http://www.sabaneta.gov.co>.
62. CONAMA-Congreso Nacional del Medio Ambiente (2014). Estudio del efecto directo de

- los aerosoles atmosféricos sobre Europa. Universidad de Murcia. España. Obtenido 02 de junio de 2016 de <http://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/CT%202014/1896711693.pdf>. 22/10/2016.
63. Cruz, M., Gómez, A., Quintero, M. & Varela, J. (2013). Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (pb, cd, ni, cu, cr) en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, durante un periodo anual [Versión electrónica]. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(4), 269–83.
 64. De la Fuente, S. (2011). *Análisis de Conglomerados (Clusters)*. 76p. Universidad Autónoma de Madrid. Obtenido el 01 de Junio de 2018 de http://www.estadistica.net/Master-Econometria/Analisis_Cluster.pdf.
 65. Doria, C. & Fagundo, J. (2016). Caracterización Química de Material Particulado PM₁₀ en la atmósfera de la Guajira Colombia. [Versión electrónica]. *Revista Colombiana de Química*, 45 (2), 19-29.
 66. Diamantopoulou, M., Skyllakou, K. & Pandis, S. (2016). Estimation of the local and long-range contributions to particulate matter levels using continuous measurements in a single urban background site [Versión electrónica]. *Atmospheric Environment*, 134, 1-9.
 67. Díaz, H. & Causado, E. (2007). La insostenibilidad del desarrollo urbano: El caso de Santa Marta – Colombia [Versión electrónica]. *Clío América*. 1, 61–100.
 68. Diez, S., Barra, E., Crespo, F. & Britch J. (2014). Uncertainty propagation of meteorological and emission data in modeling pollutant dispersion in the atmosphere. *Ingeniería e Investigación*, 34(2), 44-48.
 69. Duarte, I. (2015). *Cantera de extracción de piedra- adecuación ambiental*. 37p. Alto Paraná. Paraguay. Obtenido el 22 de abril de 2018 de http://www.seam.gov.py/sites/default/files/users/control/cantera_isabalino_myrian.pdf
 70. E. Sá, Martins, H., Ferreira, J., Marta-Almeida, M. & Rocha, A. (2016). Climate change and pollutant emissions impacts on air quality in 2050 over Portugal [Versión electrónica]. *Atmospheric Environment*, 131, 209–24.
 71. Estados Unidos. EPA- Environmental Protection Agency. (2004). *AERMOD: Description of Model Formulation*. 91p. Obtenido el 01 de noviembre de 2017 de https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf.
 72. España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2016). *Calidad y evaluación ambiental. Calidad del aire*. España. Obtenido el 01 de junio de 2016 de <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/>.
 73. Faber, P., Drewnick, F. & Borrmann, S. (2015). Aerosol particle and trace gas emissions from earthworks, road construction, and asphalt paving in Germany: Emission factors and influence on local air quality. *Atmospheric Environment*, 122, 662–671.
 74. Fernández, A. (2017). *Caracterización higroscópica del aerosol atmosférico mediante la técnica lidar Raman*. Tesis Doctoral. 305p. Universidad Complutense de Madrid.

Facultad de Ciencias Físicas de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I. Madrid, España. Obtenido el 16 de junio de 2018 de <http://eprints.ucm.es/44121/1/T39036.pdf>.

75. Ferreira, A., Amador, A., Procópio, M., Afonso P. & Nascimento, P. (2013). Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares nacida de de Itabira, Minas Gerais, Brasil [Versión electrónica]. *Cad. Saúde Pública*, Rio de Janeiro, 23, S570–S578.
76. Fonseca, M. (2012). Estudio del impacto en la calidad del aire de las fuentes puntuales en la ciudad de Pinar del Río [Versión electrónica]. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(1), 1–12.
77. Franco, J. (2012). Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá [Versión electrónica]. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 72, 193–204.
78. Gaitán, M., Cancino, J. & Behrentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá [Versión electrónica]. *Rev Ing*, (26), 81–92.
79. Garrido, A. & Camargo, Y. (2013). Distribución espacio- temporal de partículas suspendidas totales en la zona costera del departamento del Magdalena en el período 2006-2009 [Versión electrónica]. *Revista de Ciencias*, 18, 59–72.
80. Gaviria, C., Muñoz, J. & Gonzáles, G. (2012). Contaminación del aire y vulnerabilidad de individuos expuestos: un caso de estudio para el centro de Medellín [Versión electrónica]. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 30(3), 316–27.
81. Guajardo, N., Ramírez, A., Díaz, F., Castillo, E., Otero, A. & Parra, J. (2010). Concentración de las partículas totales suspendidas en la atmósfera de Caracas [Versión electrónica]. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 25, 81–91.
82. Hamby D.M. (2002). The Gaussian atmospheric transport model and its sensitivity to the joint frequency distribution and parametric variability. *Health Physics*, 82(1):6473.
83. Han, Y., Wu, Y., Wang, T., Xie, C. & Zhao, Kun. (2015). Characterizing a persistent Asian dust transport event: Optical properties and impact on air quality through the ground-based and satellite measurements over Nanjing, China [Versión electrónica]. *Atmospheric Environment*, 115, 304–16.
84. Hernández, A. & Rojas, N. (2013). Análisis de la variación espacial de los componentes del material particulado respirable en la zona carbonífera del Cesar. Grupo de Investigación Calidad del aire. Universidad Nacional de Colombia. 7p. Obtenido el 23 de Julio de 2017 de http://www.ing.unal.edu.co/grupos/calidad_aire/doc/2013/000.pdf.
85. Hidalgo, J. (2016). Episodios de contaminación por material particulado en Curicó y su relación con variables meteorológicas. Dirección Meteorológica de Chile, Sección de Investigación y Meteorología aplicada, Oficina de Estudios Meteorológicos. 77p. Obtenido el 20 de enero de 2018 de http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/341_INFORME_CURICO_J_H_DMC_folio_341_417.pdf

86. IGAC-Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2011. Zonificación de la degradación de suelos por erosión. Área continental de Colombia. Escala 1:100. Obtenido el 20 de abril de 2016 de http://geoportal.igac.gov.co:8888/siga_sig/Agrologia.seam.
87. Im, U., Bianconi, R., Solazzo, E, Kioutsioukis, I., Badia, A., Balzarini, A., et al.. (2015). Evaluation of operational online-coupled regional air quality models over Europe and North America in the context of AQMEII phase 2. Part II: Particulate matter [Versión electrónica]. *Atmospheric Environment*, 115,421–441.
88. INGETEC S.A. (2017). Modelo de dispersión de contaminantes “estructuración técnica de la primera línea del metro de bogotá (plmb), ubicado en el área urbana de bogotá, departamento de cundinamarca, para la empresa INGETEC S.A.194p. Bogotá. Obtenido el 20 de abril de 2018 de <http://www.metrodebogota.gov.co>.
89. Kanabkaew, T., Phiyachat, N. & Patcharakan, S. (2013). Preliminary Assessment of Particulate Matter Air Quality Associated with Traffic Emissions in Nakhon Si Thammarat, Thailand [Versión electrónica]. *Procedia Engineering*, 53, 179–184.
90. Ma, X. & Jia, H. (2016). Particulate matter and gaseous pollutions in three megacities over China: Situation and implication [Versión electrónica]. *Atmospheric Environment*, 140, 476–494.
91. Matus, P. & Lucero, R. (2002). Norma Primaria de calidad del aire [Versión electrónica]. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 18(2), 112–122.
92. México. INECC – Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}. México. Obtenido el 22 de octubre de 2016 de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>.
93. México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto y Recursos Naturales. (2013). Guía Metodológica para la estimación de emisiones de Fuentes Fijas. 146p. México. Obtenido el 20 de abril de 2018 de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/2F1AECB7E100DA9705257D4D005632DA/\\$FILE/Gu%C3%ADaMetodol%C3%B3gicaParaEstimaci%C3%B3neEmisiones.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/2F1AECB7E100DA9705257D4D005632DA/$FILE/Gu%C3%ADaMetodol%C3%B3gicaParaEstimaci%C3%B3neEmisiones.pdf).
94. México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2007). Calidad del aire y efectos a la salud. Obtenido el 01 de junio de 2016 de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/233/cap4.html>.
95. O. Raaschou-Nielsen, R., Beelen, M., Wang, G., Hoek, Z.J., Andersen, B., Hoffmann, et al.. (2016). Particulate matter air pollution components and risk for lung cancer. *Environment International*, 87, 66–73.
96. Oliveira, M., Slezakova, K, Delerue-Matos, C. & y Carmo, M. (2016). Assessment of air quality in preschool environments (3-5 years old children) with emphasis on elemental composition of PM₁₀ and PM_{2.5} [Versión electrónica]. *Environmental Pollution*, 214, 430–439.
97. Patino, E. (2013). En los 28 km entre Santa Marta y Ciénaga hay cuatro puertos. La sanción a la Drummond abre el debate ambiental. Periódico El Heraldo. Obtenido el 23

de Julio de 2017 de <https://www.elheraldo.co/economia/la-historia-sucia-del-carbon-137522>.

98. Pérez-Vidal, H., Lunagómez-Rocha, MA. & Acosta-Pérez, LI. (2010). Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM₁₀), en Cunduacán, Tabasco. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 26(2), 151–62.
99. Perry, S.G., Cimorelli, A.J., Paine, R.J., Brode, R.W., Weil, J.C., Venkatram, A., Wilson, R.B., Lee, R.F. & Peters, W.D. (2005). AERMOD: a dispersion model for industrial source applications. Part II: model performance against 17 field study databases. *J. Appl. Meteorol*, 44, 694-708.
100. Pinto, L. & Méndez, F. (2015). Evaluación del impacto en calidad del aire, asociado a la resuspensión de material particulado por la pavimentación de la vía principal de Caracolí, ciudad Bolívar, Bogotá D.C. 108p. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá. Obtenido el 01 de Abril de 2018 de http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/17998/41101095_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
101. Posada, P., Blanca Oliva y Henao P., William, 2008. Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 13, Santa Marta, 200 páginas.
102. Prabhat Kumar, R. (2016). Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring [Versión electrónica]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 129, 120–30.
103. Puliafito, S. E., Allende, D. G., Castesana, P. S. & Ruggeri, M. F. (2017a). High-resolution atmospheric emission inventory of the argentine energy sector. Comparison with edgar global emission database. *Heliyon*, 3(12), e00489. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00489df>
104. Puliafito, S. E., Allende, D. G., Pinto, S., & Castesana, P. (2015a). High resolution inventory of GHG emissions of the road transport sector in Argentina. *Atmospheric Environment*, 101, 303–311.
105. Puliafito, S. E., Castesana, P. S., Allende, D. G., Ruggeri, M. F., Pinto, S., & Gariglio, A. (2017b). Inventario argentino de emisiones atmosféricas del sector energético de alta resolución. parte I: aspectos metodológicos. In VI Congreso Bianual PROIMCA - IV Congreso Bianual PRODECA (pp. 1–10). Bahía Blanca. Retrieved from http://www.edutecne.utn.edu.ar/prodeca-proimca/prodeca-proimca_2017.html
106. Puliafito, S. E., Allende, D. G., Pinto, S., Werner, A., & Castesana, P. (2015b). Atlas argentino de emisiones de carbono debido al sector transporte. *Revista Proyecciones-UTN-FRBA*, 13(1), 31–46.
107. Puliafito E., Guevara, M., Puliafito, C., Gantuz, M. & Inzirillo, R. (2010). Contaminación por vehículos en Mendoza. Diagnóstico actual y pronóstico para el año 2010. Obtenido el 20 de marzo de 2018 de www.um.edu.ar.

108. Querol, X. (2006, Diciembre). Congreso Nacional del Medio Ambiente 8. Cumbre del Desarrollo Sostenible. El Material Particulado Atmosférico. Madrid, España. Obtenido el 22 de agosto de 2016 de http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/AEs/AE9/AE9_doc_XavierQuerol.pdf.
109. Querol, X. (2008). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales [Versión electrónica]. Rev. Esp Salud Pública, 82, 447–54.
110. Rojano, R., Angulo, L. & Restrepo, G. (2013). Niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM₁₀ y PM_{2.5} y su Relación en Lugares Públicos de la Ciudad Riohacha, Caribe Colombiano [Versión electrónica]. Información Tecnológica, 24(2), 37–46.
111. Romero, M., Olite, F. & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud [Versión electrónica]. Rev. Cubana Hig Epidemiol, 44, 1–14.
112. Ruiz, F. (2009). Estudio del efecto de la presencia de un relleno sanitario sobre la estructura de un ensamble de escarabajos coprófagos (coleóptera: scarabaeidae). 96p. Trabajo de Grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Obtenido el 22 de abril de 2018 de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/11860>.
113. Sánchez, H. (2015). Comportamiento espacial de las partículas suspendidas PM₁₀ y estrategias de gestión ambiental del aire en la zona metropolitana de Toluca, México. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca México. Obtenido el 20 de julio de 2016 de <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/49372>.
114. Shaughnessy, W., Venigalla, M. & Trump, D. (2015). Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population [Versión electrónica]. Atmospheric Environment, 123, 102–11.
115. Shih-Chun, C., Pao-Kuei, H., Tzu-Yao, W. & Chun-Hu, L. (2014). Variability of intra-urban exposure to particulate matter and CO from Asian-type community pollution sources [Versión electrónica]. Atmospheric Environment, 83, 6–13.
116. Sociedad Portuaria de Santa Marta, 2016. Programación de Naves. Disponible en: <http://www.spsm.com.co/PuertoLinea/Programacion.aspx>.
117. Stocker, J., Ellis, A., Smith, S., Carruthers, D., Venkatram, A., Dale, W., & Attree, M. (2015). A review of the limitations and uncertainties of modeling pollutant dispersion from non point sources. Cambridge Universidad de California. 164p. Obtenido el 20 de abril de 2018 de https://admlc.files.wordpress.com/2014/05/fm1019_cerc_admlc_final_mar16.pdf.
118. Suiza. Swisscontact - Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico. (2001). Programa Aire Puro. Monitoreo del Aire. Manual de Laboratorio. Suiza.
119. Colombia. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2009). Situación de la Disposición Final de Residuos sólidos en Colombia – Diagnóstico 2009. Obtenido el 9 de marzo de 2017 de <http://www.superservicios.gov.co/content/download/1259/16220>.
120. Tartakovsky D., Broday D., & Stern E. (2013). Evaluation of AERMOD and CALPUFF for predicting ambient concentrations of total suspended particulate matter (TSP)

- emissions from a quarry in complex terrain. *Environmental Pollution*, 179, 138-145.
121. Titos, G., Lyamani, H., Drinovec, L., Olmo, F.J. & Mocnik, G. (2015). Evaluation of the impact of transportation changes on air quality [Versión electrónica]. *Atmospheric Environment*, 114, 19–31.
 122. Toro, R., Morales R., Canales, M. & González-Rojas, C. (2014). Inhaled and inspired particulates in Metropolitan Santiago Chile exceed air quality standards. *Building and Environment*. 79, 115–23.
 123. Turtos, L., Sanchez, M., Rivero, J., Curbelo, L., Diaz, N. & Meneses, E. (2010). Methodological guide for implementation of the AERMOD system with incomplete local data, *Atmospheric Pollution Research*, 1(2), 102-111.
 124. Colombia. UPME - Unidad de Planeación Minero Energética. (2013). Plan de Abastecimiento de Gas Natural. Obtenido el 09 de marzo de 2017 de <http://www.sipg.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=LvhGrMv%2Bt3E%3D&tabid=38&language=es-CO>.
 125. Universidad de Valencia (2015). Introducción al Análisis Cluster. Consideraciones generales. 57p. Obtenido el 01 de Junio de 2018 de <https://www.uv.es/ceaces/multivari/cluster/CLUSTER2.htm>.
 126. Uribe, J. & Suarez, N. (2009). Evaluación de la calidad del aire del valle de Sogamoso, respecto a material particulado menor a 10 micras (PM₁₀), aplicando el modelo de dispersión aermod como herramienta de planificación. 263p. Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá. Obtenido el 08 de abril de 2018 de <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/15004>.
 127. Uruguay. Gesta Aire. (2012). Propuesta estándares calidad de aire. Uruguay. 9p. Obtenido el 01 de junio de 2016 de http://www.ciu.com.uy/innovaportal/file/42609/1/gesta_aire_web_dinama_calidad_aire.pdf.
 128. USEPA. (2008). Revision of Emission Factors for AP-42. Chapter 11: Mineral Products Industry. Section 11.9: Western Surface Coal Mining. Obtenido el 01 de Abril de 2009 de <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>.
 129. Vergara Vásquez, E. y García Rentería, F. (2013). Simulación de la dispersión del material particulado proveniente de actividades portuarias en Santa Marta. *Épsilon* (21), 41-55.
 130. Vergara, E. & García, F. (2013). Simulación de la dispersión del material particulado proveniente de actividades portuarias en Santa Marta [Versión electrónica]. *Épsilon*, 21, 41–55.
 131. Viana, M. (2003). Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias: introducción. Barcelona, 375p. Tesis (Doctor en ciencias geológicas). Universidad de Barcelona. Obtenido el 15 de octubre de 2016 de <http://www.tdx.cat/TDX-0216104-122033/>.
 132. Villegas, E., Carrera, J. & Ramos, S. (2013). Estudio de tendencia de la PM₁₀ y su

impacto a la salud en tres zonas metropolitanas de México durante 2005-2009 [Versión electrónica]. Kuxulkab Revista de Divulgación, 19, 5–12.

133. Zhao, Y. & Zhao, C. (2012). Concentration and Distribution Analysis of Heavy Metals in Total Suspended Particulates along Shanghai-Nanjing Expressway [Versión electrónica]. Procedia Environmental Sciences, 13. 1405–1411.
134. Zibert, J., Cedilnik, J. & Praznikar, J. (2016). Particulate matter (PM₁₀) patterns in Europe: An exploratory data analysis using non-negative matrix factorization. Atmospheric Environment, 132, 217–28.

