

DETERMINACIÓN DE INTERACCIONES DEL FLUJO DE AIRE Y LA
CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO EN ZONA
MINERA A CIELO ABIERTO EN EL DEPARTAMENTO DE LA
GUAJIRA, (COLOMBIA) A TRAVES DE FUNCIÓN DE
PROBABILIDAD CONDICIONAL



Por:

RONNY JAVIER LÓPEZ HERNÁNDEZ
ronnyjlopez@gmail.com

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
SISTEMA DE UNIVERSIDADES ESTATALES DEL CARIBE COLOMBIANO
UNIVERSIDAD DE LA GUAJIRA
Riohacha, de 2018

DETERMINACIÓN DE INTERACCIONES DEL FLUJO DE AIRE Y LA
CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO EN ZONA
MINERA A CIELO ABIERTO EN EL DEPARTAMENTO DE LA
GUAJIRA, (COLOMBIA) A TRAVES DE FUNCIÓN DE
PROBABILIDAD CONDICIONAL

RONNY JAVIER LÓPEZ HERNÁNDEZ

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Director:
M.Sc. ARNALDO DE JESUS PERALTA CASTILLA

Maestría en Ciencias Ambientales
Sistema de Universidades Estatales del Caribe Colombiano
Universidad de la Guajira
Riohacha, 2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

JURADO 2

AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento primero a mi esposa, mi hija y mi familia que siempre me brinda su apoyo incondicional en todas las decisiones tomadas.

A Dios por permitirme no desfallecer en los momentos de dificultad y guiarme en el camino para el desarrollo de este trabajo a investigadores que brindaron su apoyo para que culminara favorablemente la investigación, entre ellos a:

Ingeniero Roberto Rojano de la Universidad de La Guajira por ayudarme a encaminar el enfoque de la investigación.

Ingeniero Luis Carlos Angulo de la Universidad Popular del Cesar por permitirme participar en su proyecto de investigación, la cual permitió la recolección de la información pertinente que hace referencia este estudio.

Al estadista Arnaldo Peralta Castilla por su valiosa colaboración y permanente ayuda.

Al Grupo de investigación de Energía Ambiente y Biotecnología, y en especial a su Líder Luis Carlos Díaz Mueque y miembros por ayudarme y apoyarme en la realización de este proyecto de investigación.

A la Universidad de La Guajira por brindarnos todos los espacios académicos

CONTENIDO

	pág.
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS.....	11
1. INTRODUCCIÓN	14
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo general.....	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	18
3.1 CONTAMINACIÓN DEL AIRE	18
3.1.1 Aerosoles atmosféricos.....	18
3.1.1.1 Tipos de aerosoles atmosféricos	19
3.1.1.2 Distribución de tamaño de las partículas	22
3.1.2 Clasificación de acuerdo con las fuentes de emisión	24
3.2 TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE.....	27
3.2.1 Parámetros meteorológicos	28
3.2.1.1 Dirección del viento.....	29
3.2.1.2 Velocidad de viento	29
3.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS AEROSOLES.....	29
3.4 MUESTREO DE MATERIAL PARTICULADO.....	33
3.4.1 Métodos equivalentes para el monitoreo de PM.....	33
3.4.2 Medios y porta filtros	38
3.5 ANÁLISIS DE DATOS DE CALIDAD DE AIRE A TRAVES DE LA FUNCIÓN DE PROBABILIDAD CONDICIONAL (CPF)	41
3.5.1 Software de análisis estadístico para el análisis de contaminación de aire. 43	
3.5.1.1 Package Openair:	44
4. DISEÑO METODOLOGICO	46
4.1 ÁREA DE ESTUDIO	46
4.1.1 Temperatura.....	47
4.1.2 Precipitación.....	48

4.2	CAPTURA Y DEPURACIÓN DE INFORMACIÓN.....	48
4.2.1	Análisis de la variación temporal de las concentraciones de PM₁₀, TSP y Datos meteorológicos de la zona minera del Cerrejón en el periodo 2012 al 2016.	48
4.2.2	Análisis de los factores meteorológicos de velocidad y dirección de viento	50
4.2.3	Muestreadores de TSP Y PM₁₀ En las estaciones de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón.	51
4.3	ANÁLISIS Y CALCULO DE LAS CONCENTRACIONES DEL MATERIAL PARTICULADO.....	55
4.4	Análisis DE LAS INTERACCION, CORRELACIÓN Y REGRESIÓN MULTIPLE EN LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE DEL CERREJÓN.....	55
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
5.1	Análisis de la variación temporal de las concentraciones de PM ₁₀ , TSP DE la zona minera del Cerrejón en el periodo 2012 al 2016.....	57
5.1.1	Análisis de la concentración de PM₁₀ en las estaciones de Cerrejón.	58
5.1.2	Diagramas de correlación para PM₁₀, TSP, la velocidad y dirección del viento.	59
5.1.2.1	Análisis de los factores meteorológicos de velocidad y dirección de viento en las estaciones seleccionadas	63
5.2	análisis de las concentraciones del material particulado por regresión múltiple en las estaciones de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón.	67
5.2.1	Análisis de las concentraciones de TSP y PM₁₀ mediante regresiones múltiples para las estaciones seleccionadas de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón.	67
5.3	ANÁLISIS DE LAS INTERACCIONES DEL MATERIAL PARTICULADO DE TSP Y PM ₁₀ DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE DEL CERREJÓN SELECCIONADAS POR FUNCION PROBABILIDAD CONDICIONADA.....	81
5.3.1	Descripción de las parcelas polares para Pm₁₀	81
5.3.2	Descripción de las parcelas polares para TSP	90
5.4	Análisis de la caracterización fisicoquímica del material particulado pm ₁₀	91
6.	CONCLUSIONES	112
7.	RECOMENDACIONES	114
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

9. ANEXOS.....	122
Anexo 1: Graficas resumen de los datos de las estaciones de las estaciones seleccionas en el estudio.....	122
Anexo 2: Comportamiento de la concentración de PM10 y PST de las estaciones de Cerrejón	125
Anexo 3: Matrices de correlaciones por estaciones de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón.....	128
Anexo 4: Rosas de vientos para los periodos 2012 – 2016 de las estaciones de la red de calidad de aire del cerrejón.....	131
Anexo 5: Evidencia de actividades cerca de las estaciones de monitoreo de calidad de aire del cerrejón.....	141