APÉNDICE

TABLA DE CONTENIDO

APÉNDICE A: Concentraciones Diarias de PST distribuidas por año	iii
APÉNDICE B: Gráfico Medias Geométricas mensuales de las concentraciones diarias de PST y Medias Aritméticas Mensuales de las concentraciones diarias de MP ₁₀	vi
Medias Geométricas mensuales de las concentraciones diarias de PST	vi
Medias Aritméticas mensuales de las concentraciones diarias de MP ₁₀	x
APÉNDICE C: Clústeres Concentraciones de estaciones de PST y MP ₁₀	xii
Clústeres Concentraciones Estaciones PST	xii
Clústeres Concentraciones de Estaciones MP ₁₀	xvi
APÉNDICE D: Evaluación Meteorológica	xix
APÉNDICE E: Inventario de Emisiones y Modelación de dispersión de Contaminantes.....	xxi
Concentraciones PST	xxiv
Concentraciones MP ₁₀	xxv
APÉNDICE F: Incertidumbre	li

APÉNDICE A: Concentraciones Diarias de PST distribuidas por año

Concentraciones Diarias año 2000

Para el año 2000 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación INVEMAR los días 05 de enero, 22 de febrero y 07 de octubre con concentraciones de 290.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 345.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 343.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron el 01 de febrero y 20 de agosto en las estaciones Batallón y Alcatraces con concentraciones de 8.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 14.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2001

Para el año 2001 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación INVEMAR los días 05 de febrero y 02 febrero con concentraciones de 372 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 337.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron el día 12 de octubre y 06 de septiembre en las estaciones Alcatraces y Aeropuerto respectivamente con concentraciones de 12.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 11.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Concentraciones Diarias año 2002

Para el año 2002 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación INVEMAR los días 20 de octubre, 14 de mayo, 9 de marzo, 31 de julio, 23 de octubre y 14 de septiembre con concentraciones de 598.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 452.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 393.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 381.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 341.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 339.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron el 17 y 29 de octubre en las estaciones Alcatraces y Batallón con concentraciones de 19.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 17.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2003

Para el año 2003 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación INVEMAR los días 28 de diciembre, 19 de julio y 31 de diciembre, con concentraciones de 338.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 302.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 302.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones más bajas se registraron el 25 de julio y 04 de diciembre en las estaciones Aeropuerto y Don Jaca con concentraciones de 16.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 16.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2004

Para el año 2004 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación INVEMAR los días 21, 09 y 03 de enero, con concentraciones de 347.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 325.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 304.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron el 29 de mayo y 10 de noviembre en las estaciones Alcatraces y Batallón con concentraciones de $13.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $12.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Concentraciones Diarias año 2005

Para el año 2005 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación Centro Ejecutivo los días 22 de septiembre, 28 de septiembre y 07 de octubre, con concentraciones de $473.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $430.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $308.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron el 21 de noviembre y 08 de agosto en las estaciones Batallón e INVEMAR con concentraciones de $18.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $18.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2006

Para el año 2006 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación Aeropuerto y Centro Ejecutivo los días 29 de enero y 12 de agosto, con concentraciones de $525 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron el 13 de junio y 14 de mayo en la estación Alcatraces con concentraciones de $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2007

Para el año 2007 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación Aeropuerto los días 23 de febrero y 14 de febrero, con concentraciones de $369.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $302.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron los días 28 de agosto y 14 de noviembre en la estación Alcatraces con concentraciones de $27.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2008

Para el año 2008 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación Aeropuerto los días 07 de enero y 22 de enero, con concentraciones de $251.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $245.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron los días 02 de noviembre y 28 de agosto en la estación Don Jaca con concentraciones de $15.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2009

Para el año 2009 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación INVEMAR los días 11 de marzo y 02 de marzo, con concentraciones de $208 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $167.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron los días 12 de junio y 15 de junio en la estación Aeropuerto con concentraciones de $19.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2010

Para el año 2010 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación Centro Ejecutivo e INVEMAR los días 19 de febrero y 06 de agosto, con concentraciones de 151.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 148.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron los días 14 y 23 de septiembre en la estación Alcatraces y Aeropuerto con concentraciones de 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 17.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2011

Para el año 2011 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación INVEMAR y Centro Ejecutivo los días 05 de Junio y 29 de diciembre, con concentraciones de 186.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 164.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron los días 18 de octubre y 06 de septiembre en la estación Don Jaca y Alcatraces con concentraciones de 23.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 19.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2012

Para el año 2012 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación INVEMAR y Alcatraces los días 06 y 18 de Febrero, con concentraciones de 179.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 173.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron los días 18 de abril y 08 de junio en la estación Aeropuerto y Batallón con concentraciones de 24.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 20.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2013

Para el año 2013 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación Don Jaca y Batallón los días 14 de Marzo y 21 de julio, con concentraciones de 176.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 170.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron los días 30 de noviembre y 16 de octubre en la estación Centro Ejecutivo y Batallón con concentraciones de 28.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 28.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Concentraciones Diarias año 2014

Para el año 2014 las concentraciones diarias más altas se presentaron en la estación INVEMAR y Batallón los días 25 de julio y 10 de febrero, con concentraciones de 227.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 212.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron los días 04 de noviembre y 14 de octubre en la estación Batallón y Centro Ejecutivo con concentraciones de 20.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 18.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

APÉNDICE B: Gráfico Medias Geométricas mensuales de las concentraciones diarias de PST y Medias Aritméticas Mensuales de las concentraciones diarias de MP₁₀

Medias Geométricas mensuales de las concentraciones diarias de PST

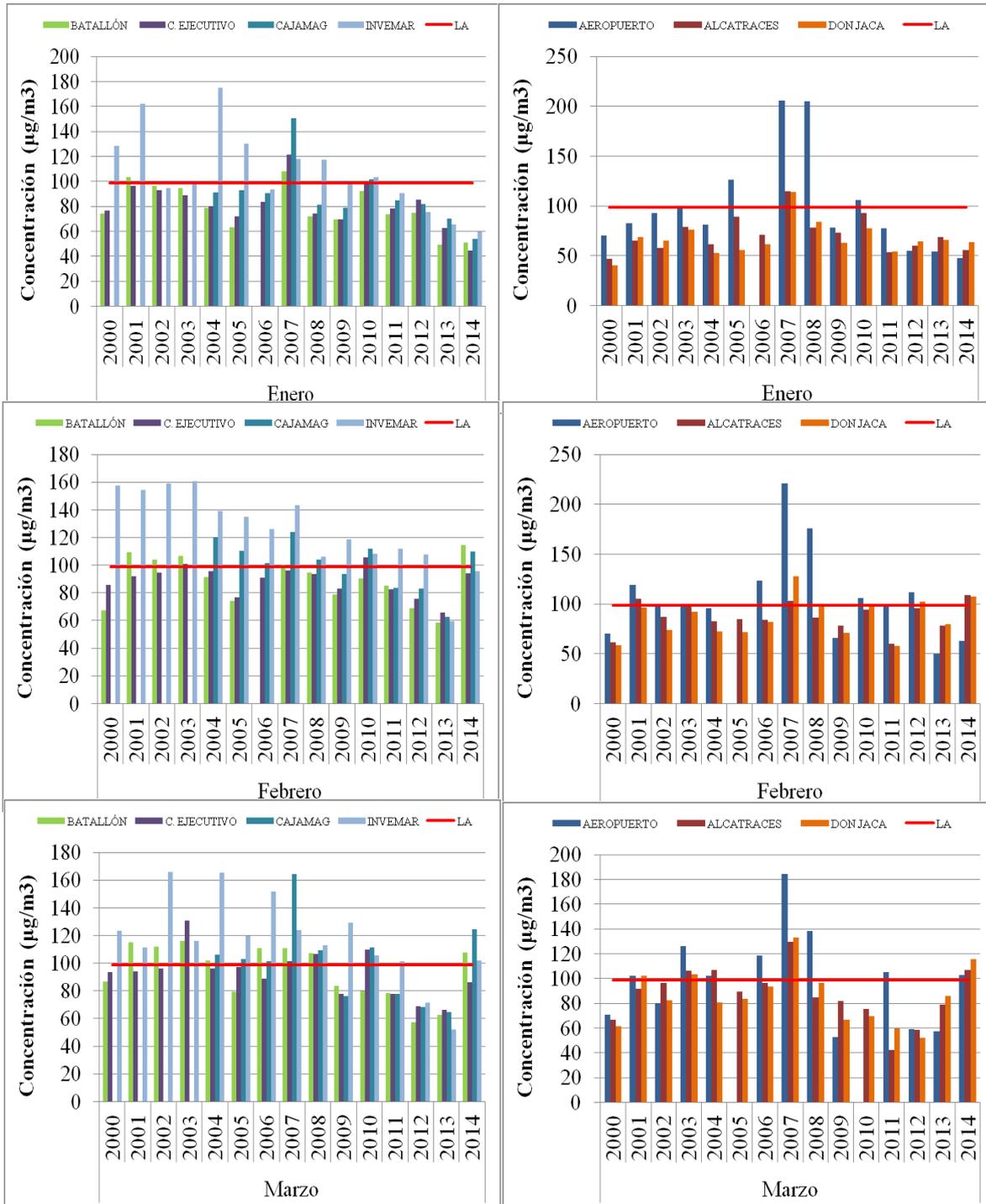


Figura 1. Media geométrica mensual de las concentraciones diarias de partículas suspendidas totales primer trimestre.

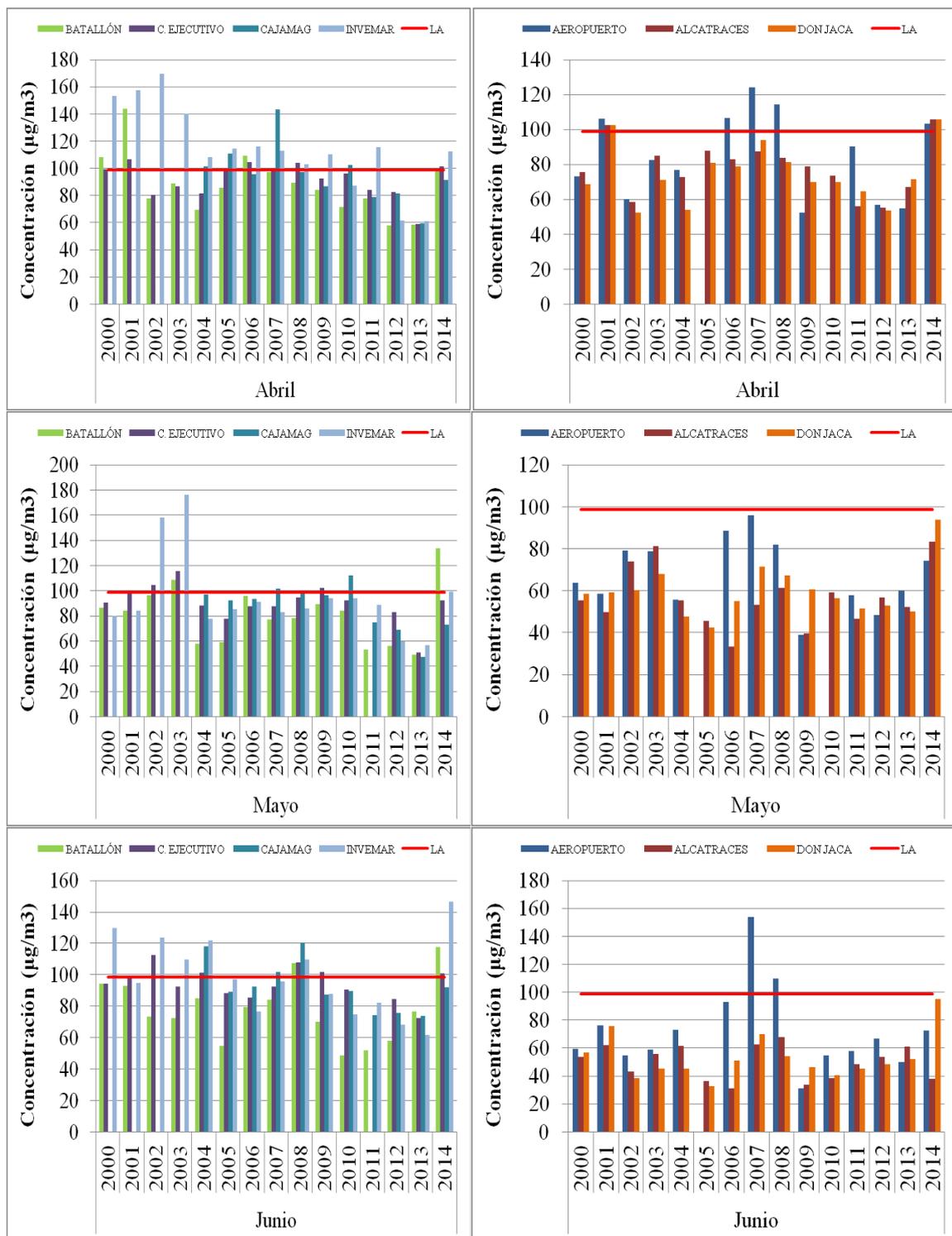


Figura 2. Media geométrica mensual de las concentraciones diarias de partículas suspendidas totales segundo trimestre

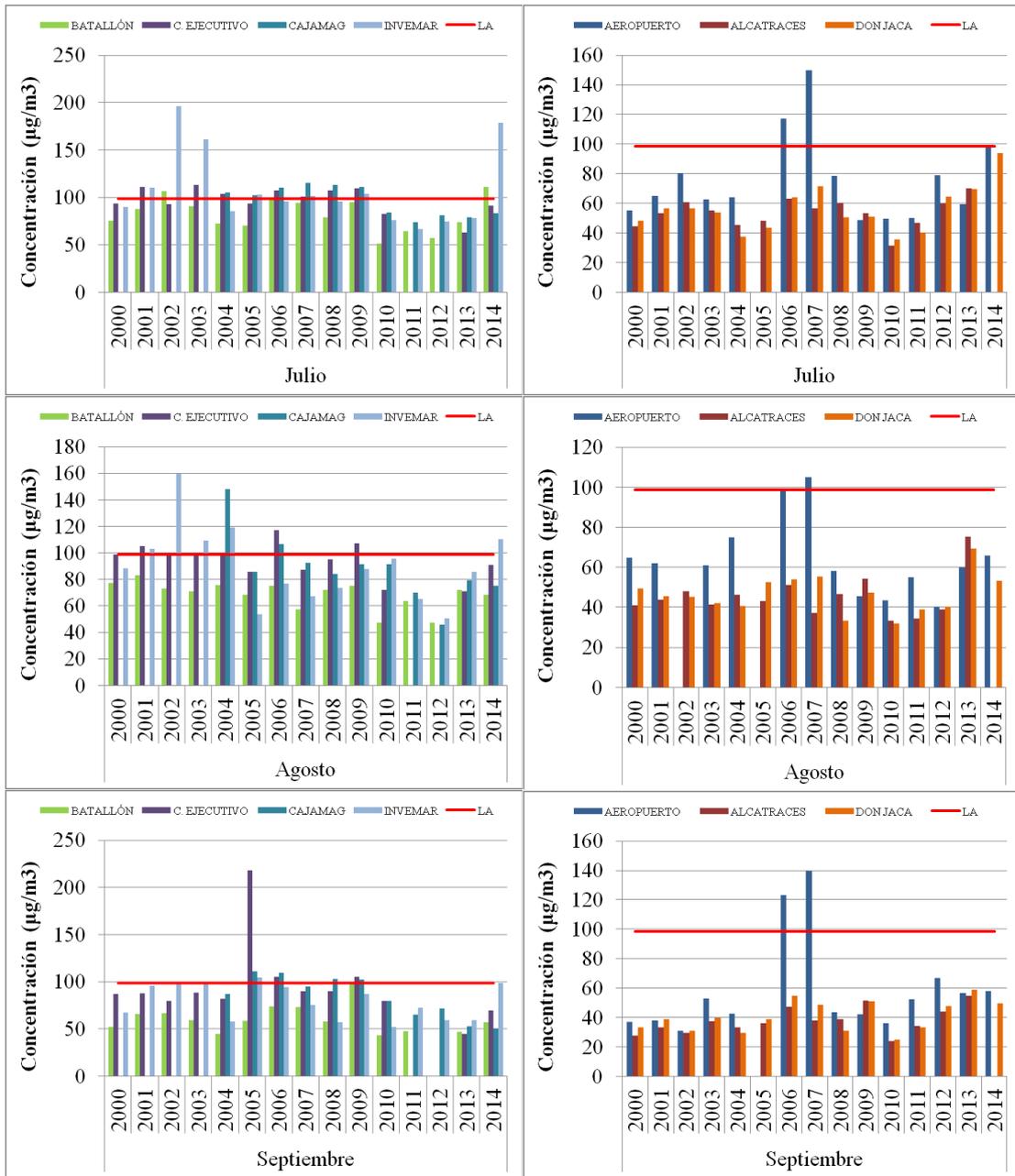


Figura 3. Media geométrica mensual de las concentraciones diarias de de partículas suspendidas totales tercer trimestre

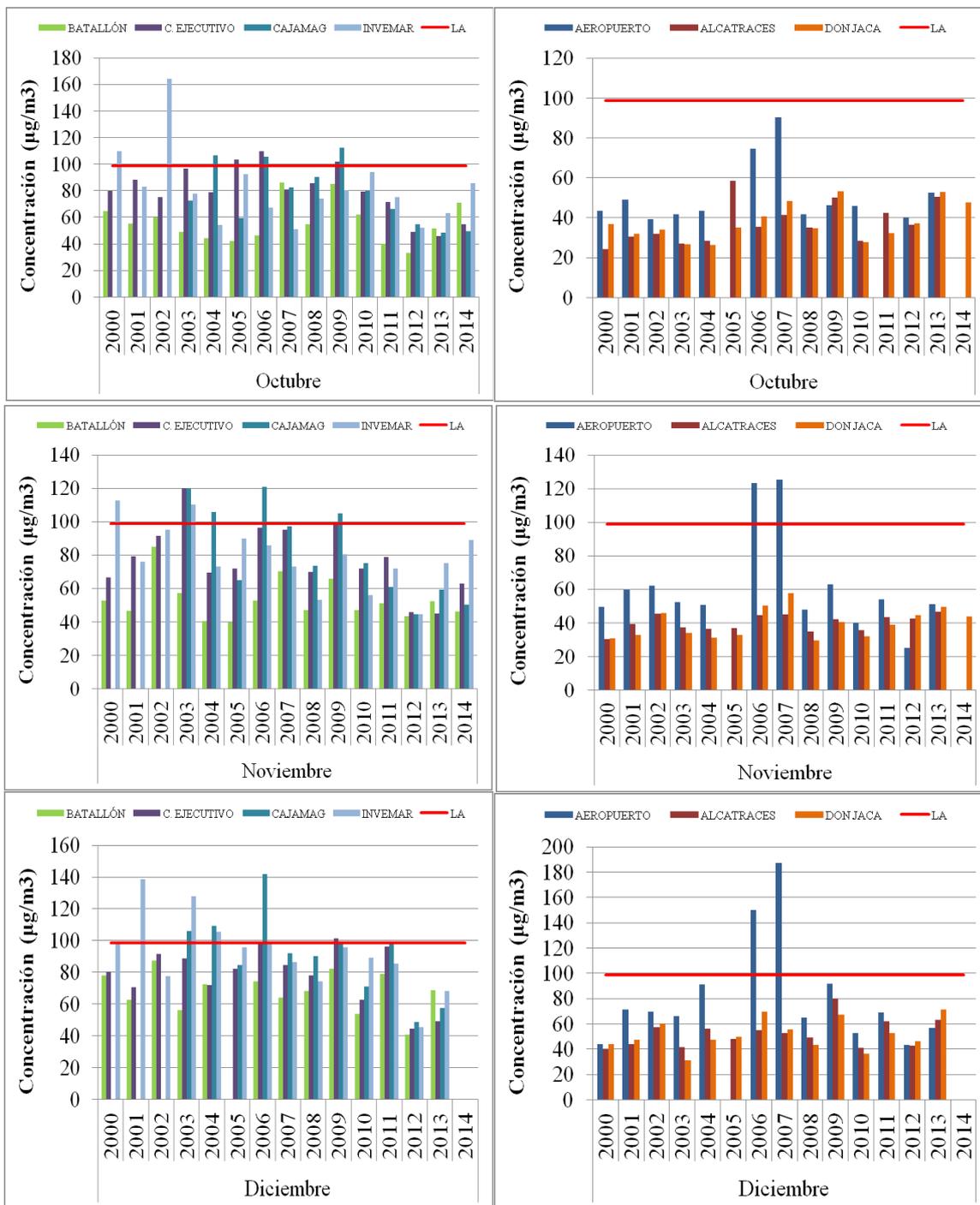


Figura 4. Media geométrica mensual de las concentraciones diarias de partículas suspendidas totales cuarto trimestre

Medias Aritméticas mensuales de las concentraciones diarias de MP₁₀

■ Alcatraces ■ Carbograneles ■ Club Santa Marta ■ Costa Verde
 ■ Don Jaca ■ Zuana — Nivel de Referencia Normal Local

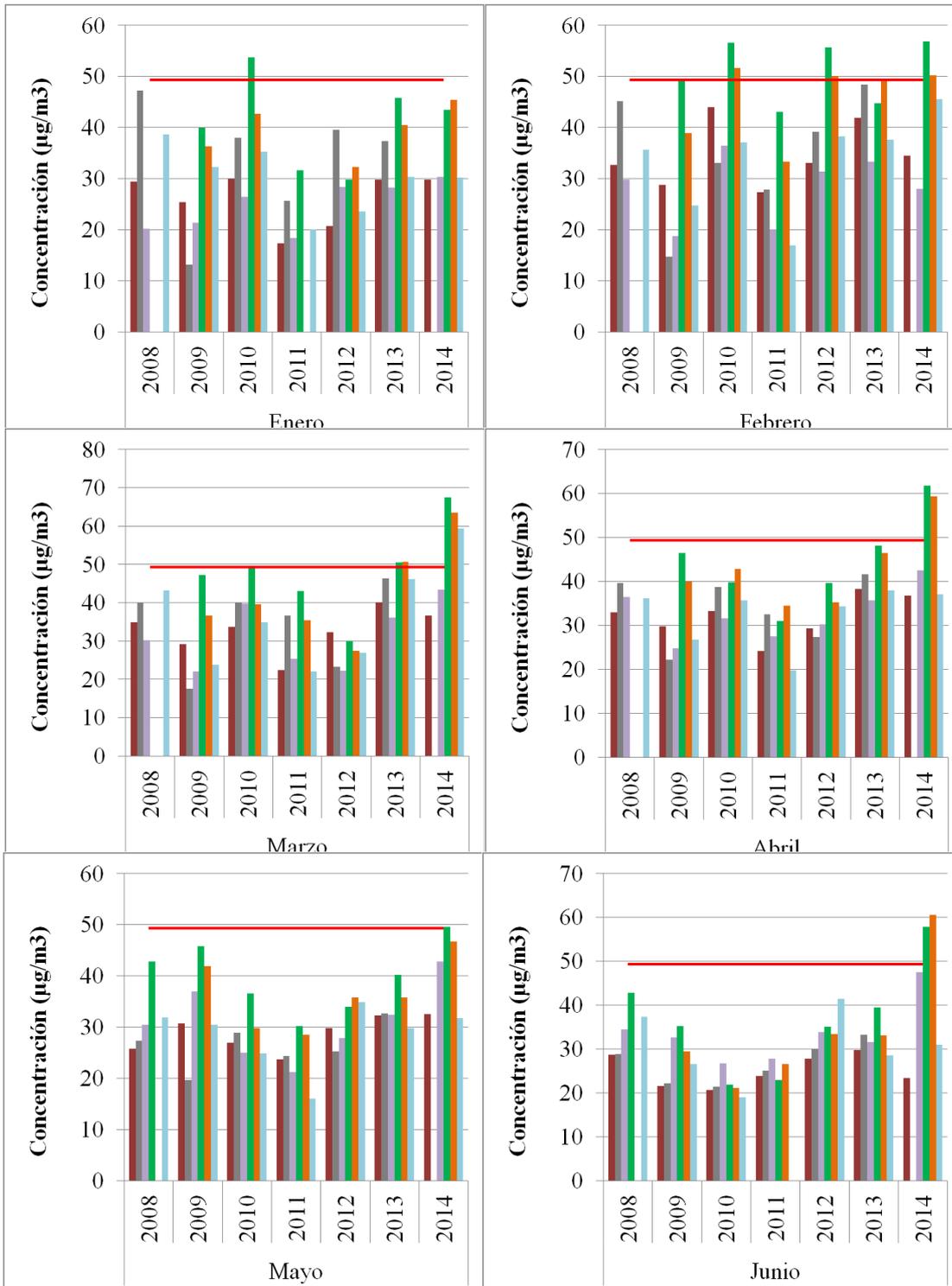


Figura 5. Media aritmética mensual de las concentraciones diarias de de MP₁₀ en el I semestre.

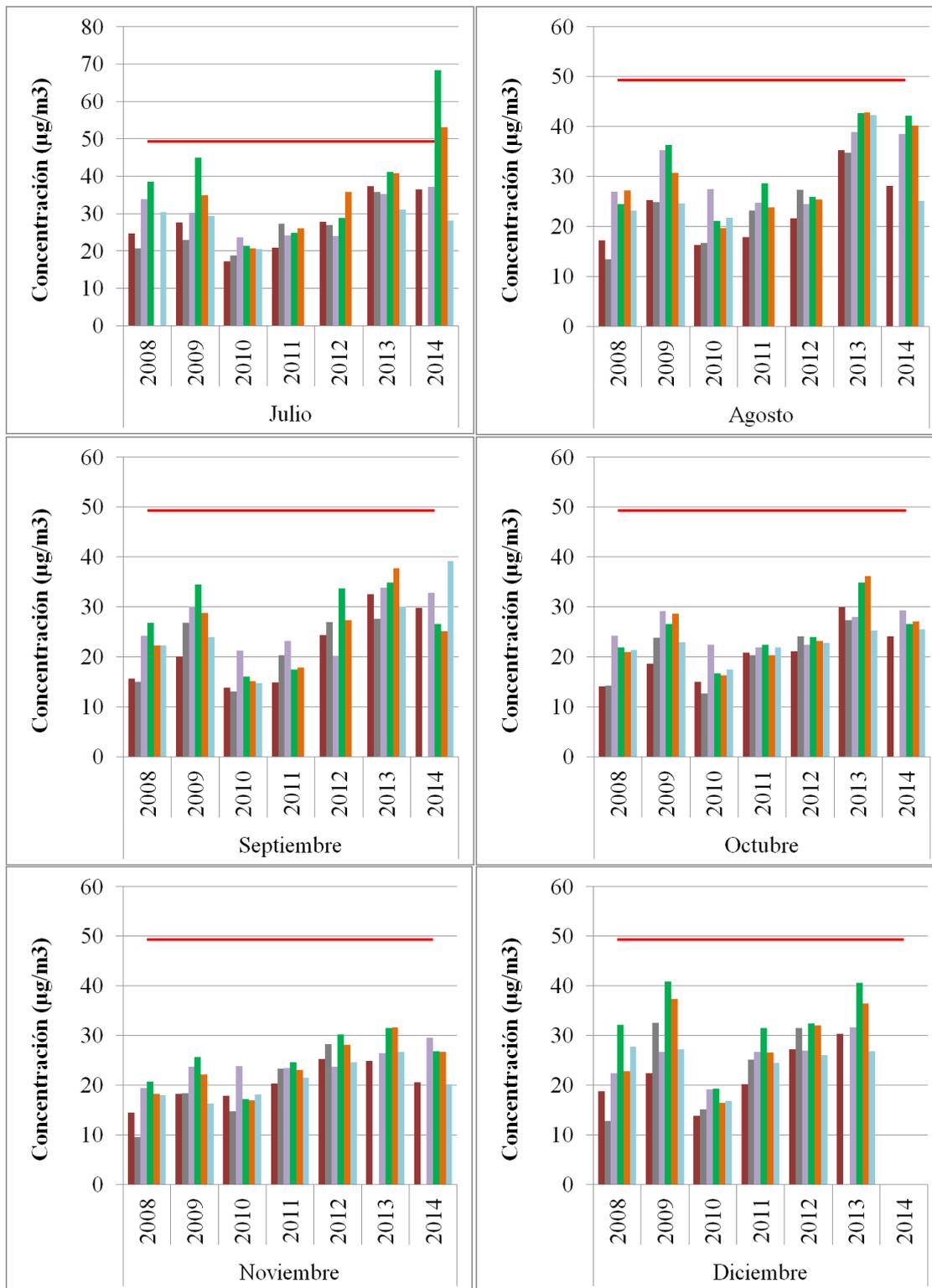


Figura 6. Media aritmética mensual de las la concentraciones diarias de MP₁₀ en el II semestre.

APÉNDICE C: Clústeres Concentraciones de estaciones de PST y MP₁₀

Clústeres Concentraciones Estaciones PST

Estación Aeropuerto

Debido a la ausencia de datos en algunos años en el análisis de esta estación se incluyeron solo los años con datos completos, año 2000, 2001, 2003, 2004, 2007, 2008, 2009, 2012 y 2013.

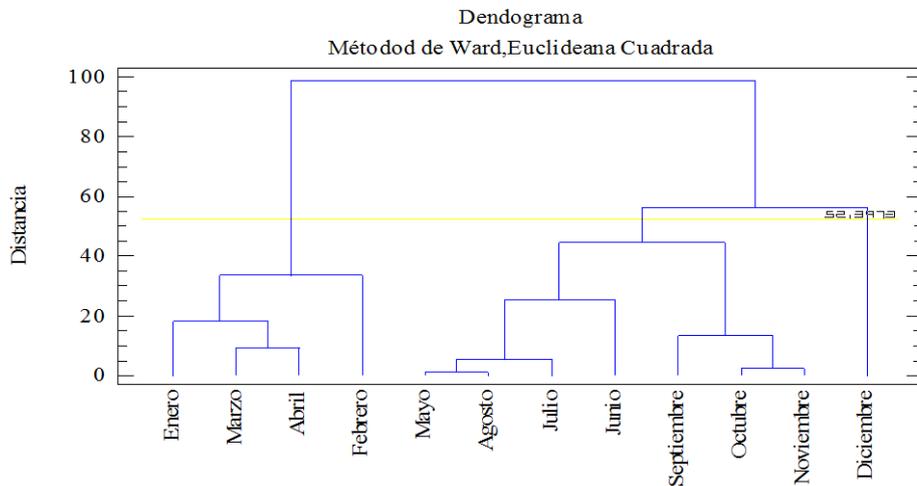


Figura 7. Dendrograma Estación Aeropuerto

Estación Alcatraces

Debido a la ausencia de datos en algunos meses del año 2014 en el análisis de esta estación se incluyeron solo los años con datos completos, año 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013.

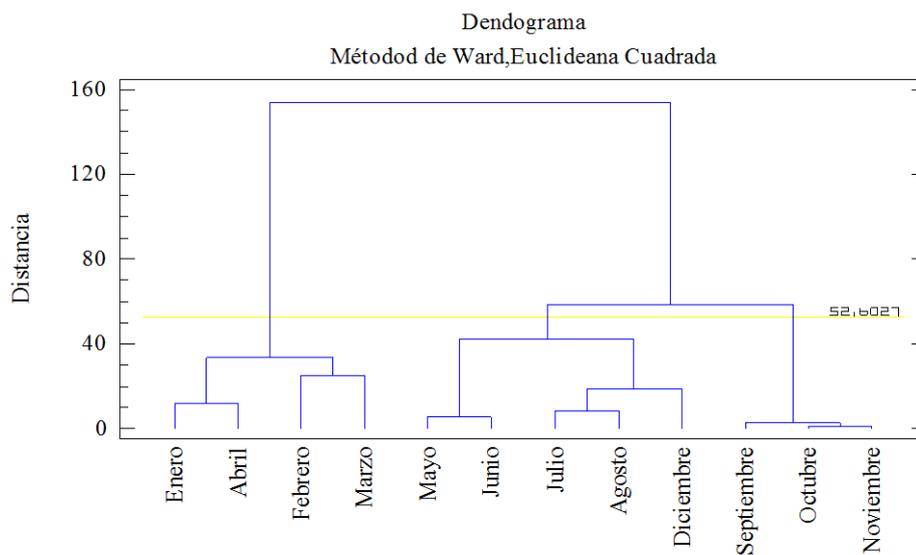


Figura 8. Dendrograma Estación Alcatraces

Estación Batallón

La ausencia de datos en el mes de diciembre de 2014 no permitió incluir el año 2014 en la elaboración del clúster, por tanto en esta estación se incluyeron los años 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013.

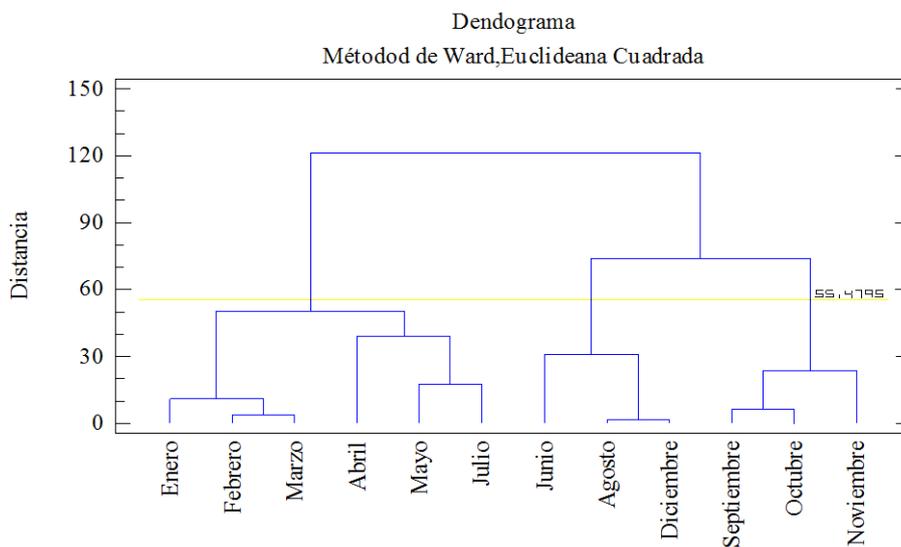


Figura 9. Dendrograma Estación Batallón

Estación Centro Ejecutivo

De acuerdo a los datos disponibles se incluyeron en el análisis los registros de los años 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2013.

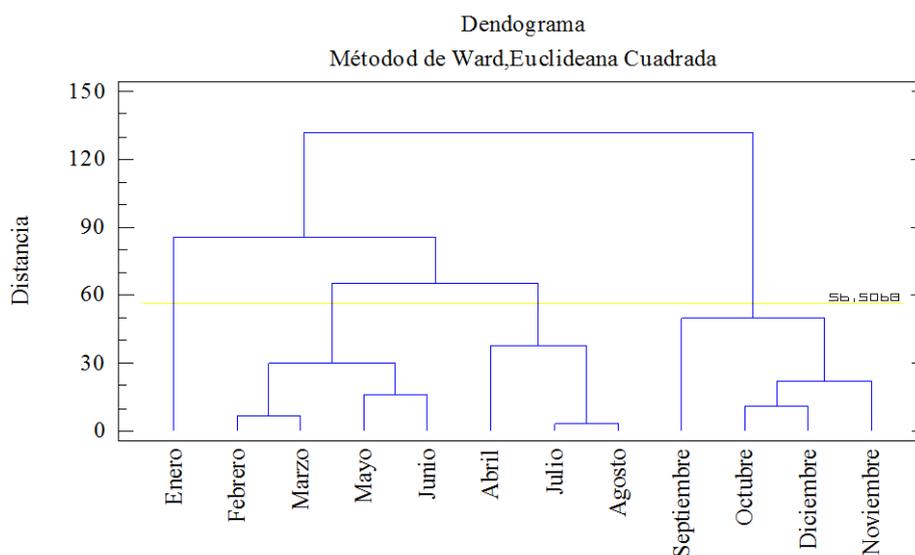


Figura 10. Dendrograma Estación Centro Ejecutivo

Estación CAJAMAG

De acuerdo a los datos disponibles se incluyeron en el análisis los registros de los años 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013.