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones típicas de masa y partículas para diferentes aerosoles troposféricos cerca de la superficie de la Tierra. Tabla traducida y adaptada de (Warneck, 1988).....	19
Tabla 2. Principales Fuentes de contaminación antrópica.....	26
Tabla 3. Referencia designada por la EPA de los EE. UU. Y métodos equivalentes para PM ₁₀ y PM _{2.5}	33
Tabla 4. Relación de los tamaños selectivos de acuerdo con el flujo de los muestreadores.....	36
Tabla 5. Lista de filtro y resultados de eficiencia de recolección.	38
Tabla 6. Herramientas de Openair Agrupadas por similitud en su utilidad.....	44
Tabla 7. Ubicación y características de las estaciones de la Red de calidad de aire de Cerrejón.....	50
Tabla 8. Número de muestras de PM ₁₀ recolectada con equipos Tisch Environmental, modelo TE-6070DV-BL sin escobillas (Brushless).....	54
Tabla 9. Concentraciones de PM ₁₀ registrada entre 2012 – 2016.....	59
Tabla 10. Modelo de regresión para la concentración de TSP de la estación Barrancas	67
Tabla 11. Análisis de Varianza para la concentración de TSP de la estación Barrancas....	68
Tabla 12. Modelo de regresión para la concentración de PM ₁₀ de la estación Barrancas ..	69
Tabla 13. Análisis de Varianza para la concentración de PM ₁₀ de la estación Barrancas ..	69
Tabla 14. Modelo de regresión para la concentración de TSP de la estación Las Casitas..	71
Tabla 15. Análisis de Varianza para la concentración de TSP de la estación Las Casitas .	71
Tabla 16. Modelo de regresión para la concentración de PM ₁₀ de la estación Las Casitas	72
Tabla 17. Análisis de Varianza para la concentración de PM ₁₀ de la estación Las Casitas	72
Tabla 18. Modelo de regresión para la concentración de TSP de la estación Provincial ...	74
Tabla 19. Análisis de Varianza para la concentración de TSP de la estación Provincial ...	74
Tabla 20. Modelo de regresión para la concentración de PM ₁₀ de la estación Provincial..	75
Tabla 21. Análisis de Varianza para la concentración de PM ₁₀ de la estación Provincial	76
Tabla 22. Modelo de regresión para la concentración de TSP de la estación Sol y Sombra.....	77
Tabla 23. Análisis de Varianza para la concentración de TSP de la estación Sol y Sombra.....	77
Tabla 24. Modelo de regresión para la concentración de PM ₁₀ de la estación Sol y Sombra.....	79
Tabla 25. Análisis de Varianza para la concentración de PM ₁₀ de la estación Sol y sombra.....	79
Tabla 26. Matriz de varianza por análisis de componente principal de la estación de Barrancas.....	91
Tabla 27. Matriz Resultado del análisis de componente principal de la estación de Barrancas.....	93
Tabla 28. Matriz de varianza por análisis de componente principal de la estación de Provincial.....	97

Tabla 29. Matriz Resultado del análisis de componente principal de la estación de Provincial	98
Tabla 30. Matriz de varianza por análisis de componente principal de la estación de Las Casitas	102
Tabla 31. Matriz Resultado del análisis de componente principal de la estación de Las Casitas	103
Tabla 32. Matriz de varianza por análisis de componente principal de la estación de Sol y Sombra.	107
Tabla 33. Matriz Resultado del análisis de componente principal de la estación de Sol y Sombra.	108

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Distribución de tamaños en función del diámetro de las partículas. Imagen traducida de (Watson & Chow, 2000).</i>	24
<i>Figura 2. Características y distribución de tamaños aerodinámicos del material particulado. (Daniel A, 2008).</i>	25
<i>Figura 3. Papel de la atmosfera en la contaminación del aire, traducida y adaptada de (Daniel A, 2008).</i>	28
<i>Figura 4. Localización de la mina de Carbón Cerrejón, Fuente Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.</i>	47
<i>Figura 5. Localización de las estaciones de monitoreo de la zona de influencia de la mina de Cerrejón. Fuente Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.</i>	49
<i>Figura 6. Muestreadores de alto volumen TE-6070 y TE-5170 para la determinación de PM10 y TSP por método gravimétrico, de la red del Cerrejón.</i>	51
<i>Figura 7. Instalación del equipo TE-6070DV-BL sin escobillas en la Estación Sol y Sombra</i>	52
<i>Figura 8. Instalación del equipo TE-6070DV-BL sin escobillas en la Estación Provincial</i>	52
<i>Figura 9. Instalación del equipo TE-6070DV-BL sin escobillas en la Estación Barrancas</i>	53
<i>Figura 10. Instalación del equipo TE-6070DV-BL sin escobillas en la Estación Las Casitas</i>	53
<i>Figura 11. Calibración y mantenimiento a Muestreadores de alto volumen TE-6070 para la determinación de PM10, de la red del Cerrejón.</i>	54
<i>Figura 12. Grafica resumen de los datos de Barrancas periodo 2012-2016.</i>	57
<i>Figura 13. Comportamiento de la concentración de PM₁₀ y PST</i>	59
<i>Figura 14. Matriz de correlación de la estación de Provincial de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón.</i>	60
<i>Figura 15. Matriz de correlación de la estación de Barrancas de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón del 2012 al 2016.</i>	62
<i>Figura 16. Rosas de vientos para los periodos 2012 – 2016 de las estaciones de la red de calidad de aire del Cerrejón.</i>	64
<i>Figura 17. Rosa de los vientos para periodos anuales entre 2012 al 2016 en la estación Barrancas.</i>	65
<i>Figura 18. Rosa de los vientos para periodos mensuales entre 2012 al 2016 en la estación Barrancas.</i>	66
<i>Figura 19. Gráfico NOVA para contaminante TSP (batsp)</i>	68
<i>Figura 20. Gráfico NOVA para contaminante PM₁₀ (bapm₁₀)</i>	70
<i>Figura 21. Gráfico NOVA para contaminante TSP (catsp)</i>	72
<i>Figura 22. Gráfico NOVA para contaminante PM₁₀ (capm₁₀)</i>	73
<i>Figura 23. Gráfico NOVA para contaminante TSP (protsp)</i>	75
<i>Figura 24. Gráfico NOVA para contaminante PM₁₀ (propm₁₀)</i>	77
<i>Figura 25. Gráfico NOVA para contaminante TSP (systsp)</i>	78
<i>Figura 26. Gráfico NOVA para contaminante PM₁₀ (syspm₁₀)</i>	80