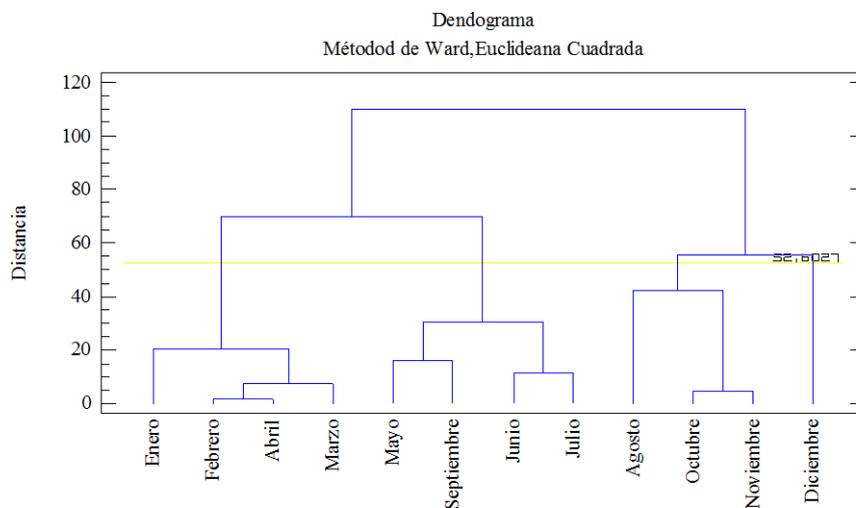


Figura 11. Dendrograma Estación CAJAMAG

Estación Don Jaca

De acuerdo a los datos disponibles se incluyeron en el análisis los registros de los años 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013.

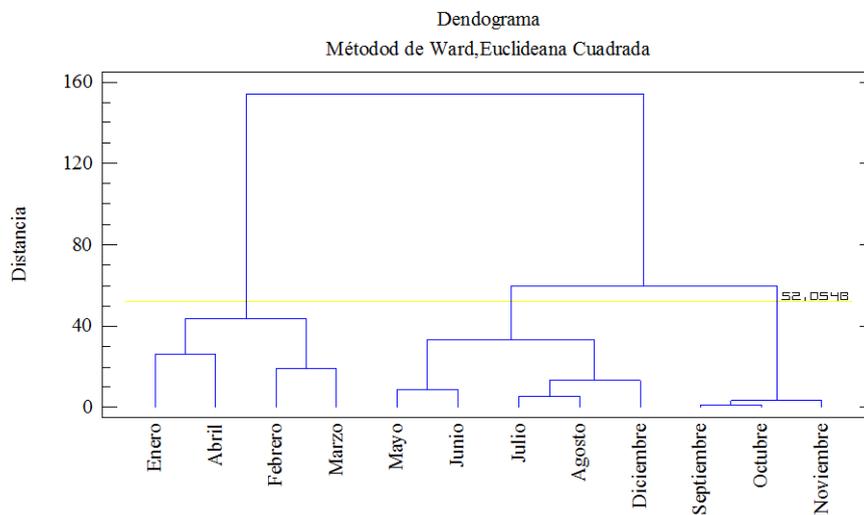


Figura 12. Dendrograma Estación Don Jaca

Estación INVEMAR

Los registros incluidos en el análisis incluyen los años 2000-2013.

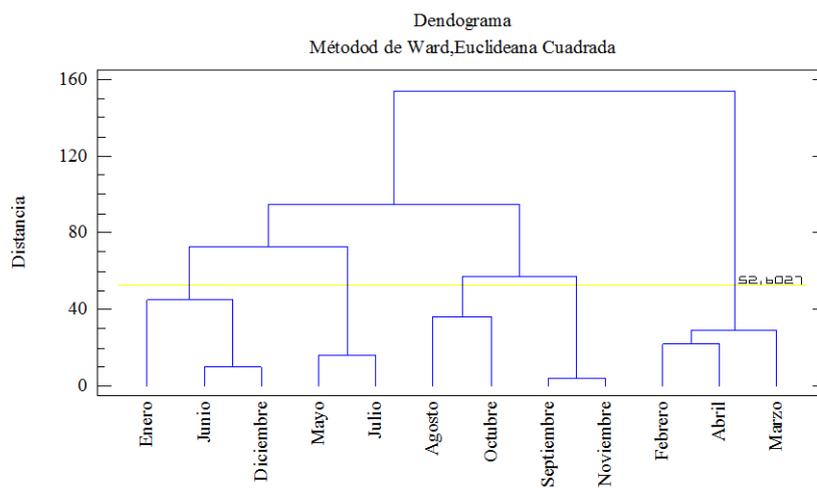


Figura 13. Dendograma Estación INVEMAR

Clústeres Concentraciones de Estaciones MP₁₀

Estación Alcatraces

De acuerdo a los datos disponibles se incluyeron en el análisis los registros de los años 2008-2013.

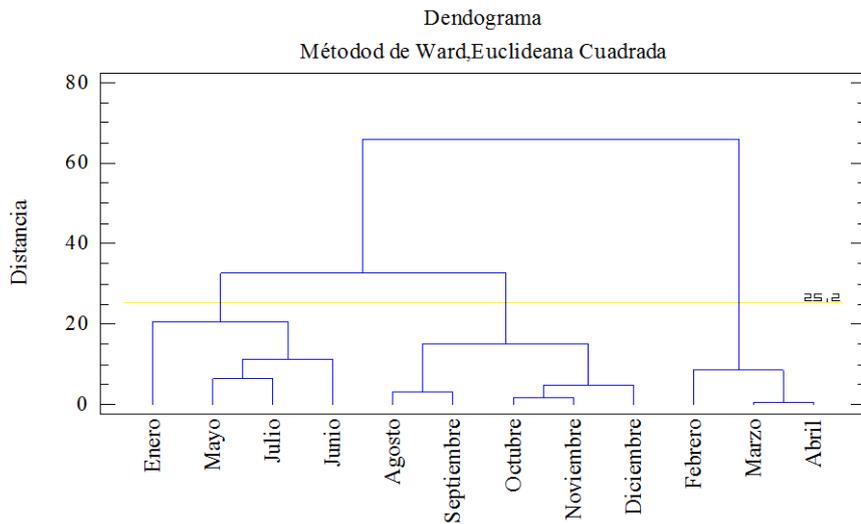


Figura 14. Dendrograma Estación Alcatraces

Estación Carbogranales

De acuerdo a los datos disponibles se incluyeron en el análisis los registros de los años 2008-2012.

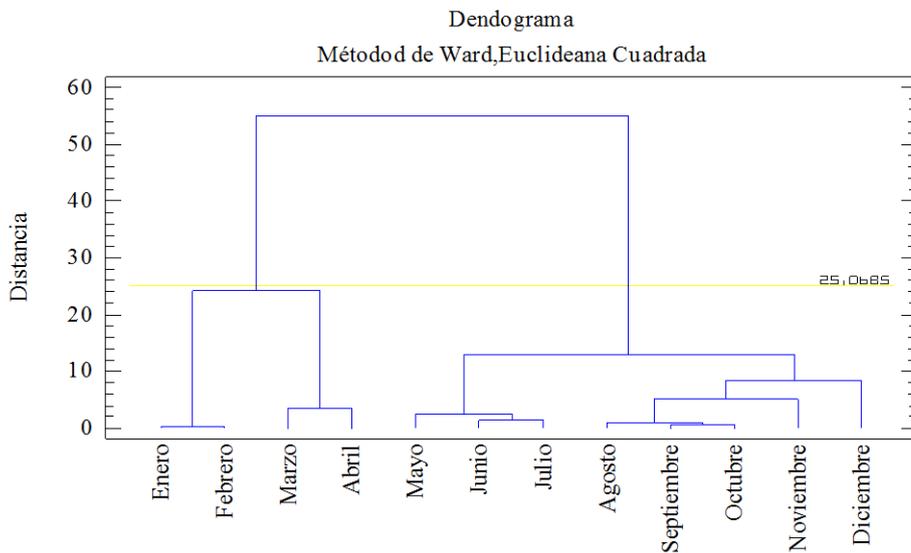


Figura 15. Dendrograma Estación Carbogranales

Estación Club Santa Marta

De acuerdo a los datos disponibles se incluyeron en el análisis los registros de los años 2008-2013.

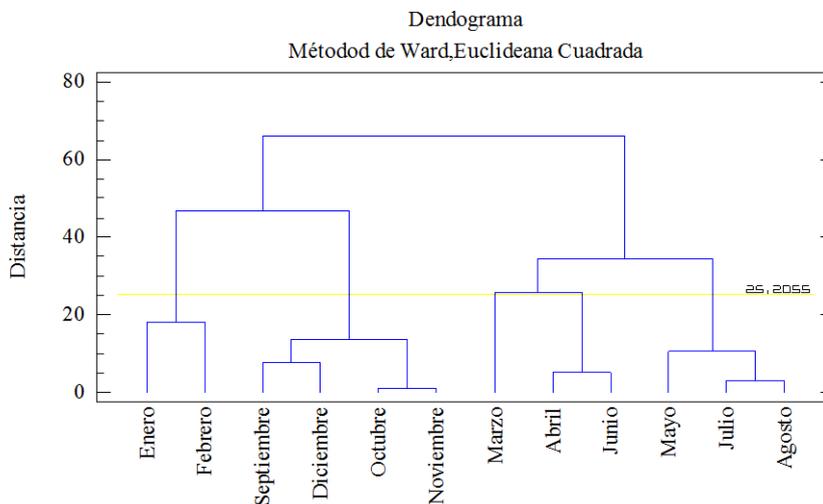


Figura 16. Dendrograma Estación Club Santa Marta

Estación Costa Verde

De acuerdo a los datos disponibles se incluyeron en el análisis los registros de los años 2009-2013.

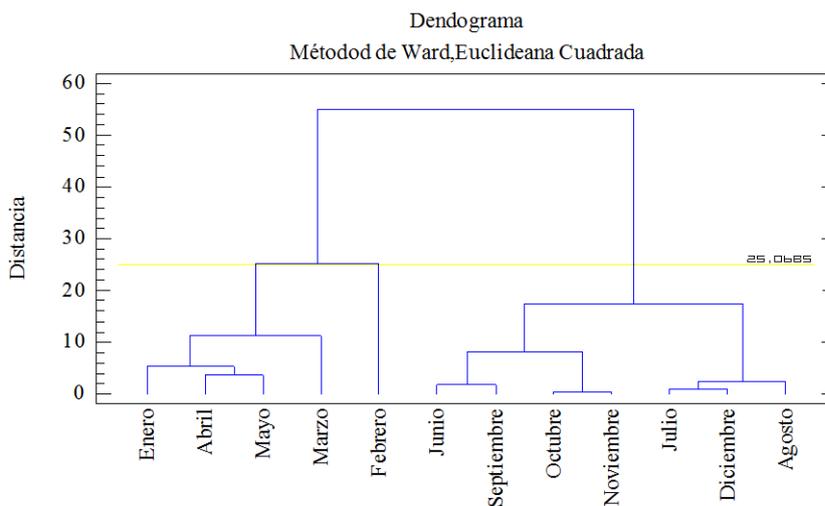


Figura 17. Dendrograma Estación Costa Verde

Estación Don Jaca

De acuerdo a los datos disponibles se incluyeron en el análisis los registros de los años 2009, 2010, 2012 y 2013.

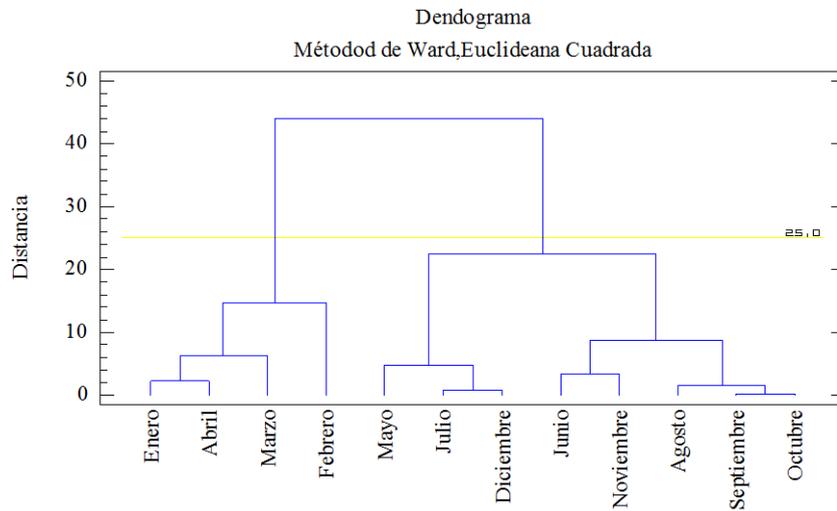


Figura 18. Dendrograma Estación Don Jaca

Estación Zuana

De acuerdo a los datos disponibles se incluyeron en el análisis los registros de los años 2008, 2009, 2010 y 2013.

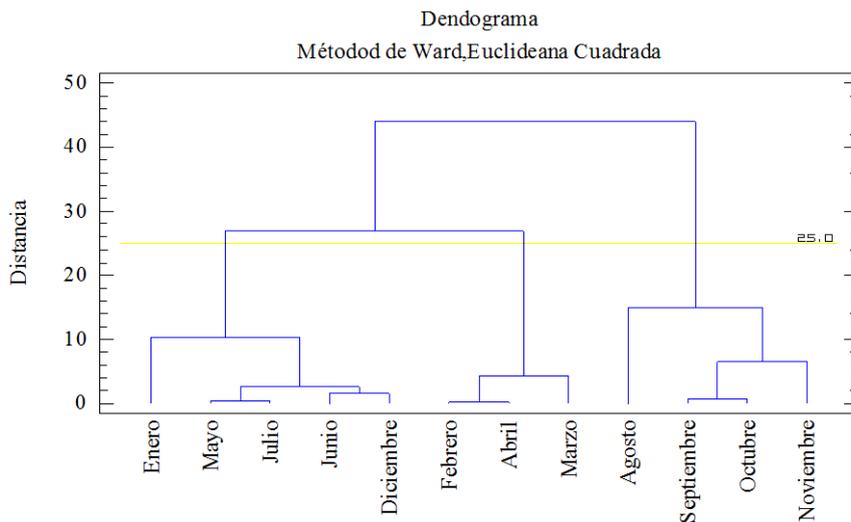


Figura 19. Dendrograma Estación Zuana

APÉNDICE D: Evaluación Meteorológica.

Tabla 1. Variables meteorológicas correspondientes a los días que presentaron las concentraciones máximas diarias de PST. Vientos suaves para una periodo de 0 a 23 horas de la fecha indicada. Velocidad vientos suaves entre 0-0.5m/s.

Estación	Conc. Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fecha	Velocidad media del Viento (m/s)	Dirección media del Viento	T ($^{\circ}\text{C}$)	Frecuencia vientos suaves (%)
Aeropuerto	525.0	29/01/2006	2.38	NE	27.22	41.67
	369.3	23/02/2007	5.50	NE	26.11	0.00
	302.9	14/02/2007	3.05	NNE	25.00	8.33
	294.7	26/02/2007	5.05	NE	28.89	8.33
Alcatraces	208.0	22/03/2007	5.30	NE	25.00	0.00
	186.2	05/04/2002	10.26	NE	26.11	0.00
	173.8	18/02/2012	4.27	NE	22.78	6.38
	169.1	03/02/2012	5.25	NNE	24.44	0.00
Batallón	244.6	01/04/2000	8.37	NE	26.11	0.00
	219.4	19/07/2006	3.73	NE	26.67	12.50
	216.8	15/04/2001	6.17	NE	25.00	0.00
	214.7	30/01/2004	2.40	NE	23.89	45.83
Centro Ejecutivo	473.1	22/09/2005	1.60	SW	23.89	44.00
	430.4	28/09/2005	2.27	S	25.00	40.00
	308.1	07/10/2005	2.19	SSO	26.11	36.00
	270.0	12/08/2006	2.98	SOO	26.11	20.83
CAJAMAG	339.2	02/10/2006	2.89	NNE	27.22	20.83
	319.2	17/12/2007	2.80	NE	27.22	8.33
	261.8	01/03/2007	4.37	NE	25.00	0.00
	249.9	13/03/2007	7.29	NNE	26.11	0.00
DON JACA	176.8	14/03/2013	10.33	NE	24.44	0.00
	171.0	09/02/2012	6.58	NE	24.44	0.00
	168.4	01/03/2007	4.37	NE	25.00	0.00
	163.4	17/06/2001	7.81	NE	26.11	0.02
INVEMAR	598.7	20/10/2002	5.09	NNE	25.56	20.83
	452.7	14/05/2002	9.30	NE	28.89	0.00
	393.8	09/03/2002	7.23	NNE	26.11	8.33
	381.3	31/07/2002	4.59	NE	25.00	41.67
	372.0	05/02/2001	6.76	NE	23.33	0.04
	347.7	21/01/2004	7.89	NNE	24.44	0.00
	345.9	22/02/2000	11.32	NE	24.11	1.96
	343.1	07/10/2000	6.13	NE	27.78	2.00
	341.1	23/10/2002	5.42	NEE	25.00	4.17
	339.5	14/09/2002	3.82	NNE	26.11	20.83
	338.9	28/12/2003	5.66	NNE	25.00	6.38
	337.3	02/02/2001	1.91	NE	23.33	0.43
	325.3	09/01/2004	5.72	NE	24.44	0.00
	304.0	03/01/2004	7.79	NE	25.00	0.00
	302.5	19/07/2003	6.65	NNE	27.78	0.00
	302.4	31/12/2003	9.75	NNE	25.00	0.00
290.6	05/01/2000	6.68	NE	26.67	0.00	

Tabla 2. Variables meteorológicas correspondientes a los días que presentaron las concentraciones máximas diarias de MP₁₀. Vientos suaves para una período de 0 a 23 horas de la fecha indicada. Velocidad vientos suaves entre 0-0.5m/s.