<i>Figura 27. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de las estaciones de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón 2012-2016.</i>	82
<i>Figura 28. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Provincial para el periodo 2012 – 2016.</i>	83
<i>Figura 29. Gráfico Polar de Participaciones de PM_{10} de la estación Provincial para el año 2016.</i>	84
<i>Figura 30. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Provincial para el periodo 2016 representada en Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.</i>	84
<i>Figura 31. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Barrancas para el periodo 2012 – 2016.</i>	85
<i>Figura 32. Gráfico Polar de Participaciones de PM_{10} de la estación Barrancas para el año 2016.</i>	86
<i>Figura 33. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Barrancas para el periodo 2016 representada en Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.</i>	86
<i>Figura 34. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Las Casitas para el periodo 2012 – 2016.</i>	87
<i>Figura 35. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Las Casitas para el periodo 2016 representada en Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.</i>	88
<i>Figura 36. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Sol y Sombra para el periodo 2012 – 2016.</i>	89
<i>Figura 37. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Sol y Sombra para el periodo 2016 representada en Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.</i>	89
<i>Figura 38. Gráfico polar de probabilidad condicional de TSP de las estaciones de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón 2012-2016.</i>	90
<i>Figura 39. Gráfico de análisis de componente a nivel del suelo Barrancas.</i>	95
<i>Figura 40. Gráfico de análisis de componente por ortogonalidad por componentes pareados de Barrancas.</i>	96
<i>Figura 41. Gráfico de análisis de componente a nivel del suelo de Provincial.</i>	100
<i>Figura 42. Gráfico de análisis de componente por ortogonalidad por componentes pareados de Provincial.</i>	101
<i>Figura 43. Gráfico de análisis de componente a nivel del suelo de Las Casitas.</i>	105
<i>Figura 44. Gráfico de análisis de componente por ortogonalidad por componentes pareados de Las Casitas.</i>	106
<i>Figura 45. Gráfico de análisis de componente a nivel del suelo de Sol y Sombra.</i>	110
<i>Figura 46. Gráfico de análisis de componente por ortogonalidad por componentes pareados de Sol y Sombra.</i>	111

RESUMEN EXTENDIDO

El presente trabajo implementa el análisis de probabilidad condicionada y regresiones múltiples por software estadísticos con el propósito de buscar un mayor entendimiento de la dinámica de la contaminación atmosférica por material particulado en el área de influencia de la explotación minera de carbón del Cerrejón en el departamento de La Guajira; por medio de los rocesos naturales y posible localización de las fuentes de mayor impacto en las estaciones de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón, comprendido en el periodo entre los años 2012 al 2016. Para este estudio se seleccionaron las estaciones de Barrancas, Provincial, Las Casitas y Sol y Sombra.

Se encontró que, de acuerdo con las asociaciones por medio de las regresiones múltiples, permitió determinar el grado de interrelaciones entre las concentraciones del material particulado y las condiciones meteorológicas del área de influencia y el grado de la tendencia línea del crecimiento o del ascenso entre las variables analizadas por medio de sus modelos estadísticos. El programa R y su herramienta Openaire, permitió aprovechar los datos generados por la Red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón de una forma más eficiente y adecuada para la gestión y análisis de la calidad de la calidad del aire y su dinámica en la zona de estudio; mediante la aplicación de sus herramienta espaciales como el grafico Polar permitiendo correlacionar esta información con los resultados del Análisis de Componente Principales de las concentraciones de la especiación química del material particulado PM_{10} de las estaciones estudiadas, dando como resultados la identificación por relación estadística de posibles fuentes de contaminación local y regional, entre las que se encuentra: Polvo de carbón, Quema de madera residencia, Suelos agrícolas y combustión por camión pesado, entre otras como fuentes locales.

Palabras claves: contaminación del aire, Openaire, red de monitoreo, análisis de componente principales, función de probabilidad condicionada.

1. INTRODUCCIÓN

El carbón desempeña un papel vital en el cumplimiento de las necesidades energéticas mundiales y es fundamental para el desarrollo de infraestructura, representado el 37% de la electricidad mundial y el 74% del acero del mundo se produce con carbón de acuerdo a la asociación mundial del carbón; conforme a la bases estadísticas de esta asociación, en cuanto a las reservas de carbón probadas para el año 2016 para Colombia fueron de 4.881 millones de toneladas, representado la segunda reserva de este mineral en América Latina. (British Petroleum, 2017).

Actividades como la minería a cielo abierto genera el 92.75% de carbón mineral produciendo en nuestro país, así mismo la producción de carbón por el departamento de La Guajira entre los años 2016 y 2017, representaron el 36.11% y 35.96% respectivamente (Ministerio de Minas y Energía, 2017). de igual forma en los proyectos nacionales y estratégicos PINE / La Guajira, La Mina de Carbón a cielo abierto El Cerrejón, cuenta con un área de explotación aproximada de 69.661 Ha, con una producción para el tercer trimestre de 2018 de 32.318 millones de toneladas y una producción proyectada de 35 Mton, las cuales mediante Resolución 1386 del 18 de noviembre de 2014 la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA, autorizo obras y actividades para el incremento de producción de 35 a 41 millones de toneladas al año, proyecto denominado P40(Puerto y Línea Férrea cuenta con capacidad instalada de 41 Mton).

La contaminación atmosférica por material particulado en Colombia, es una de las problemáticas en aumento por la diversificación de fuentes en las regiones del país, (Pey, Querol, Alastuey, Forastiere, & Stafoggia, 2013) establecen que las contribuciones naturales y las diferentes condiciones climáticas son condicionantes particulares de las regiones locales y su variabilidad en las concentraciones del material particulado, (Lucarelli et al., 2015) expone que la comparabilidad de los datos de diferentes épocas sin una debida caracterización química de las muestras recogidas y el análisis de la distribución de las fuentes identificadas, limitan el alcance de los resultados y no permite una gestión eficiente en la calidad de aire.

La importancia en los planes de monitoreo de calidad de aire a nivel superficial de la atmosfera, proporciona a los programas de gestión de descontaminación de las áreas de influencia de las operaciones mineras, las acciones necesarias para el control y mitigación de los posibles efectos nocivos a los receptores, la composición química del material particulado aerotransportado, es fundamental para identificar las posibles acciones nocivas y contaminante que genere en los receptores (Pietrodangelo, Salzano, Rantica, & Perrino, 2013).

De acuerdo con las investigaciones, la eficiencia de los planes de reducción, están basados en la información obtenidos de los modelos de dispersión de las fuentes y de receptores (Fragkou, Douros, & Moussiopoulos, 2006); de hecho, la identificación de las fuentes de contaminación es primordial en muchos de los procesos de calidad de aire, como por ejemplo la identificación de las fuentes naturales en lo que respecta a sus interrelaciones y aportes en la evaluación de la calidad de aire.

En la actualidad existen varios paquetes de funciones o herramientas estadísticas que permite la visualización de información, basado en software desarrollados para el enfoque de análisis y procesamiento estadísticos de información de las redes de monitoreo de calidad de aire de una región, permitiendo así un análisis detallado de la problemática ambiental que se genera en relación a las fuentes emisoras de contaminación y su interacción con la meteorología regional (D. Carslaw, 2015).

Si bien en Colombia, la contaminación atmosférica es identificada como uno de los problemas más severos en los departamentos del norte del país; también es cierto que la ausencia de estudio a nivel nacional relacionado con esta problemática hace difícil extrapolar resultados, en tal sentido es necesario basarse en referencias y datos publicados que proporcionen alguna perspectiva general de los impactos, de acuerdo a (B. Larsen, 2004) la relación que presenta las ciudades de Colombia en cuanto a las proporciones de PM_{2.5} basados en las mediciones de PM₁₀ es del 0.6 y de acuerdo a esta relación una de las principales fuentes de emisión es debido a la quema de residuos, residuos agrícolas e incendios forestales con una relación entre (0,93 al 0,96); de igual forma la quema de combustible y el polvo de carretera tienen relación de (0,96 y 0,98) respectivamente.

Las principales fuentes de contaminación de aire con relación a explotación minera a cielo abierto son especialmente las partículas suspendidas totales (TSP) y partículas menores de diez micras (PM₁₀) (Chakraborty et al., 2002; Ghose & Majee, 2007a).

En consecuencia, es clave para el análisis de datos de contaminación del aire determinar las relaciones de las variables entre sí, las relaciones entre las caracterizaciones químicas y los parámetros meteorológicos son extremadamente comunes para comparar, correlacionar y determinar las relaciones (Grange, Lewis, & Carslaw, 2016).

El análisis químico y los avances para la identificación de las posibles fuentes de contaminación por medio de la estadística pueden identificar las interacciones en el área de influencia de las operaciones mineras, teniendo en cuenta las posibles interacciones entre las fuentes y las incertidumbres de las concentraciones del material particulado.

El material particulado emitido desde las diversas fuentes de contaminación a la atmosfera en zonas impactadas por minería a cielo abierto, hace que las incertidumbres de los modelos o identificación de dichas fuentes son difíciles de identificar solo con la caracterización físico química, es por ello que se hace necesario la aplicación de diversos estudios que posibiliten una clara individualización de cada una de ellas, para la individualización químicas de las fuentes a través de la cuantificación de la abundancia de cada fracción de las especies químicas que componen una fuente, ayuda a la identificación y evaluación de la contaminación atmosférica (Patil, Kumar, Menon, Shah, & Sethi, 2013).

En la actualidad tanto las autoridades ambientales del departamento de La Guajira como la empresa Cerrejón no contemplan en su programa de monitoreo y vigilancia de la calidad de aire herramientas sencillas que permitan la evaluación de factores como los descritos por (Pietrodangelo et al., 2013) tales como las mezclas de fuentes de contaminación atmosféricas locales, la variabilidad del sitio, todos estos factores finalmente influyen en el receptor o estación de monitoreo durante el periodo de muestreo 2012 – 2016, es por ello que la aplicación de la función de Probabilidad Condicional (CPF) proporciona una alternativa que permitirá direccionar la identificación de las principales fuentes de contaminación del área en el estudio.

Con lo que respecta al análisis y evaluación objetiva de las Redes de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire, se han utilizados ampliamente técnicas estadísticas multivariantes, como lo es el análisis de componentes principales (ACP), así mismo se utilizan técnicas basadas en función de Probabilidad Condicionada ampliamente conocidas para la evaluación y el manejo adecuado de los datos capturados en las Redes de monitoreos, sin embargo el uso combinado de estas técnicas ha sido recientemente llevado a cabo desde 2006 (Gramsch, Cereceda-Balic, Oyola, & von Baer, 2006).

En este orden de idea, se hace necesario proponer la aplicación técnicas estadísticas que permita evaluar las interacciones del flujo de aire y la contaminación por material particulado generada por las actividades minera a cielo abierto en el departamento de La Guajira, desde un ámbito científico enmarcado en la línea de investigación de Medio Ambiente, Salud Y Cultura de la Maestría en Ciencias Ambientales.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las interacciones del flujo de aire y la contaminación por material particulado en zona minera a cielo abierto en el departamento de la guajira, (Colombia) a través de función de probabilidad condicional.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el comportamiento espacial y temporal del flujo de aire, correlacionándolas con la concentración de TSP y PM10 en las estaciones seleccionadas.
- Analizar la caracterización química y física del material particulado de PM10, muestreado en las estaciones de la red de calidad de aire del Cerrejón, relacionadas con el área de estudio.
- Determinar las interacciones del material particulado TSP y PM10 de la zona minera del departamento de La Guajira, mediante la aplicación de función de probabilidad condicional a través de paquetes estadísticos.