Estación	Conc. Max (µg/m ³)	Fecha	Velocidad media del viento (m/s)	Dirección media del Viento	T (°C)	Frecuencia vientos suaves (%)
Alcatraces	73.4	30/07/2013	4.42	E	27.22	0.00
	68.7	01/02/2010	5.20	NEE	25.56	0.00
	66.8	13/02/2010	2.42	NE	25.00	8.33
	62.3	15/02/2012	4.57	NE	23.89	0.00
Carbogranales	90.3	16/01/2008	5.62	NE	24.44	4.17
	82.6	12/06/2013	2.99	S	25.56	12.00
	79.6	19/01/2012	4.95	NE	24.44	0.00
	79.0	11/04/2010	6.05	NE	27.22	0.00
Club Santa Marta	90.6	07/06/2014	3.64	NE	27.78	8.33
	82.4	10/01/2012	2.93	NNE	25.00	4.26
	81.9	14/04/2014	4.70	NNE	25.00	12.5
	80.8	06/08/2014	5.10	NNE	27.22	0.00
Costa Verde	93.6	22/02/2014	5.95	NNE	22.78	0.00
	89.8	06/02/2012	3.53	NE	24.44	6.38
	89.1	25/07/2014	5.03	NNE	27.22	0.00
	86.8	07/06/2014	3.64	NE	27.78	8.33
Don Jaca	99.2	11/08/2013	3.84	SSE	25.00	4.00
	89.0	07/06/2014	3.64	NE	27.78	8.33
	87.5	06/03/2014	3.75	NE	25.00	4.17
	86.5	03/05/2012	3.30	SO	26.67	-
Zuana	144.5	06/03/2014	3.75	NE	25.00	4.17
	96.7	10/02/2014	5.63	NNE	24.44	4.17
	95.5	14/09/2014	3.07	NE	26.11	16.67
	92.0	15/05/2014	2.94	NNE	27.78	29.17

APÉNDICE E: Inventario de Emisiones y Modelación de dispersión de Contaminantes

Tabla 3. Información Inventario de emisiones fuentes fijas

Fuentes	Tipo	Actividad	Contaminantes	Categoría	Datos de Actividad	UN	Factor de Emisión	UN	Emisión	UN	NIVEL	Año Base
PUERTO SOCIEDAD PORTUARIA		Almacenamiento Carbón	PST	2A5c	3	ha	1,64	ton/ha/year	4.309	Kg/año	NIVEL 2	2013
			PM10		3	ha	0,82	ton/ha/year	2.154	Kg/año	NIVEL 2	2013
		Manejo de Carbon	PST	2A5c	4.000.000	Ton/año	12	g/Ton	48.000	Kg/año	NIVEL 2	2013
			PM10		4.000.000	Ton/año	6	g/Ton	24.000	Kg/año	NIVEL 2	2013
PUERTO PRODECO		Carga de Camiones	PST		10.095.000	Ton/año	0,037	Kg/Ton	369.432	Kg/año		2013
			PST		10.095.000	Ton/año	0,037	Kg/Ton	369.432	Kg/año		2013
		Almacenamiento Carbón	PST	2A5c	22	ha	1,64	ton/ha/year	36.430	Kg/año	NIVEL 2	2013
			PM10		22	ha	0,82	ton/ha/year	18.215	Kg/año	NIVEL 2	2013
PUERTO DRUMMOND		Manejo de Carbon	PST	2A5c	16.000.000	Ton/año	12	g/Ton	192.000	Kg/año	NIVEL 2	2013
			PM10		16.000.000	Ton/año	6	g/Ton	96.000	Kg/año	NIVEL 2	2013
		Carga de Camiones	PST		43.800.000	Ton/año	0,037	Kg/Ton	1.602.884	Kg/año		2013
			PST		43.800.000	Ton/año	0,037	Kg/Ton	1.602.884	Kg/año		2013
PUERTO EX VALE	Fuente de área	Almacenamiento Carbón	PST	2A5c	135	ha	1,64	ton/ha/year	220.716	Kg/año	NIVEL 2	2013
			PM10		135	ha	0,82	ton/ha/year	110.358	Kg/año	NIVEL 2	2013
		Manejo de Carbon	PST	2A5c	30.000.000	Ton/año	12	g/Ton	360.000	Kg/año	NIVEL 2	2013
			PM10		30.000.000	Ton/año	6	g/Ton	180.000	Kg/año	NIVEL 2	2013
Cantera Tritupisvar		Carga de Camiones	PST		87.600.000	Ton/año	0,037	Kg/Ton	3.205.768	Kg/año		2013
			PST		87.600.000	Ton/año	0,037	Kg/Ton	3.205.768	Kg/año		2013
		Almacenamiento Carbón	PST	2A5c	8	ha	1,64	ton/ha/year	13.607	Kg/año	NIVEL 2	2013
			PM10		8	ha	0,82	ton/ha/year	6.803	Kg/año	NIVEL 2	2013
Cantera La Carolina		Manejo de Carbon	PST	2A5c	5.000.000	Ton/año	12	g/Ton	60.000	Kg/año	NIVEL 2	2013
			PM10		5.000.000	Ton/año	6	g/Ton	30.000	Kg/año	NIVEL 2	2013
		Carga de Camiones	PST		12.000.000	Ton/año	0,037	Kg/Ton	439.146	Kg/año		2013
			PST		12.000.000	Ton/año	0,037	Kg/Ton	439.146	Kg/año		2013
Cantera Predio El Futuro		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	6.000	Mg	102	g/Mg de Mineral	612	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		6.000	Mg	50	g/Mg de Mineral	300	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera Minera Tayrona		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	35	Mg	102	g/Mg de Mineral	3,55	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		35	Mg	50	g/Mg de Mineral	1,74	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera Manuel Pertuz		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	1.014	Mg	102	g/Mg de Mineral	103,45	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		1.014	Mg	50	g/Mg de Mineral	50,71	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera Las Delicias		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	1.558	Mg	102	g/Mg de Mineral	158,89	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		1.558	Mg	50	g/Mg de Mineral	77,89	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera La Reserva		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	241	Mg	102	g/Mg de Mineral	24,61	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		241	Mg	50	g/Mg de Mineral	12,06	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera La Reserva		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	26	Mg	102	g/Mg de Mineral	2,68	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		26	Mg	50	g/Mg de Mineral	1,31	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera La Reserva		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	1.459	Mg	102	g/Mg de Mineral	148,84	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		1.459	Mg	50	g/Mg de Mineral	72,96	Kg/año	NIVEL 1	2016

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

Fuentes	Tipo	Actividad	Contaminantes	Categoría	Datos de Actividad	UN	Factor de Emisión	UN	Emisión	UN	NIVEL	Año Base
Cantera La Piedra	Fuente de área	Extracción de Arenas.	PST	2A5a	2.608	Mg	102	g/Mg de Mineral	266,04	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		2.608	Mg	50	g/Mg de Mineral	130,41	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera La Esmeralda		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	136	Mg	102	g/Mg de Mineral	13,84	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		136	Mg	50	g/Mg de Mineral	6,78	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera El Porvenir		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	1.564	Mg	102	g/Mg de Mineral	159,49	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		1.564	Mg	50	g/Mg de Mineral	78,18	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera El Futuro		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	991	Mg	102	g/Mg de Mineral	101,07	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		991	Mg	50	g/Mg de Mineral	49,55	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera Calderon		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	97	Mg	102	g/Mg de Mineral	9,86	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		97	Mg	50	g/Mg de Mineral	4,83	Kg/año	NIVEL 1	2016
Cantera Sarita		Extracción de Arenas.	PST	2A5a	55	Mg	102	g/Mg de Mineral	5,60	Kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		55	Mg	50	g/Mg de Mineral	2,75	Kg/año	NIVEL 1	2016
GRADESA S.A.	Fuente Puntual	Producción de grasas y aceites	PM10	3D	2.500	ha	1,56	kg ha-1a-1	3.900	kg/año	NIVEL 1	2016
CI FAMAR S.A.	Fuente Puntual	vegetales comestibles	PM10	3D	2.500	ha	1,56	kg ha-1a-1	3.900	kg/año	NIVEL 1	2016
Relleno Sanitario	Fuente de área	Disposición Final en Relleno Sanitario Santa Marta	PST	5A	482	Mg/día	0,463	Kg/Mg	81.456	Kg/año	NIVEL 1	2009
			PM10		482	Mg/día	0,219	Kg/Mg	38.529	Kg/año	NIVEL 1	2009
Aeropuerto	Fuente de área	Aviación Civil: Comercial y General	PST	1A3aii	8935	Ton Comb/año	0	kg/Ton Combustible	0	kg/año	NIVEL 1	2014
			PM10		8935	Ton Comb/año	0	kg/Ton Combustible	0	kg/año	NIVEL 1	2014
Combustion Residencial	Fuente de área	Combustible Gaseoso (gas Natural)	PST	1A4b	2.349.140	GJ/año	1,2	g/GJ	2.819	kg/año	NIVEL 1	2013
			PM10		2.349.140	GJ/año	1,2	g/GJ	2.819	kg/año	NIVEL 1	2013
Buques	Movil	Navegación Nacional	PST	1A3d	29	Ton/día	9,5	kg/Ton Combustible	100557,5	kg/año	NIVEL 1	2016
			PM10		29	Ton/día	9,5	kg/Ton Combustible	100557,5	kg/año	NIVEL 1	
		Navegación Internacional	PST		47	Ton/día	1,5	kg/ton Combustibles	25732,5	kg/año	NIVEL 1	
			PM10		47	Ton/día	1,5	kg/ton Combustibles	25732,5	kg/año	NIVEL 1	
Fuentes Naturales	Fuente de área	Erosion, desnudamiento de Cerros	PST		21059	ha	0,4	kg/ha/hora	11068610,4	kg/año	N/A	2009
			PM10		21059	ha	0,2	kg/ha/hora	5534305,2	kg/año		
		Generación de Aerosol Marino	Cloruros		15350	m2	0,00661	lb/m2/año	46,120	kg/año		2015

Tabla 4. Información inventario de emisiones fuentes móviles

Tipo de Vehículo	Cantidad de Vehículos	Longitud segmento de calle (km)	Factor de emisión (g/km)	Emisión ((Kg/year)
Automovil	34	0,75415	0,019	0,173288559
Bus	1	0,75415	0,585	0,160892704
Buseta	1	0,75415	0,585	0,160892704
Camion	7	0,75415	0,494	0,951585911
Camioneta	10	0,75415	0,062	0,171278075
Campero	3	0,75415	0,062	0,051383422
Microbus	2	0,75415	0,585	0,321785408
Tractocamion	1	0,75415	0,472	0,129923921
Volqueta	1	0,75415	0,472	0,129923921
Motocicleta	29	0,75415	0,085	0,675266775
RNMA	1	0,75415	0,472	0,129923921
Motocarro	0	0,75415	0,062	0
Cuatrimoto	1	0,75415	0,085	0,023285061
RNRYS	31	0,75415	0,072	0,614358664

Concentraciones PST

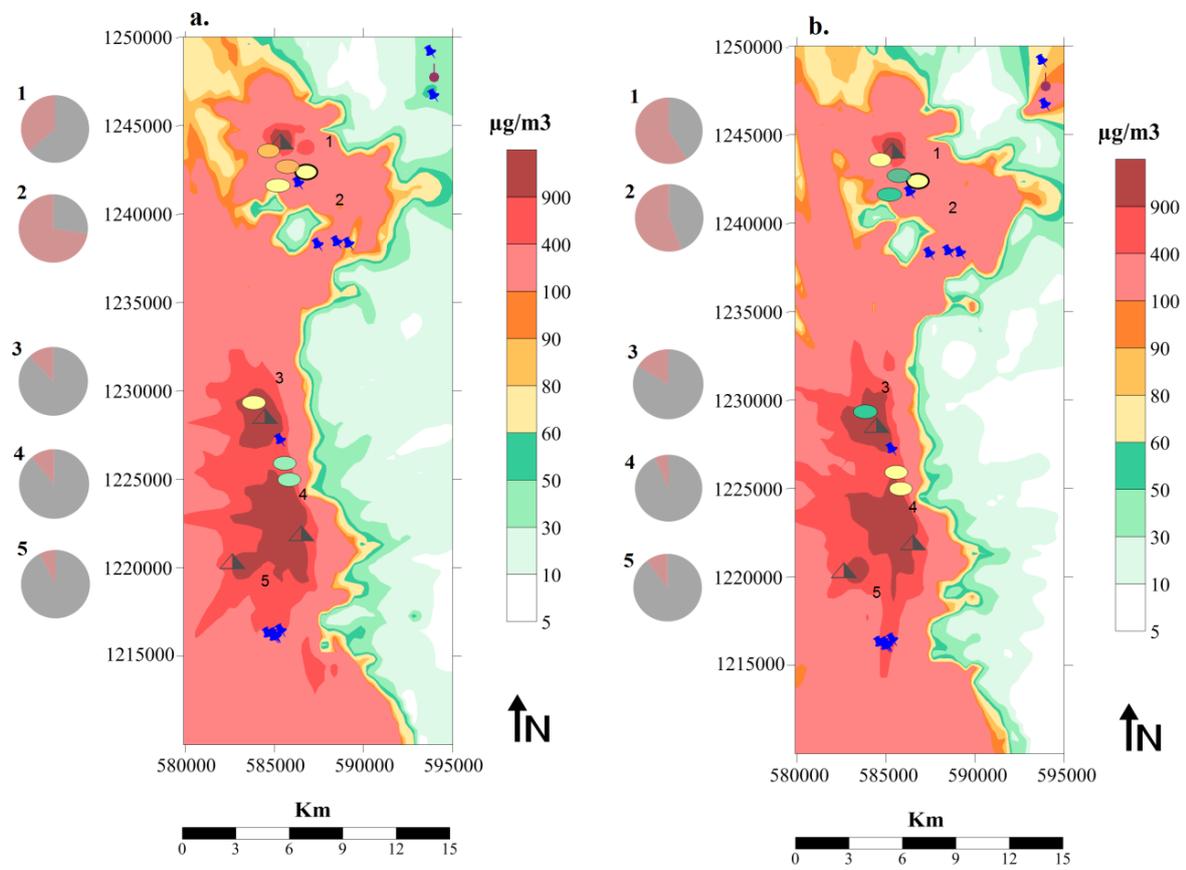


Figura 20. Concentraciones de PST a. Año 2011, b. Año 2013.

Concentraciones MP₁₀

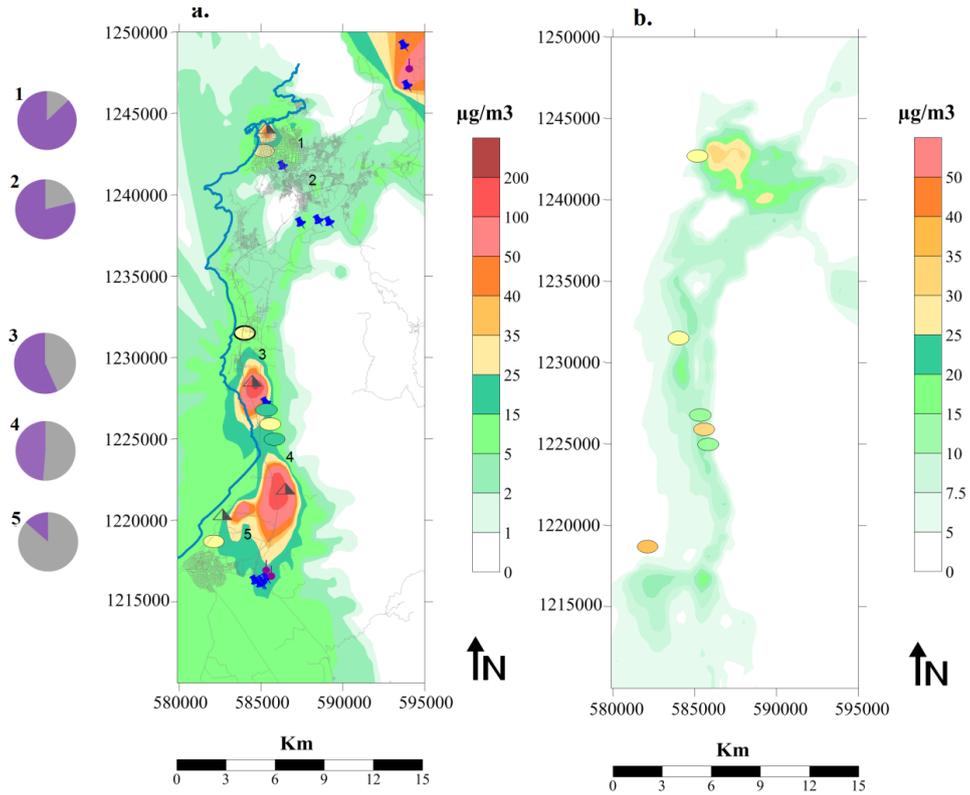


Figura 21. Concentraciones de MP₁₀ fuentes fijas año 2009, b. Concentraciones fuentes móviles año 2009.