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 CONTAMINACIÓN DEL AIRE

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), definió a la contaminación del aire como “Cualquier sustancia en el aire que pudiera, en una concentración suficientemente alta, interferir con la salud humana, a otros animales, a la vegetación o materiales. Los contaminantes pueden incluir casi cualquier composición natural o artificial de la materia que pueda ser transportada por el aire. Pueden estar en forma de partículas sólidas, gotas de líquido, gases o en combinación de estos. En general, se dividen en dos grupos principales: (1) los emitidos directamente de fuentes identificables y (2) los producidos en el aire por interacción entre dos o más contaminantes primarios, o por reacción con constituyentes atmosféricos normales, con o sin fotoactivación” (U.S. Environmental Protection Agency, 2009), asimismo, (Daniel A. Vallero, 2008) deduce sobre la importancia del término “inferir”, el cual implica alcanzar un estado de cierta calidad para sustentar la vida humana y de cualquier otro tipo. Otra forma de ver esas interferencias mencionadas en el concepto anteriormente descrito, es en un contexto de amenaza, riesgo o daño; debido al aumento del interés de las humanidad desde décadas de 1960, percibiendo claramente la amenaza a la supervivencia de las especies biológicas causada por el daño de los ecosistemas; estas preocupaciones toman especial importancia al identificar daño a la salud mediante enfermedades directamente asociadas con episodios tangibles de contaminación de aire, identificando enfermedades respiratorias e incluso muertes asociadas con combinaciones de variables climáticas y emisiones de contaminantes.

Numerosos estudios surgieron por la ansiedad de preocupaciones emergentes, entre ellas el auge de la utilización de centrales nucleares para esa época y en particular la preocupación de la posibilidad de un evento de fusión y de la generación de residuos nucleares identificados como causales de cáncer, así mismo la utilización de sustancias petroquímicas emergente de la industria, liberando sustancias químicas como el Dicloro-Difenil Tricloroetano (DDT) y otros pesticidas, estos se sumarias a los contaminantes convencionales más familiares, como el hollín, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno y azufre (Daniel A, 2008).

3.1.1 Aerosoles atmosféricos.

En 1929 fue introducido por primera vez el concepto de aire como un coloide por los investigadores Schmauss y Wigand, a los cuales se le atribuye también el concepto de aerosol enfocado al aire que contiene un conjunto de partículas suspendida, De la misma manera el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate

Change) ha contextualizado este concepto para la gestión de la calidad de aire, el cual lo define como “el conjunto de partículas sólidas y líquidas suspendidas en la atmósfera”, el cual comparte relación con el concepto de la EPA y los categoriza por su origen de emisión, los cuales pueden ser de tipo natural: derivados de las plantas, volcanes, mares y desiertos, o de tipo antropogénico: derivados de las actividades humanas como son las industrias, emisiones vehiculares y quema de biomasa. Estos aerosoles están comprendidos entre 0.01µm y 10µm, de acuerdo su origen, reacción, evolución y a los procesos atmosféricos involucrados.

3.1.1.1 Tipos de aerosoles atmosféricos

Teniendo en cuenta el origen de los aerosoles atmosféricos (Junge,1963) el cual es citado por (Warneck, 1988) distinguió tres tipos de aerosol: el continental, el marino y el aerosol de fondo troposférico, los cuales se distingue por su composición química, los dos primeros contienen principalmente materiales de fuentes superficiales cercanas, algo modificadas por la coagulación de partículas de diferente origen y por productos de condensación resultantes de reacciones en fase gaseosa. El tercer tipo representa un aerosol continental envejecido y muy diluido.

Los aerosoles atmosféricos se analizan desde un enfoque sistémico, lo cual hace que el espectro del tamaño de la partícula, estén asociados con la densidad total de las partículas y la concentración total de la masa (Warneck, 1988).

Tabla 1. Concentraciones típicas de masa y partículas ara diferentes aerosoles troposféricos cerca de la superficie de la Tierra. Tabla traducida y adaptada de (Warneck, 1988).

Localización	Concentración de Masa (μgm^{-3})	Concentración de Partícula (partícula cm^{-3})	Radio Medio (μm)
Urbano	~100	10^5 - 10^6	0.03
Rural Continental	30-50	~15,000	0.07
Fondo marino	~ 10^a	200-600	0.16
Ártico (verano)	~1	25	0.17

Fuente: (Warneck, 1988)

Nota: ^a incluido 8 μgm^{-3} de sal marina

Debido a los procesos de formación de las partículas y su estrecha relación con el gas que la rodea, el termino aerosol también incluye la nucleación de partículas de gases de baja presión, por lo tanto, este término se utiliza además para referirse a los componentes gaseosos del aire.

(Lippmann, 2009) expone una clasificación generalizadas de los tipos de aerosoles en términos de procesos de formación, común mente utilizada en los campos de higiene y contaminación atmosférica, dentro de la clasificación abarca polvo (dust), condesados (smoke), humo (smoke), niebla (Mist), niebla (Fog), neblina (Smog), núcleos de condensación (Condensation nuclei), modo de acumulación (Accumulation mode), Modo de partículas gruesas (Coarse particle mode);

Polvo (dust): Es un aerosol formado por la subdivisión mecánica del material particulado en partículas más finas que tienen la misma composición química. Un término general para el proceso de subdivisión mecánica es la trituración, y se produce en operaciones tales como la abrasión, trituración, molienda, perforación, y voladura. as partículas de polvo son generalmente de forma sólida e irregular y tienen diámetros superiores a 1 μm .

Vapores Condensados (Fume): es un aerosol de partículas sólidas formadas por la condensación de los vapores formados a temperaturas elevadas por combustión o sublimación. Las partículas primarias son generalmente muy pequeñas (menor de 0,1 μm) y tienen formas cristalinas esféricas o característicos. Pueden ser químicamente idénticos al material originario, o puede estar compuesto de un producto de oxidación tal como un óxido de metal. Debido a que pueden formarse en una alta concentración numérica, a menudo se coagulan rápidamente, formando grupos agregados de baja densidad general.

Humo (smoke): un aerosol formado por la condensación de productos de combustión, generalmente de materiales orgánicos. Las partículas son generalmente gotas líquidas con diámetros de menos de 0,5 μm .

Neblina (mist): Es un aerosol de gotas pequeñas formado por cizallamiento mecánico de un líquido, por ejemplo, por atomización, nebulización, burbujeo o pulverización. El tamaño de gota inicial puede cubrir un rango muy grande, generalmente de aproximadamente 2 μm a más de 50 μm .

Niebla (Fog): Es un aerosol líquido formado por la condensación de vapor de agua en los núcleos atmosféricos a altas humedades relativas. Los tamaños de gota generalmente son mayores de 1 μm .

Neblina (Smog): un término popular para un aerosol de contaminación derivado de una combinación de humo y niebla. Ahora se usa comúnmente para cualquier mezcla de contaminación atmosférica.

Aitken o núcleos de condensación (CN): partículas atmosféricas muy pequeñas (en su mayoría menores de 0,1 μm) formadas por procesos de combustión y por conversión química de precursores gaseosos.

Modo de acumulación (Accumulation mode): Es un término dado a las partículas en la atmósfera que van desde 0,1 μm a alrededor de 1,0 μm , y que pueden extenderse hasta los 2,5 μm en ambientes húmedos. Estas partículas generalmente son esféricas, tienen superficies líquidas y se forman por coagulación y la condensación de partículas más pequeñas que se derivan de precursores gaseosos. Son demasiado pocas para la rápida coagulación, y demasiado pequeñas para la sedimentación efectiva. Además, tienden a acumularse en el aire.

Modo de partículas gruesas: partículas de aire ambiente mayores de aproximadamente 2,5 μm y generalmente formadas por procesos mecánicos y resuspensión de polvo en la superficie.

Autores como (Fang et al., 2006; William Malm, 2000) utilizaron el término de material particulado, el cual es un término utilizado generalmente para referirse a conjunto heterogéneo de partículas sólidas y/o líquidas a excepción del agua pura, que se encuentra en una masa de aire.

El material particulado tiene diversos efectos en los procesos atmosféricos, lo que ha generado un gran interés de investigación sobre ellos. Debido a la relación directa que tiene con efectos adversos para la salud humana, estudios destacados se han realizados que demuestran dicha relación con enfermedades pulmonares, cardíacas, renales coronarias y alérgicas, con la composición y fuentes del materia particulado (Brunekreef & Hoffmann, 2016; Hadley, Baumgartner, & Vedanthan, 2018; IDEAM, 2017; Organización Mundial de la Salud, 2015; Pandey, Agrawal, & Singh, 2014).

3.1.1.2 Distribución de tamaño de las partículas

Con referencia al tamaño del material particulado la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2001) tiene en cuenta, que es uno de los parámetros más importantes para la determinación de las propiedades, efectos y destino de las partículas atmosféricas; así mismo, guarda una estrecha relación con la velocidad de deposición de la partícula y el tiempo de retención en la atmósfera. dos parámetros para describir el diámetro de la partícula: el diámetro de Stokes y el diámetro aerodinámico. El primero de ellos se basa en la fuerza aerodinámica de arrastre de una partícula, teniendo en cuenta que su velocidad es diferente a la del fluido circundante. Para esta consideración de debe tener en cuenta la forma geométrica de la partícula, la cual se asume de forma esférica y lisa, por lo tanto, el diámetro de Stokes es exactamente igual al diámetro físico de la partícula.

El diámetro aerodinámico (D_a) el cual es tenido en cuenta por el (Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible, 2010) en el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, cuando se adopta como método de referencia y procedimiento de ensayo de campo el Appendix J to Part 50, Reference Method for the Determination of Particulate Matter as PM10 in the Atmosphere de la EPA. Teniendo en cuenta una eficiencia de corte del 50%. Este diámetro (D_a) de una partícula depende de su densidad, así mismo investigadores como (García, 2012) lo define como el diámetro que tiene una partícula de 1g cm^{-3} de densidad y que comparte la misma velocidad de asentamiento que la del diámetro de Stokes debido a la fuerza gravitacional, condiciones predominante de temperatura, presión y humedad relativa en la masa de aire.

De acuerdo con estudios dirigido por (Warneck, 1988) presenta datos de los radios de las partículas y concentraciones ya que estas presentan variaciones en orden de magnitud, por ello presenta una función de distribución en función de radio (r):

$$f(\log r) = dN / d(\log r). \quad \text{Ec. (1)}$$

a conversión a la forma más convencional $f(r)$, que se puede realizar por medio de la regla $d(\log r) = dr / (r \ln 10)$ reemplazando $\ln 10 = 2.302$

$$dN/dr = f(r) = f(\log r) / 2.302r \quad \text{Ec. (2)}$$

Esta ecuación permite crear una categoría de radios de tamaño de las partículas, el cual por debajo de $0.1\ \mu\text{m}$ se llaman núcleos de Aitken; de acuerdo con literaturas, las partículas finas son bien conocida como aquellos diámetros que son inferiores a $2.5\ \mu\text{m}$ y para las partículas gruesas aquellos diámetros mayores a

2,5 y 10 μm ó hasta 15 μm , mayores a estos valores pueden considerarse partículas suspendidas totales (PST).

En la Figura 1, se representa las distribuciones de tamaño de las partículas, según su masa en la atmosfera, como características principales para el análisis y comprensión de una muestra del espectro completo del tamaño de las partículas, Whitby et al. 1972 citado por (Watson & Chow, 2000).

De igual forma se observa que las “partículas ultrafinas” o categoría de nucleación, también conocidos como núcleos Aitken, son partículas con diámetros aerodinámicos menores a $\sim 0.08 \mu\text{m}$, que se emiten directamente desde la fuente de combustión o a través de la condensación que se presenta en los gases, proceso que se da genera enfriándose después de su emisión; (Watson & Chow, 2000) describe que estas partículas tienen una vida útil de menos de una hora, debido a su coagulación espontanea con el contacto con el aire ambiente.

Partículas con diámetros entre ~ 0.08 y $2 \mu\text{m}$, se encuentra en la categoría de acumulación, las cuales resultan de la coagulación de las partículas más pequeñas emitidas por fuentes como la combustión, conversión de gas a partícula, condensación de especies volátiles; en este rango es de suma importancia la humedad relativa y el vapor de agua contenido en el aire, debido a su relación directa con el agua líquida contenida en nitrato de amonio, sulfato de amonio, cloruro de sodio y otras especies solubles y esto es especialmente importante cuando la humedad relativa excede el 70%, lo que hace que se desplace los picos concentración relativa del rango.(Watson & Chow, 2000). La suma de los diámetros de estos dos rangos forma la fracción de tamaño de partículas finas. la mayoría de ácido sulfúrico, bisulfato de amonio, sulfato de amonio, nitrato de amonio, carbono orgánico y carbono elemental se encuentran en este rango de tamaño.