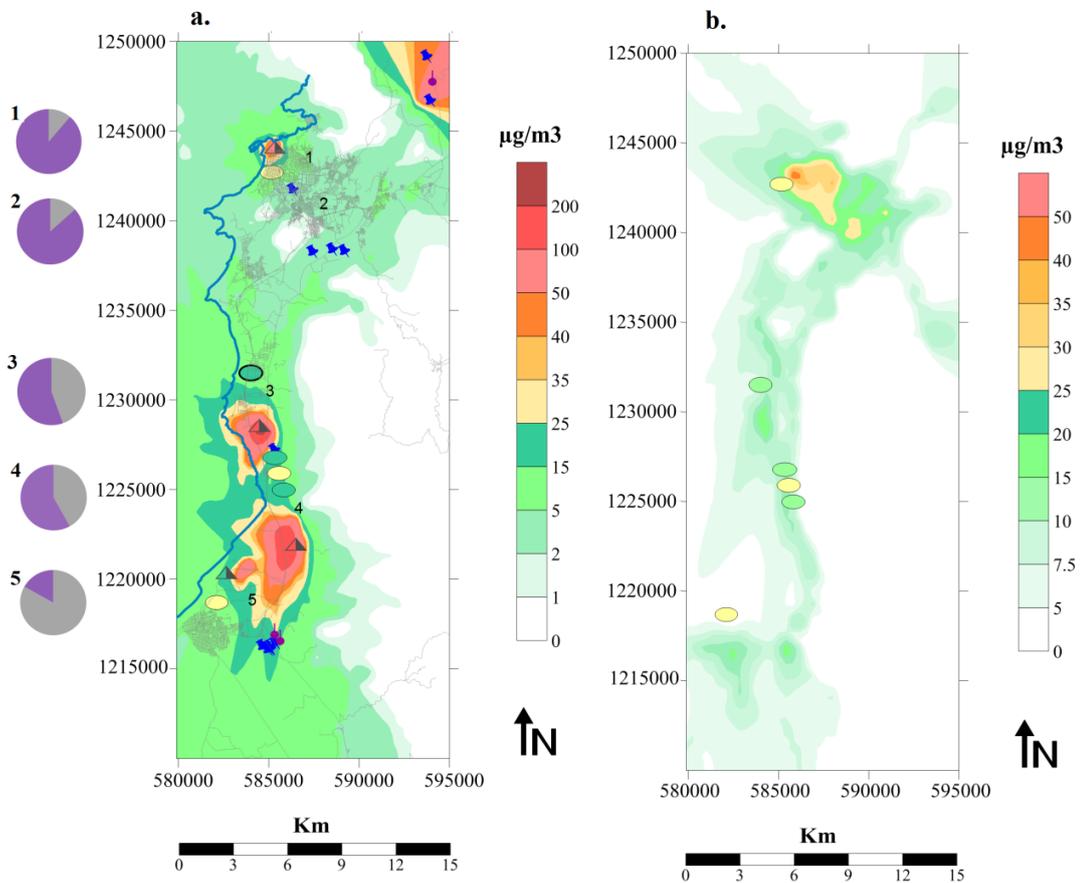


Figura 22. Concentraciones de MP₁₀ fuentes fijas año 2010, b. Concentraciones fuentes móviles año 2010.

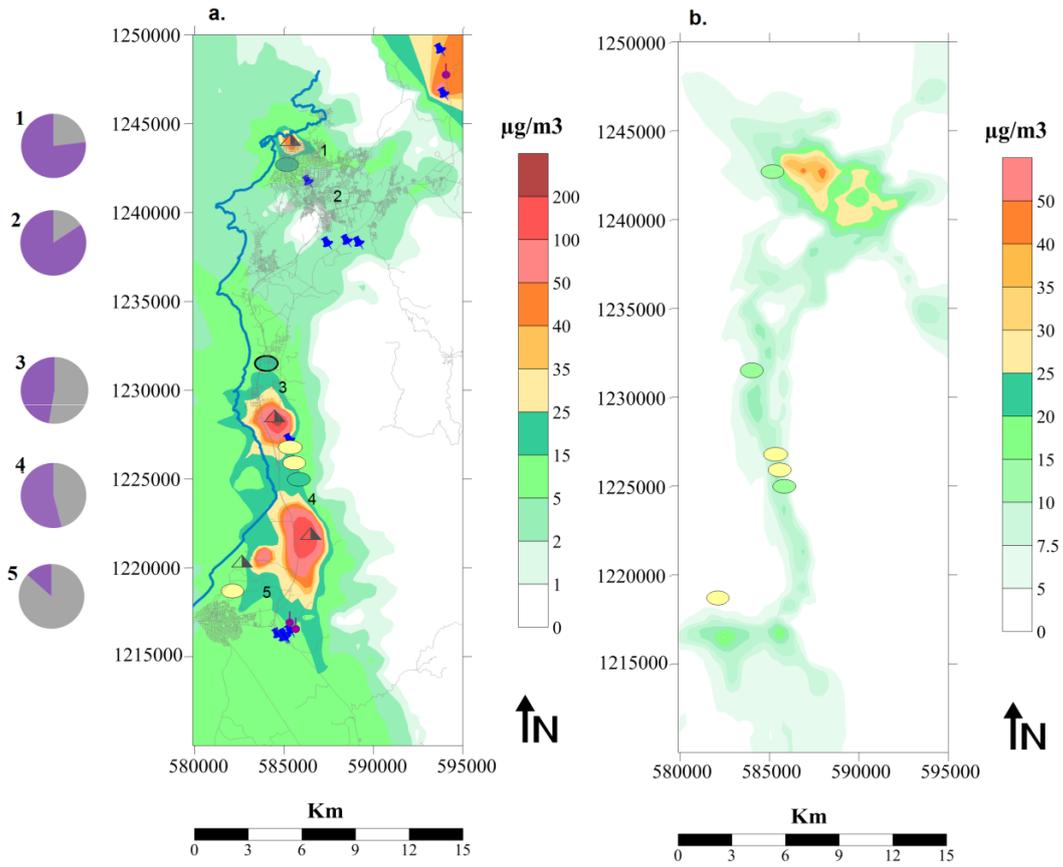


Figura 23. Concentraciones de MP₁₀ fuentes fijas año 2011, b. Concentraciones fuentes móviles año 2011.

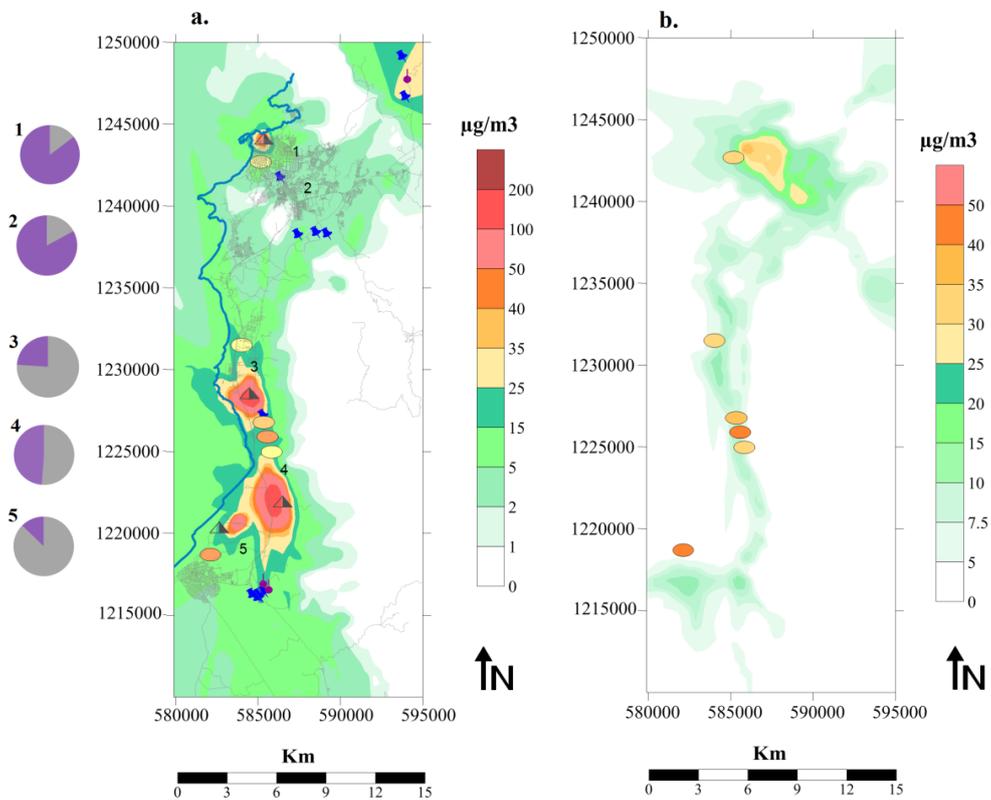


Figura 24. Concentraciones de MP₁₀ fuentes fijas año 2013, b. Concentraciones fuentes móviles año 2013.

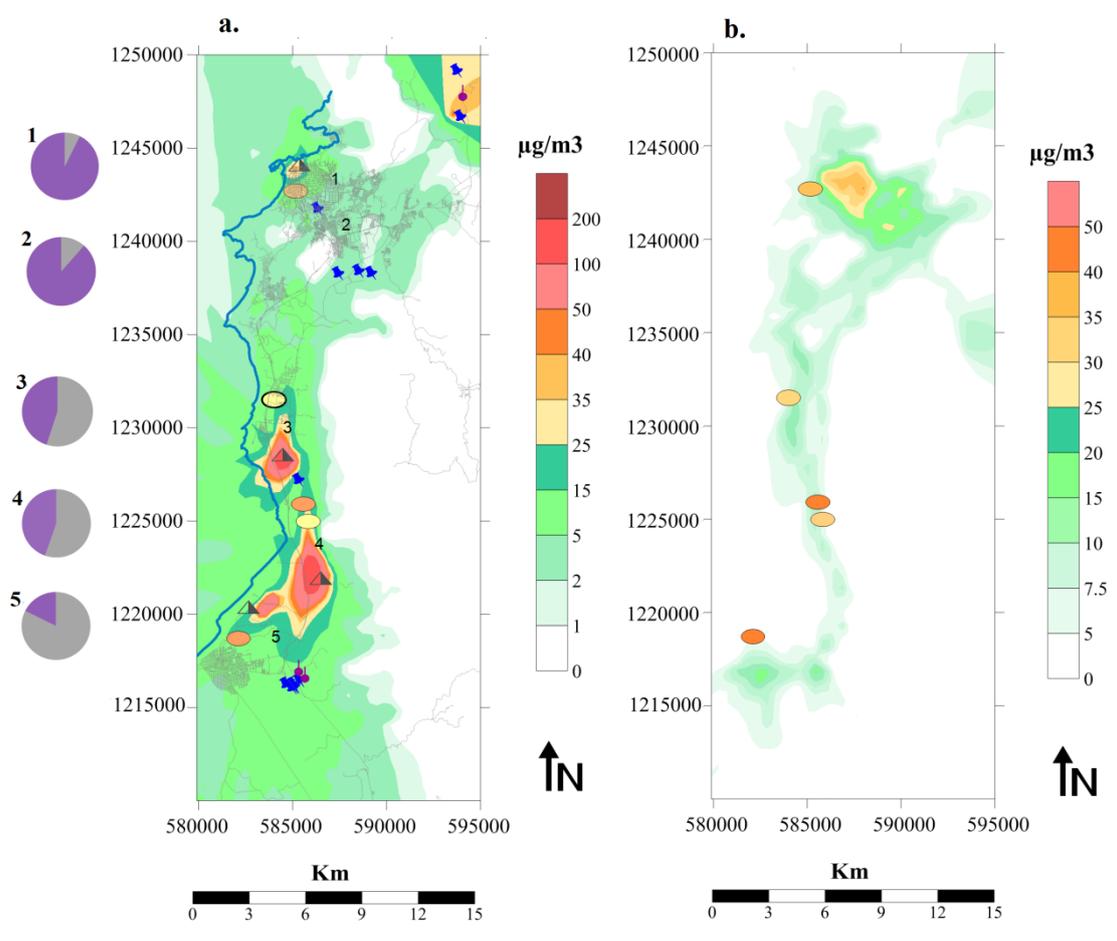


Figura 25. Concentraciones de MP₁₀ fuentes fijas año 2014, b. Concentraciones fuentes móviles año 2014.

Archivo datos de entrada y configuración del modelo AERMOD

** To run the example, copy the AERTEST.INP file to AERMOD.INP and type:

**

** AERMOD

**

** The results for this example problem are provided in file AERMOD.OUT.

CO STARTING

```

TITLEONE FUENTES DE AREA PST
CO TITLETWO CON ALTURAS Y ESTACIONES DE CORPAMAG 2000
MODELOPT BETA CONC ELEV
AVERTIME 1 3 8 24 PERIOD

POLLUTID PST

RUNORNOT RUN
EVENTFIL aertest_evt.inp
ERRORFIL ERRORS.TXT
CO FINISHED
    
```

SO STARTING

ELEVUNIT	METERS				
LOCATION	SOCPORT	AREA	585123.0	1243891.0	10
LOCATION	PROD	AREA	584189.0	1228296.5	12
LOCATION	DRUM	AREA	585473.0	1222858.0	31
LOCATION	EXVALE	AREA	583469.0	1226819.0	12
LOCATION	RSAN	AREA	593542.0	1247514.0	22
LOCATION	APTO	AREA	583934.0	1236186.0	8
LOCATION	CSART	AREA	593824.0	1248884.0	8
LOCATION	CLDELS	AREA	593195.0	1246431.0	34
LOCATION	CCALD	AREA	586386.0	1241516.0	15
LOCATION	CTRIT	AREA	587287.0	1238817.0	16
LOCATION	CPORV	AREA	588336.0	1238215.0	23
LOCATION	CMPERT	AREA	588928.0	1238115.0	29
LOCATION	CLCARD	AREA	585467.0	1227182.0	29
LOCATION	CELPUT	AREA	585588.0	1216434.0	25
LOCATION	CLESME	AREA	584862.0	1216258.0	5
LOCATION	CLRESER	AREA	585187.0	1216232.0	6
LOCATION	CLPIED	AREA	585154.0	1216875.0	4
LOCATION	CMINTAY	AREA	585235.0	1216897.0	4
LOCATION	CPRDFUT	AREA	585274.0	1216129.0	5
LOCATION	ER01	AREA	584399.0	1228815.0	6
LOCATION	ER02	AREA	585774.0	1228878.0	40
LOCATION	ER03	AREA	582571.0	1219142.0	13
LOCATION	ER04	AREA	584855.0	1236457.0	45
LOCATION	ER05	AREA	585851.0	1227541.0	17
LOCATION	CASPOR	AREA	585398.0	1244249.0	11
LOCATION	CAPROD	AREA	584199.0	1228526.0	10
LOCATION	CADROM	AREA	585729.0	1223863.0	12
LOCATION	CAEXVAL	AREA	583267.0	1226386.0	10
LOCATION	DESPOR	AREA	585398.0	1244249.0	11
LOCATION	DEPROD	AREA	584199.0	1228526.0	10
LOCATION	DEDRUM	AREA	585729.0	1223863.0	12

LOCATION DEEXVAL AREA 583267.0 1228386.0 10

```

** Point Source      QS      HS      TS      VS      DS
** Parameters:      ****      ****      ****      ****      ***
** Area Source
** SRCPARAM NAME      CONC (g/sm2) altura (m)  deltax  deltax  angulo
SRCPARAM SOCPOR      0.00000311878      3      187.9  271.7  36.8
SRCPARAM PROD      0.00003259835      3      437.2  623.9  61.8
SRCPARAM DRUM      0.00001367831      3      1916.9  713.8  85.9
SRCPARAM EXVALE      0.00002812359      3      113.9  685.3  37.6
SRCPARAM RSM      0.00001426527      3      524.4  332.1  89.5
SRCPARAM APTO      0.00000000000      3      1718.7  98.4  89.6
SRCPARAM CSART      0.00000194379      3      9.8  9.9  5.5
SRCPARAM CLDELS      0.00000194389      3      9.2  5.3  183.2
SRCPARAM CGALD      0.00000187759      3      18.3  14.7  27.5
SRCPARAM CTRIT      0.00000194397      3      184.8  181.7  49.4
SRCPARAM CPORV      0.00000194392      3      54.6  46.7  64.4
SRCPARAM CMPERT      0.00000194399      3      14.9  29.9  81.2
SRCPARAM CLCARO      0.00000194395      3      6.4  7.6  89.6
SRCPARAM CELFUT      0.00000194397      3      75.7  28.2  39.3
SRCPARAM CLESME      0.00000194399      3      27.3  8.4  94.8
SRCPARAM CLRESER      0.00000194397      3      81.7  32.6  91.5
SRCPARAM CLPIED      0.00000194397      3      97.4  48.5  68.6
SRCPARAM CMINTAY      0.00000194397      3      81.2  31.7  55.7
SRCPARAM CPRDFUT      0.00000194398      3      77.8  19.5  68.2
SRCPARAM ERO1      0.00000166618      3      6389.6  15558.8  5.5
SRCPARAM ERO2      0.00000166629      3      8884.1  5369.5  94.5
SRCPARAM ERO3      0.00000166623      3      12683.9  4429.5  98.8
SRCPARAM ERO4      0.00000166758      3      932.8  4986.6  6.5
SRCPARAM ERO5      0.00000167885      3      3774.1  672.8  76.5
SRCPARAM CASPOR      0.001832624      3      66.3  176.9  71.5
SRCPARAM CAPROD      0.001172932      3      186.7  245.9  68.6
SRCPARAM CADRUM      0.001868117      3      284.4  589.7  85.1
SRCPARAM CAEXVAL      0.000966598      3      95.1  152.6  42.6
SRCPARAM DESPOR      0.001832624      3      66.3  176.9  71.5
SRCPARAM DEPROD      0.001172932      3      186.7  245.9  68.6
SRCPARAM DEDRUM      0.001868117      3      284.4  589.7  85.1
SRCPARAM DEEXVAL      0.000966598      3      95.1  152.6  42.6

```

SRCGROUP ALL

SO FINISHED

RE STARTING

```

RE GRIDCART GRID STA
XYINC 579898.6 28 589.0 1214241.3 66 589.0
  GRIDCART GRID      ELEV      1      2.0      2.0      4.1      1.7      7.5
2.8
  GRIDCART GRID      ELEV      1      2.2      5.0      3.6      5.6      5.1
7.8
  GRIDCART GRID      ELEV      1      7.4      14.5      16.4      18.6      24.4
26.6
  GRIDCART GRID      ELEV      1      31.0      34.0      88.7      213.7      241.1
215.9
  GRIDCART GRID      ELEV      1      398.6      397.0      388.7      442.5

```

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

2.3	GRIDCART GRID	ELEV	2	2.0	2.0	5.0	4.5	0.5
7.2	GRIDCART GRID	ELEV	2	2.4	1.5	2.3	5.1	4.0
33.8	GRIDCART GRID	ELEV	2	8.7	13.0	19.6	25.3	31.0
253.9	GRIDCART GRID	ELEV	2	36.6	97.1	46.9	66.0	142.4
3.3	GRIDCART GRID	ELEV	2	173.9	221.2	268.3	489.3	
3.1	GRIDCART GRID	ELEV	3	3.8	4.6	2.0	2.0	2.0
71.6	GRIDCART GRID	ELEV	3	4.4	3.8	5.1	3.1	3.6
372.3	GRIDCART GRID	ELEV	3	6.1	17.1	23.6	98.3	84.8
5.6	GRIDCART GRID	ELEV	3	98.7	184.3	114.0	140.2	277.7
3.6	GRIDCART GRID	ELEV	3	271.5	278.6	338.5	399.3	
65.8	GRIDCART GRID	ELEV	4	7.0	7.0	2.0	2.0	4.0
421.9	GRIDCART GRID	ELEV	4	4.8	5.2	3.3	5.3	5.8
3.4	GRIDCART GRID	ELEV	4	8.9	18.6	38.5	82.4	119.4
7.1	GRIDCART GRID	ELEV	4	115.3	121.1	150.9	196.3	396.8
186.9	GRIDCART GRID	ELEV	4	412.0	274.9	309.5	375.4	
259.8	GRIDCART GRID	ELEV	5	1.1	3.9	4.4	3.2	3.8
6.9	GRIDCART GRID	ELEV	5	6.0	7.4	6.0	6.4	4.1
10.9	GRIDCART GRID	ELEV	5	14.1	22.9	43.0	63.3	86.3
232.1	GRIDCART GRID	ELEV	5	107.7	104.0	113.8	155.1	253.5
195.1	GRIDCART GRID	ELEV	5	350.7	396.8	457.1	448.6	
5.6	GRIDCART GRID	ELEV	6	0.0	2.5	4.5	4.3	5.6
12.4	GRIDCART GRID	ELEV	6	5.6	6.5	5.3	9.1	5.0
236.7	GRIDCART GRID	ELEV	6	15.8	36.1	50.9	88.6	175.9
219.6	GRIDCART GRID	ELEV	6	241.0	175.1	138.7	148.4	155.4
12.0	GRIDCART GRID	ELEV	6	300.8	354.4	410.8	606.4	
25.7	GRIDCART GRID	ELEV	7	0.0	0.0	2.3	4.1	7.9
	GRIDCART GRID	ELEV	7	8.6	11.6	7.0	9.1	10.0
	GRIDCART GRID	ELEV	7	35.0	74.3	48.4	92.0	257.3
	GRIDCART GRID	ELEV	7	387.0	278.3	205.8	239.2	198.1
	GRIDCART GRID	ELEV	7	323.0	238.2	256.5	329.6	
	GRIDCART GRID	ELEV	8	0.0	0.0	0.0	2.6	6.0
	GRIDCART GRID	ELEV	8	8.0	6.2	9.9	9.3	10.3
	GRIDCART GRID	ELEV	8	40.0	40.3	50.8	68.9	86.2

123.6									
	GRIDCART	GRID	ELEV	8	259.2	316.3	247.9	221.9	217.6
295.2									
	GRIDCART	GRID	ELEV	8	363.5	217.9	288.3	286.7	
	GRIDCART	GRID	ELEV	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
14.9									
	GRIDCART	GRID	ELEV	9	14.2	11.5	13.5	16.2	16.9
32.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	9	23.9	39.4	63.4	48.0	46.4
60.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	9	63.0	161.3	145.8	141.1	189.4
355.8									
	GRIDCART	GRID	ELEV	9	219.4	211.1	253.8	371.9	
	GRIDCART	GRID	ELEV	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	10	13.3	16.5	15.1	13.6	14.8
23.1									
	GRIDCART	GRID	ELEV	10	27.3	29.0	50.5	32.3	83.1
128.5									
	GRIDCART	GRID	ELEV	10	82.2	86.8	82.9	181.2	155.1
182.2									
	GRIDCART	GRID	ELEV	10	181.4	234.8	322.7	561.2	
	GRIDCART	GRID	ELEV	11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	11	6.6	9.2	12.8	12.6	14.6
19.2									
	GRIDCART	GRID	ELEV	11	20.1	25.8	25.0	62.6	64.4
131.6									
	GRIDCART	GRID	ELEV	11	156.1	166.3	163.0	149.3	207.1
297.2									
	GRIDCART	GRID	ELEV	11	350.0	274.2	386.0	450.2	
	GRIDCART	GRID	ELEV	12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	12	4.0	8.8	9.0	7.1	13.2
15.7									
	GRIDCART	GRID	ELEV	12	18.5	22.0	34.8	56.9	72.2
94.6									
	GRIDCART	GRID	ELEV	12	140.5	207.9	388.8	327.6	315.9
294.7									
	GRIDCART	GRID	ELEV	12	514.9	436.6	485.0	371.8	
	GRIDCART	GRID	ELEV	13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	13	1.9	8.8	11.0	13.8	15.8
19.2									
	GRIDCART	GRID	ELEV	13	16.3	20.6	28.0	61.9	59.3
49.5									
	GRIDCART	GRID	ELEV	13	66.4	168.9	261.6	422.1	489.2
447.8									
	GRIDCART	GRID	ELEV	13	459.7	544.4	573.1	495.9	
	GRIDCART	GRID	ELEV	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	14	0.0	3.4	11.3	10.8	14.0
14.8									
	GRIDCART	GRID	ELEV	14	20.5	20.6	31.6	51.3	55.1
92.2									
	GRIDCART	GRID	ELEV	14	103.1	91.8	129.7	201.3	214.6
305.7									
	GRIDCART	GRID	ELEV	14	272.1	439.1	611.3	582.3	
	GRIDCART	GRID	ELEV	15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	15	0.0	0.0	3.5	12.4	13.5
15.6	GRIDCART	GRID	ELEV	15	18.9	31.9	28.8	50.1	59.1
78.1	GRIDCART	GRID	ELEV	15	116.1	125.5	192.5	129.1	155.2
187.6	GRIDCART	GRID	ELEV	15	185.6	305.4	307.9	421.9	
	GRIDCART	GRID	ELEV	16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	16	0.0	0.0	0.0	12.8	4.6
12.9	GRIDCART	GRID	ELEV	16	16.1	30.9	38.2	54.5	71.0
106.7	GRIDCART	GRID	ELEV	16	113.5	145.6	169.2	169.7	278.6
277.8	GRIDCART	GRID	ELEV	16	230.9	240.8	313.7	335.0	
	GRIDCART	GRID	ELEV	17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	17	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1
16.1	GRIDCART	GRID	ELEV	17	15.4	30.1	41.2	55.7	105.7
143.1	GRIDCART	GRID	ELEV	17	243.9	278.5	359.0	268.4	227.7
248.4	GRIDCART	GRID	ELEV	17	363.0	360.6	358.0	358.1	
	GRIDCART	GRID	ELEV	18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	18	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5
10.6	GRIDCART	GRID	ELEV	18	17.2	35.2	58.8	80.3	118.0
203.0	GRIDCART	GRID	ELEV	18	215.1	282.8	398.5	394.1	387.9
275.9	GRIDCART	GRID	ELEV	18	303.3	415.2	468.6	477.7	
	GRIDCART	GRID	ELEV	19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11.2	GRIDCART	GRID	ELEV	19	11.2	38.2	66.3	103.0	121.5
168.2	GRIDCART	GRID	ELEV	19	327.7	351.5	366.9	418.2	402.9
342.3	GRIDCART	GRID	ELEV	19	313.3	339.6	456.0	663.3	
	GRIDCART	GRID	ELEV	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	20	9.5	54.0	132.1	167.8	204.9
189.2	GRIDCART	GRID	ELEV	20	268.9	348.9	428.8	487.0	483.4
389.9	GRIDCART	GRID	ELEV	20	337.9	412.9	389.9	419.5	
	GRIDCART	GRID	ELEV	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	21	20.2	139.6	288.9	395.0	365.8
355.2									

459.1	GRIDCART GRID	ELEV	21	323.6	329.6	379.7	487.3	631.7
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	21	483.2	421.8	514.9	686.1	
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
486.8	GRIDCART GRID	ELEV	22	19.6	96.6	175.6	286.3	484.1
525.7	GRIDCART GRID	ELEV	22	431.8	426.5	487.8	468.2	626.3
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	22	422.9	416.9	417.6	546.8	
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4.7	GRIDCART GRID	ELEV	23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
297.4	GRIDCART GRID	ELEV	23	38.2	65.8	97.6	175.8	323.7
615.7	GRIDCART GRID	ELEV	23	334.6	391.5	438.4	486.5	613.2
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	23	551.7	447.8	577.5	516.9	
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4.1	GRIDCART GRID	ELEV	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
381.3	GRIDCART GRID	ELEV	24	42.1	52.3	147.9	118.8	289.7
737.8	GRIDCART GRID	ELEV	24	377.4	375.7	582.8	547.9	678.8
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	24	612.2	548.8	634.1	653.8	
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16.6	GRIDCART GRID	ELEV	25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
381.4	GRIDCART GRID	ELEV	25	37.8	86.4	168.8	261.7	279.6
839.4	GRIDCART GRID	ELEV	25	488.7	422.7	585.6	587.3	736.3
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	25	794.9	697.8	618.2	786.5	
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25.3	GRIDCART GRID	ELEV	26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
354.4	GRIDCART GRID	ELEV	26	48.4	63.7	182.6	188.9	248.8
988.3	GRIDCART GRID	ELEV	26	445.1	582.3	617.7	742.2	887.6
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	26	918.2	831.7	768.4	988.9	
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26.3	GRIDCART GRID	ELEV	27	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1
313.5	GRIDCART GRID	ELEV	27	47.6	69.8	95.9	124.1	167.9
1822.8	GRIDCART GRID	ELEV	27	337.9	458.5	681.7	779.6	816.7
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	27	1863.8	986.7	927.9	969.3	
0.0	GRIDCART GRID	ELEV	28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

27.8	GRIDCART	GRID	ELEV	28	8.8	8.8	8.8	8.8	14.5
211.9	GRIDCART	GRID	ELEV	28	43.8	69.4	98.8	129.6	168.6
858.6	GRIDCART	GRID	ELEV	28	321.9	464.7	454.7	623.6	778.7
0.8	GRIDCART	GRID	ELEV	28	1895.1	932.2	921.1	957.6	
39.8	GRIDCART	GRID	ELEV	29	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
313.9	GRIDCART	GRID	ELEV	29	8.8	8.8	8.8	8.6	18.3
888.6	GRIDCART	GRID	ELEV	29	48.6	66.2	185.1	187.5	236.8
0.8	GRIDCART	GRID	ELEV	29	318.6	346.8	411.1	584.3	611.7
32.2	GRIDCART	GRID	ELEV	29	978.3	899.8	883.8	832.5	
482.4	GRIDCART	GRID	ELEV	30	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
991.2	GRIDCART	GRID	ELEV	30	8.8	8.8	8.8	11.9	29.1
0.8	GRIDCART	GRID	ELEV	30	48.9	72.2	138.1	316.9	373.4
39.8	GRIDCART	GRID	ELEV	30	416.6	426.9	429.5	545.8	785.5
577.9	GRIDCART	GRID	ELEV	30	945.9	893.2	758.2	755.4	
839.6	GRIDCART	GRID	ELEV	31	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
0.8	GRIDCART	GRID	ELEV	31	8.8	8.8	4.4	11.7	22.8
543.3	GRIDCART	GRID	ELEV	31	53.8	86.8	158.7	286.1	431.5
672.9	GRIDCART	GRID	ELEV	31	689.9	521.7	545.1	683.5	668.8
0.8	GRIDCART	GRID	ELEV	31	796.4	774.7	777.9	774.4	
41.8	GRIDCART	GRID	ELEV	32	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
543.3	GRIDCART	GRID	ELEV	32	8.8	8.8	5.2	16.5	25.8
672.9	GRIDCART	GRID	ELEV	32	59.4	81.8	129.4	287.1	483.8
0.8	GRIDCART	GRID	ELEV	32	627.9	639.3	649.7	822.8	752.4
38.8	GRIDCART	GRID	ELEV	32	637.5	666.9	619.1	674.9	
519.9	GRIDCART	GRID	ELEV	33	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
655.8	GRIDCART	GRID	ELEV	33	8.8	8.8	1.8	12.8	22.8
0.8	GRIDCART	GRID	ELEV	33	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
33.3	GRIDCART	GRID	ELEV	33	54.4	89.7	124.1	218.9	374.5
419.7	GRIDCART	GRID	ELEV	33	598.3	728.2	829.8	877.5	698.7
0.8	GRIDCART	GRID	ELEV	33	568.4	668.8	612.7	558.5	
33.3	GRIDCART	GRID	ELEV	34	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
419.7	GRIDCART	GRID	ELEV	34	8.8	8.8	8.8	9.7	22.8
0.8	GRIDCART	GRID	ELEV	34	57.8	79.6	136.4	284.5	291.8
	GRIDCART	GRID	ELEV	34	537.3	661.5	682.6	729.5	691.1

565.6									
	GRIDCART	GRID	ELEV	34	527.7	568.5	588.9	597.8	
	GRIDCART	GRID	ELEV	35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	35	0.0	0.0	0.0	6.4	19.3
35.1									
	GRIDCART	GRID	ELEV	35	51.6	146.9	198.7	388.1	368.1
455.9									
	GRIDCART	GRID	ELEV	35	682.4	628.9	576.8	627.3	556.5
556.2									
	GRIDCART	GRID	ELEV	35	459.4	513.9	588.5	598.8	
	GRIDCART	GRID	ELEV	36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	36	0.0	0.0	0.0	0.0	14.4
31.7									
	GRIDCART	GRID	ELEV	36	67.8	122.0	213.3	382.5	528.5
594.2									
	GRIDCART	GRID	ELEV	36	672.5	618.0	493.2	483.1	452.0
442.8									
	GRIDCART	GRID	ELEV	36	463.5	521.4	436.7	418.1	
	GRIDCART	GRID	ELEV	37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	37	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3
39.1									
	GRIDCART	GRID	ELEV	37	53.0	96.2	281.1	325.3	488.8
677.3									
	GRIDCART	GRID	ELEV	37	661.8	535.7	486.3	488.4	421.0
381.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	37	362.9	448.5	331.2	371.5	
	GRIDCART	GRID	ELEV	38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	38	0.0	0.0	0.0	0.0	9.5
29.8									
	GRIDCART	GRID	ELEV	38	36.3	72.4	195.2	415.7	588.5
573.8									
	GRIDCART	GRID	ELEV	38	615.3	571.0	448.4	345.7	317.1
259.6									
	GRIDCART	GRID	ELEV	38	273.7	384.6	326.2	488.0	
	GRIDCART	GRID	ELEV	39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	39	0.0	0.0	0.0	6.2	9.5
28.5									
	GRIDCART	GRID	ELEV	39	32.5	65.5	155.0	333.7	429.6
453.3									
	GRIDCART	GRID	ELEV	39	495.4	587.7	384.3	215.8	184.1
219.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	39	412.3	391.5	472.1	398.5	
	GRIDCART	GRID	ELEV	40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	40	0.0	0.0	0.0	1.2	5.6
18.6									
	GRIDCART	GRID	ELEV	40	38.2	56.6	173.1	483.2	452.5
486.5									
	GRIDCART	GRID	ELEV	40	486.3	388.7	289.6	123.4	312.1
256.3									
	GRIDCART	GRID	ELEV	40	415.5	586.9	454.5	316.4	
	GRIDCART	GRID	ELEV	41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									
	GRIDCART	GRID	ELEV	41	0.0	0.0	0.0	5.0	64.5

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

29.7	GRIDCART	GRID	ELEV	41	23.8	44.1	133.0	244.3	296.0
237.4	GRIDCART	GRID	ELEV	41	247.3	391.5	288.5	123.7	245.5
266.0	GRIDCART	GRID	ELEV	41	331.7	354.1	351.7	290.7	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	42	0.0	0.0	3.2	6.5	52.7
78.0	GRIDCART	GRID	ELEV	42	35.8	35.0	59.0	124.7	132.1
173.0	GRIDCART	GRID	ELEV	42	159.5	279.5	175.8	126.8	215.7
264.3	GRIDCART	GRID	ELEV	42	423.4	379.1	268.5	289.8	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	43	0.0	0.0	4.8	125.7	34.3
17.2	GRIDCART	GRID	ELEV	43	44.7	30.7	34.1	39.7	25.1
66.0	GRIDCART	GRID	ELEV	43	72.7	124.9	59.8	288.7	241.2
340.0	GRIDCART	GRID	ELEV	43	332.5	280.9	214.9	192.6	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	44	1.3	84.8	27.8	6.6	49.3
10.6	GRIDCART	GRID	ELEV	44	17.5	15.8	15.1	20.5	23.0
68.2	GRIDCART	GRID	ELEV	44	65.4	63.3	177.7	235.8	222.4
356.1	GRIDCART	GRID	ELEV	44	340.2	195.9	184.8	190.2	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	45	0.0	2.7	17.9	36.1	18.0
10.8	GRIDCART	GRID	ELEV	45	13.3	11.2	13.5	17.0	26.6
146.1	GRIDCART	GRID	ELEV	45	289.4	270.1	283.7	135.9	254.1
234.8	GRIDCART	GRID	ELEV	45	226.5	146.2	138.0	217.0	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	46	0.0	0.0	4.1	8.7	10.7
8.9	GRIDCART	GRID	ELEV	46	14.0	13.7	15.6	18.1	24.6
176.5	GRIDCART	GRID	ELEV	46	183.0	126.7	173.5	171.4	150.7
169.6	GRIDCART	GRID	ELEV	46	139.6	132.8	141.3	158.9	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	47	0.0	0.0	1.0	8.5	7.3
12.7	GRIDCART	GRID	ELEV	47	26.5	13.9	17.4	16.9	20.4
33.6	GRIDCART	GRID	ELEV	47	28.1	77.8	166.1	78.2	67.4
102.1									