La categoría gruesa está formada por partículas con diámetros que oscilan entre 1 y $30 \mu\text{m}$, por lo cual un gran porcentaje de estas partículas son generadas por procesos mecánicos de origen marino o de la corteza terrestre (Crustal) (García, 2012).

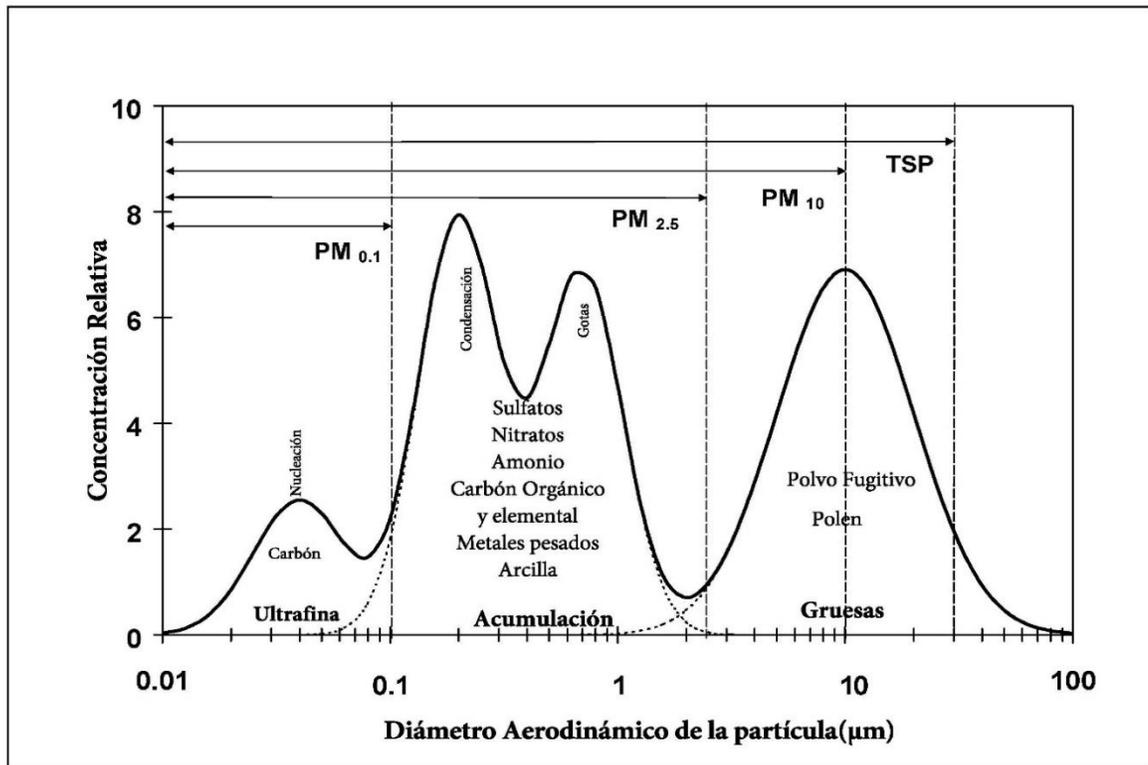


Figura 1. Distribución de tamaños en función del diámetro de las partículas. Imagen traducida de (Watson & Chow, 2000).

En diversos estudios realizados por la Agencia de Protección Ambiental han indicado que las partículas finas y gruesas, tienen una composición química diferente; como se menciona anteriormente las partículas gruesas son generadas por procesos mecánicos dentro de los cuales se destacan desgastes de neumáticos, emisiones por operaciones como la trituración de rocas, resuspensión de polvo y cenizas “fly ash”, aerosoles marítimos y compuestos orgánicos volátiles. Estas partículas son removidas principalmente por impacto.

3.1.2 Clasificación de acuerdo con las fuentes de emisión

Desde el inicio de la contaminación atmosférica se han manejado colectivamente varias clasificaciones dependiendo de los procesos de formación y el origen de las fuentes, se destacan la orientación de los siguientes investigadores:

(Watson & Chow, 1998) en su estudio clasificaron el material particulado en Partículas suspendidas Totales (TSP), como ya se dijo y se representó en la figura 1, estas representan el 100% del rango de tamaño, incluido partículas mayores a

100 μm que se encuentre en la masa de aire; las partículas PM_{10} cuentan con un diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10 μm ; la fracción de tamaño de $\text{PM}_{2.5}$ varía de 0 a 2.5 μm , teniendo en cuenta un diámetro aerodinámico de partículas menores a 0.1 μm se consideran ultra finas.

(Warneck, 1988; William Malm, 2000) realizaron una clasificación del material particulado según su proceso de formación y emisión, catalogándolas como partículas Primarias, aquellas que no sufren ninguna transformación desde su emisión hasta su integración con la masa de aire, estas pueden ser gases o partículas emitidas directamente de una fuente. O bien, ser generadas por reacciones químicas, partículas secundarias, las cuales se refiere a dispersiones de gases y partículas en el aire formadas por reacciones atmosféricas de precursores, que dan origen a la formación de una nueva partícula ya sea por condensación, o entre la interacción de un gas y una partícula atmosféricas en la cual se genera un aerosol por absorción o por coagulación, estas reacciones químicas entre los gases de las diferentes fuentes y compuestos como el oxígeno (O_2), vapor de agua (H_2O); ozono (O_3); nitratos (NO_3), dióxidos de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x); debido a que el diámetro aerodinámico de estas partículas son de menor tamaño se incluyen dentro de $\text{PM}_{2.5}$ debido a que se forman a partir de gases. Esto se logra evidenciar en la figura 2.