	GRIDCART	GRID	ELEV	47	118.1	123.2	125.5	182.1	
	GRIDCART	GRID	ELEV	48	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
8.8	GRIDCART	GRID	ELEV	48	8.8	8.8	8.8	4.2	7.9
12.1	GRIDCART	GRID	ELEV	48	154.8	39.2	18.8	13.1	19.1
22.1	GRIDCART	GRID	ELEV	48	27.2	32.1	65.5	49.3	47.1
89.5	GRIDCART	GRID	ELEV	48	79.4	92.1	128.9	152.7	
	GRIDCART	GRID	ELEV	49	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
8.8	GRIDCART	GRID	ELEV	49	8.8	8.8	8.8	7.6	74.6
73.3	GRIDCART	GRID	ELEV	49	137.8	127.1	58.8	14.8	23.8
32.8	GRIDCART	GRID	ELEV	49	27.7	33.4	39.8	44.1	52.8
62.4	GRIDCART	GRID	ELEV	49	98.1	95.3	114.9	174.6	
	GRIDCART	GRID	ELEV	50	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
8.8	GRIDCART	GRID	ELEV	50	8.8	8.8	8.8	13.5	63.8
164.9	GRIDCART	GRID	ELEV	50	189.5	264.9	184.4	38.9	28.4
25.9	GRIDCART	GRID	ELEV	50	22.3	31.8	38.7	37.2	46.5
49.5	GRIDCART	GRID	ELEV	50	87.3	113.7	118.9	144.2	
	GRIDCART	GRID	ELEV	51	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
8.8	GRIDCART	GRID	ELEV	51	8.8	9.2	23.4	6.9	7.5
141.7	GRIDCART	GRID	ELEV	51	248.1	237.4	112.9	86.8	67.9
19.3	GRIDCART	GRID	ELEV	51	26.3	28.7	33.8	34.3	38.8
41.5	GRIDCART	GRID	ELEV	51	111.6	128.3	123.8	117.7	
	GRIDCART	GRID	ELEV	52	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
8.8	GRIDCART	GRID	ELEV	52	8.8	8.8	185.8	49.1	24.9
41.2	GRIDCART	GRID	ELEV	52	171.8	185.7	182.7	131.8	79.8
19.7	GRIDCART	GRID	ELEV	52	21.6	27.8	38.1	38.2	34.1
35.4	GRIDCART	GRID	ELEV	52	58.4	171.1	115.1	116.3	
	GRIDCART	GRID	ELEV	53	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
8.8	GRIDCART	GRID	ELEV	53	8.8	64.4	58.4	188.7	139.6
183.9	GRIDCART	GRID	ELEV	53	68.3	45.1	98.9	18.6	22.7
19.2	GRIDCART	GRID	ELEV	53	28.8	23.7	26.8	28.9	28.3
32.1	GRIDCART	GRID	ELEV	53	41.8	91.1	169.8	83.4	
	GRIDCART	GRID	ELEV	54	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
8.8	GRIDCART	GRID	ELEV	54	8.8	12.9	71.9	56.8	172.7
63.7									

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

19.7	GRIDCART	GRID	ELEV	54	9.2	11.7	14.9	16.1	14.6
39.3	GRIDCART	GRID	ELEV	54	22.8	21.6	23.9	27.1	29.1
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	54	34.9	36.6	95.2	71.3	
59.5	GRIDCART	GRID	ELEV	55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18.8	GRIDCART	GRID	ELEV	55	0.0	0.0	18.5	12.7	93.5
39.6	GRIDCART	GRID	ELEV	55	4.7	41.5	9.4	13.8	9.5
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	55	18.6	26.0	39.8	39.9	28.9
3.0	GRIDCART	GRID	ELEV	55	31.7	33.6	49.9	42.5	
25.8	GRIDCART	GRID	ELEV	56	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51.4	GRIDCART	GRID	ELEV	56	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	56	8.2	11.0	18.9	15.5	18.0
5.4	GRIDCART	GRID	ELEV	56	27.5	23.7	23.3	26.7	29.8
15.9	GRIDCART	GRID	ELEV	56	57.1	54.1	36.7	42.3	
28.4	GRIDCART	GRID	ELEV	57	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	57	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18.5	GRIDCART	GRID	ELEV	57	8.2	9.9	12.4	13.7	14.8
77.1	GRIDCART	GRID	ELEV	57	28.3	34.9	24.0	32.0	24.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	57	55.0	89.0	53.9	36.8	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14.9	GRIDCART	GRID	ELEV	58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51.2	GRIDCART	GRID	ELEV	58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	58	5.5	7.3	18.7	12.2	16.3
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	58	18.4	17.8	24.0	25.6	32.7
37.4	GRIDCART	GRID	ELEV	58	81.9	74.8	51.9	67.5	
49.4	GRIDCART	GRID	ELEV	59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	GRIDCART	GRID	ELEV	59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	GRIDCART	GRID	ELEV	59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	GRIDCART	GRID	ELEV	59	6.9	8.1	9.9	13.6	14.8
	GRIDCART	GRID	ELEV	59	46.1	38.9	21.0	53.1	28.2
	GRIDCART	GRID	ELEV	59	115.9	136.3	183.2	89.5	
	GRIDCART	GRID	ELEV	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	GRIDCART	GRID	ELEV	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	GRIDCART	GRID	ELEV	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	GRIDCART	GRID	ELEV	60	5.0	5.0	7.8	4.8	12.7
	GRIDCART	GRID	ELEV	60	180.0	92.3	61.6	49.0	35.2
	GRIDCART	GRID	ELEV	60	58.9	140.6	182.7	171.5	

0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	61	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9.4	GRIDCART	GRID	ELEV	61	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34.0	GRIDCART	GRID	ELEV	61	57.8	40.9	8.1	12.0	15.6
62.7	GRIDCART	GRID	ELEV	61	147.2	269.7	182.0	161.6	114.4
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	61	55.3	122.4	103.0	201.7	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	62	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	62	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
127.5	GRIDCART	GRID	ELEV	62	0.0	0.0	0.0	67.5	127.0
150.5	GRIDCART	GRID	ELEV	62	183.0	135.5	192.8	305.3	145.7
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	62	85.0	109.8	159.1	253.5	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	63	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	63	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
63.0	GRIDCART	GRID	ELEV	63	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
190.1	GRIDCART	GRID	ELEV	63	40.5	146.8	187.7	258.6	182.5
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	63	122.2	139.6	129.5	196.8	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	64	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	64	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12.8	GRIDCART	GRID	ELEV	64	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1
263.9	GRIDCART	GRID	ELEV	64	63.3	214.6	303.0	321.0	342.3
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	64	139.0	136.1	134.6	111.7	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	65	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	65	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
67.3	GRIDCART	GRID	ELEV	65	0.0	0.0	58.4	75.1	44.5
354.8	GRIDCART	GRID	ELEV	65	60.6	130.4	199.0	381.4	400.4
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	65	148.3	82.9	40.7	63.8	
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	66	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	ELEV	66	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
186.2	GRIDCART	GRID	ELEV	66	0.0	0.0	0.0	129.8	183.0
445.1	GRIDCART	GRID	ELEV	66	132.3	250.4	330.2	450.5	510.1
2859.0	GRIDCART	GRID	ELEV	66	275.5	272.8	124.8	18.2	
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	1	2.0	2.0	2858.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	1	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	1	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	1	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	1	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
GRIDCART	GRID	HILL	2	2.0	2846.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	2	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	2	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	2	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
GRIDCART	GRID	HILL	3	3.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	3	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	3	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	3	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
GRIDCART	GRID	HILL	4	7.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	4	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	4	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	4	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	4	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
GRIDCART	GRID	HILL	5	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	5	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	5	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	5	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
GRIDCART	GRID	HILL	6	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	6	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	6	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	6	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	6	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
GRIDCART	GRID	HILL	7	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	7	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	7	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	7	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	7	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
GRIDCART	GRID	HILL	8	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

GRIDCART	GRID	HILL	14	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	14	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
GRIDCART	GRID	HILL	15	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	15	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	15	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	15	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	15	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	16	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	16	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	16	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	16	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	16	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	17	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	17	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	17	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	17	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	17	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	18	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	18	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	18	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	18	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	18	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	19	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	19	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	19	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	19	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	19	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	20	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	20	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	20	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	20	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	21	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	21	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	27	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0		
GRIDCART	GRID	HILL	28	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	28	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	28	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	28	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	28	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
GRIDCART	GRID	HILL	29	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	29	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	29	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	29	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
GRIDCART	GRID	HILL	30	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	30	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	30	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	30	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
GRIDCART	GRID	HILL	31	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	31	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	31	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	31	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
GRIDCART	GRID	HILL	32	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	32	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	32	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	32	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
GRIDCART	GRID	HILL	33	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	33	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	33	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	33	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
GRIDCART	GRID	HILL	34	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0									
GRIDCART	GRID	HILL	34	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

GRIDCART	GRID	HILL	40	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
GRIDCART	GRID	HILL	41	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	41	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	41	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	41	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	41	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	42	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	42	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	42	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	42	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	42	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	43	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	43	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	43	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	43	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	43	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	44	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	44	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	44	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	44	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	44	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	44	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	45	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	45	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	45	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	45	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	45	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	46	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	46	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	46	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	46	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	46	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	47	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	47	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	47	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado

2859.0	GRIDCART GRID	HILL	54	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	54	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	54	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	54	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	54	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	55	2858.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	55	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	55	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	55	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	55	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	56	0.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	56	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	56	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	56	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	56	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	57	0.0	2856.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	57	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	57	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	57	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	57	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	58	0.0	0.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	58	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	58	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	58	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	58	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	59	0.0	0.0	2846.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	59	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	59	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	59	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	59	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	60	0.0	0.0	0.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	60	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART GRID	HILL	60	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0

2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	60	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	60	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
	GRIDCART	GRID	HILL	61	0.0	0.0	0.0	0.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	61	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	61	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	61	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	61	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
	GRIDCART	GRID	HILL	62	0.0	0.0	0.0	0.0	2846.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	62	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	62	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	62	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	62	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
	GRIDCART	GRID	HILL	63	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	63	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	63	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	63	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	63	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
	GRIDCART	GRID	HILL	64	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	HILL	64	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	64	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	64	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	64	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
	GRIDCART	GRID	HILL	65	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	HILL	65	0.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	65	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	65	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	65	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	
	GRIDCART	GRID	HILL	66	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	GRIDCART	GRID	HILL	66	0.0	2846.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	66	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	66	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0
2859.0	GRIDCART	GRID	HILL	66	2859.0	2859.0	2859.0	2859.0	

RE GRIDCART GRID END

```
**RE DISCCART coordxutm coordyutm z
DISCCART 583983.4 1229476.1 13.7
DISCCART 585469.9 1225578.9 28.1
DISCCART 585548.1 1241798.6 4.8
DISCCART 586822.5 1242688.5 28.1
DISCCART 586356.4 1242589.4 19.7
DISCCART 585385.7 1226963.3 25.2
DISCCART 585888.4 1243823.7 51.6
```

RE FINISHED

ME STARTING

```
SURFFILE aermet2.sfc
PROFFILE aermet2.pfl
SURFDATA 88828 2888 BARRANQUILLA, CO
UAIRDATA 88828 2888 BARRANQUILLA, CO

** SITEDATA 99999 1988 HUDSON
PROFBASE 8.8 METERS
ME FINISHED
```

OU STARTING

```
RECTABLE ALLAVE FIRST
** MAXTABLE ALLAVE 58
SUMMFILE AERTEST.SUM
PLOTFILE 24 ALL FIRST salida.txt
```

OU FINISHED

APÉNDICE F: Incertidumbre

La incertidumbre es la estimación estadística de la magnitud del error en una medición, asociado con el resultado de una medida que describe la dispersión de los valores que se pueden atribuir razonablemente al valor de esta magnitud. Se define por una banda alrededor del valor medido, para una probabilidad (nivel de confianza) determinada, normalmente del 95% (Álvarez, 2015).

El concepto está asociado con la utilización de datos en diferentes campos, en este orden y aplicado al presente estudio, la incertidumbre se encuentra vinculada con la exactitud de las mediciones de los datos obtenidos de la fuente, de la información de los procesos, del inventario de emisiones, de las variables meteorológicas utilizadas para los datos de entrada del modelo y de los datos obtenidos como salida del modelo.

La incertidumbre en los datos obtenidos de una fuente ocurre como resultado de varios aspectos entre ellos, inexactitud de los instrumentos, inadecuado manejo de filtro durante transporte y almacenamiento, contaminación artificial de muestras en su manipulación, pérdida de material colectado y errores en el manejo de los datos, mientras que la incertidumbre en la información de los procesos puede ser causada por la inexactitud e imprecisión de la cuantificación de variables y fuentes de datos involucradas en el proceso estudiado (Arciniegas, 2011; Ministerio de Medio Ambiente, 2010).

Aplicado al estudio realizado, temas como la falta de datos de concentración de PST y MP₁₀ de algunos años para las estaciones de monitoreo de CORPMAG por problemas de fluido eléctrico o por reparación del equipo de medición, así como la incertidumbre propia del equipo de medición de CORPAMAG, puede ser considerado como fuente de incertidumbre en los resultados generados en el capítulo 5.

Incertidumbre Inventario de emisiones

La incertidumbre del inventario de emisiones está asociada con el grado de confianza de la información resultante del mismo y depende de la utilización de datos e información sobre las fuentes estudiadas y de la implementación de metodologías para el cálculo y estimación de las emisiones (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013).

Incertidumbre asociada a la información para la estimación:

En muchos casos no fue posible tener acceso a las instalaciones de la fuente fija y al detalle de sus procesos por lo que no hay suficiente información local y específica disponible respecto a la fuente estudiada, teniendo en cuenta lo anterior fue necesario recurrir a datos históricos incluidos

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado en informes anuales elaborados y publicados por organismos públicos, documentos publicados por el sector privado relacionados con el tema estudiado, estadísticas publicadas por organismos de aplicación, datos extrapolados de otras fuentes y realizar algunas suposiciones, introduciendo con ello mayor incertidumbre al cálculo posterior de emisiones (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013).

Incertidumbre asociada a los métodos de estimación:

La utilización de factores de emisión agrega incertidumbre a la estimación de las emisiones debido a que pueden no reflejar las condiciones nacionales, variaciones del proceso de emisión o características de los equipos de medición, principalmente porque son factores desarrollados por otros países para sus condiciones (Universidad Pontificia Bolivariana, 2006; Díaz, 2009; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013).

En esta línea las principales fuentes de incertidumbre para el inventario de emisiones generado, se encuentran asociadas a la generación de datos a partir de la interpolación de valores para el cálculo de las emisiones de fuentes puntuales de MP₁₀, la interpolación de valores para el cálculo de las emisiones a partir de las áreas para carga y descarga de puertos de carbón, estimación aproximada de cantidad de vehículos por segmento de calle para el cálculo de emisiones de origen vehicular y finalmente que los factores utilizados para el cálculo son factores genéricos tomados de la guía de la Agencia Europea del Medio Ambiente.

Incertidumbre en datos Meteorológicos

La temperatura, cobertura de nubes, estabilidad atmosférica, punto de rocío, dirección y velocidad del viento forman parte de las variables meteorológicas que intervienen en la predicción de emisión de contaminantes de los modelos de dispersión y por tanto en los errores asociados a los modelos de calidad del aire.

Los datos meteorológicos son la causa de más de la mitad de la incertidumbre en la predicción de concentraciones horarias con modelos de dispersión (Diez et al., 2014). Además de la variabilidad natural de la atmósfera, aspectos como el uso de instrumentos de medición inapropiados, la utilización de técnicas de recolección y almacenamiento de estos datos, tienen gran influencia en la incertidumbre de un modelo de dispersión.

El uso de datos meteorológicos tomados en lugares no representativos debido a la ausencia de estaciones en el lugar objeto de estudio, es una limitación en la precisión de los resultados del

modelo, en este contexto es preciso aclarar que los datos utilizados en el estudio y proporcionados por una estación cercana a la zona de estudio pueden tomarse como representativos del área geográfica estudiada.

No obstante para aumentar la calidad de los datos y con ello disminuir en gran medida las bandas de incertidumbre y mejorar la exactitud de las estimaciones realizadas con el modelo de dispersión, sería mejor contar con varias estaciones en la zona de estudio.

Incertidumbre modelo

La incertidumbre de los modelos de dispersión se encuentra asociada principalmente a los siguientes aspectos: Tasas de emisión, meteorología, definición de la fuente y del rendimiento general del modelo (Stocker et al., 2015).

El ajuste del modelo matemático a la física y química de la atmósfera está vinculado directamente con la precisión del modelo, de igual manera la calidad de los datos utilizados aumenta la confianza en las concentraciones de salida, y las aproximan más a la realidad (Tartakovsky et al., 2013; Stocker et al., 2015; INGETEC SA, 2017).

En consecuencia los factores que afectan en mayor grado la precisión de los resultados del modelo son el modelo matemático en el cual se basa y la calidad de los datos de entrada, tales como la información meteorológica, datos de elevación, ubicación de las fuentes y receptores y de las emisiones de los contaminantes calculadas a partir de factores de emisión.

Adicionalmente el ajuste entre el valor real y los resultados obtenidos como salida del modelo basados en la información de entrada del mismo, constituye una medida de la incertidumbre que se puede inferir para la utilización de los resultados obtenidos y generar una conclusión de cómo el modelo puede ser aplicado (IDEAM, 2002).

Estudios realizados señalan que para reducir la incertidumbre el modelo AERMOD, éste debe ser interpretado teniendo en cuenta que es fiable estimando los puntos de mayor concentración y los resultados proporcionan un orden de magnitud probable y solo en esas dimensiones puede ser interpretado (INGETEC SA, 2017).

Por último teniendo en cuenta lo anterior es conveniente agregar que las limitaciones que podrían generar incertidumbre a los resultados del modelo aplicado corresponden a la falta de

Influencia de las actividades costeras en el Magdalena sobre las concentraciones de material particulado
inclusión de fuentes por ausencia de datos para el cálculo de la emisión y al origen de la información meteorológica, debido a que la alimentación del modelo se realizó con información tomada de una estación en una ciudad cercana a la zona de estudio y no dentro de ella.