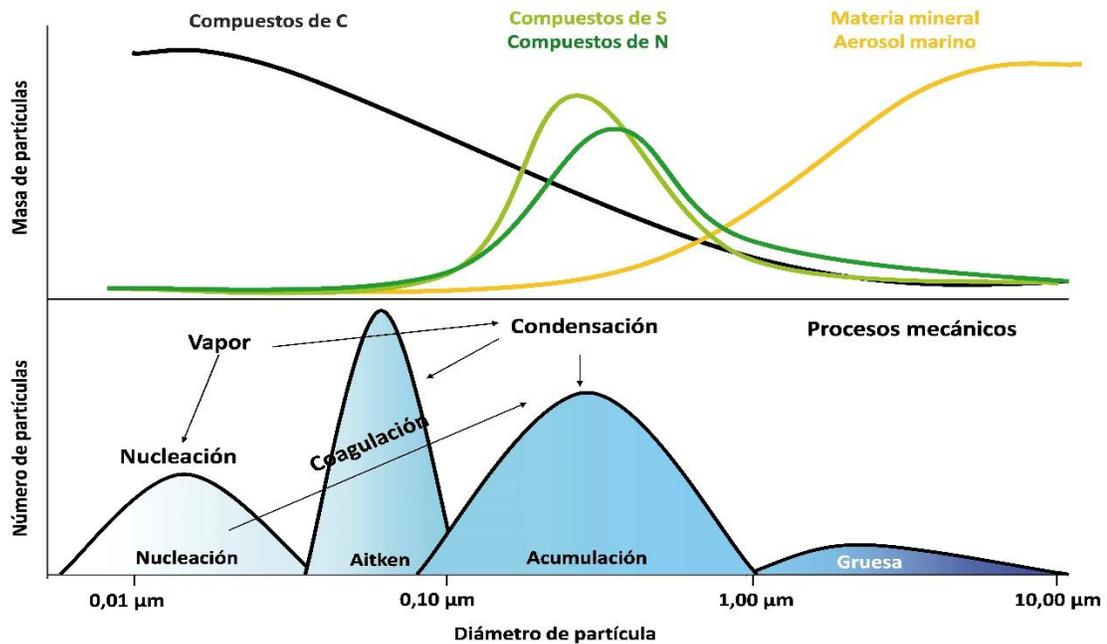


Figura 2. Características y distribución de tamaños aerodinámicos del material particulado. (Daniel A, 2008).

(Organization World Health, 2001; Placeres, Olite, & Toste, 2006) clasifican el material particulado por su origen en natural o antrópicas, las de origen natural pueden proceder de fuentes tales como los aerosoles naturales, erupciones volcánicas, descomposición de la materia orgánica, incendios forestales, etc. Dentro de origen antrópicas procesos industriales, fuentes móviles como tráfico vehiculares, construcción, agricultura y pavimentos de carreteras entre otros.

Según (Garrido Galindo & Camargo Caicedo, 2012) exponen los avances en monitoreo de las partículas respirables en el aire, estudio por el cual recopila las principales fuentes de contaminación de partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}) de fuentes de origen antropogénicas.

Tabla 2. Principales Fuentes de contaminación antrópica

Sitio de monitoreo	Fuente de Emisión	Contaminante	Cantidad (µg/m ³)	Periodo de monitoreo
España	Tráfico vehicular	PM ₁₀ anual	41.4	2008
	Actividad industrial	PM _{2.5} anual	20.7	
Yokohama, Japón	Agricultura	PM _{2.5} anual	20.6	Sep. 2007 - Ago. 2008
	Industria automotor	PM _{2.5-10} anual	9.6	
	Industria química	PM _{>10} anual	5.1	
Taichung, Taiwan	Actividades agrícolas	PM _{2.5-10} anual	24.6	Ago. 1999 - Dic. 1999
	Tráfico vehicular	PM _{2.5} anual	58	
Taichung H, Taiwan	Actividades agrícolas	PM _{2.5-10} anual	30.31 ± 9.79	Mar. 2004 - Ene. 2005
	Tráfico vehicular	PM _{2.5} anual	54.03 ± 16.92	
Quito, Ecuador	Resuspensión de polvo y Desgaste de pavimento	PM ₁₀ anual	22.92 – 45.11	2010
	Tráfico vehicular	PM _{2.5} anual	16.4 – 23.4	
Brasil	Quema de Diesel y Carbón	PM ₁₀ anual	28.18 – 42.31	Nov. 2001 - Nov. 2002
	Actividades de granja	PM _{>2.5-10} anual fracción gruesa	1.81 – 53.21	Ene. 2005 - Dic. 2005
	Refinerías y fábricas de acero	PM _{2.5} anual fracción fina	0.25 – 25.98	
Ciudad Heredia, Costa Rica	Flota Vehicular	PM ₁₀ anual	>50	Mar. 2006 - Ago. 2006
			42	May. 2007 - Jun. 2007
México	Tráfico vehicular	PM ₁₀ anual	129	2011
		PM _{2.5} anual	28	
Bogotá, Colombia	Quema de Diesel	PM ₁₀ anual	59	2010
Santiago de Chile	Expansión urbana y tráfico vehicular	PM ₁₀ anual	80.29 – 52.58	2009

Fuente: adaptado de (Garrido Galindo & Camargo Caicedo, 2012).

3.2 TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

El movimiento de los contaminantes en la atmosfera es causado por el transporte, distribución y destino final o deposición de estos, el transporte es originado por varios factores, de los cuales se destacan las propiedades físicas y químicas de los aerosoles y su interrelación con los componentes ambientales temperatura, vapor de agua, humedad relativa, etc. y las condiciones meteorológicas como la velocidad y dirección del viento.

Así mismo (Leelőssy et al., 2014) describe de forma general el transporte atmosférico por medio de una descripción matemática en la cual se describe que un flujo, la conservación de masa de un componente es descrito por la concentración c y se puede expresar como:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot (c\vec{v}) + S_c + \nabla \cdot (D_c \nabla c) \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde: \vec{v} es el vector de viento, S_c es el termino fuente y D_c es el coeficiente de difusión. Ec. (3) representa el cambio de la concentración en un punto específico como la suma del flujo advectivo, los términos fuente y el flujo difusivo, respectivamente. La deposición seca y húmeda y la descomposición química o radioactiva son parte del término S_c , mientras que la sedimentación gravitacional se puede agregar como un componente adicional de advección. Leelőssy y sus colaboradores no representan la turbulencia en la ecuación Ec. (3), ya que la turbulencia generalmente se toma en cuenta con la teoría de Reynolds, el cual divide el campo y concentración en valores de perturbación turbulentos promediados en el tiempo.

Los contaminantes del aire llegan a los receptores al ser transportados y quizás transformados en la atmósfera. (Daniel A, 2008) identifica el papel de la atmosfera en la contaminación del aire y como la ubicación de los receptores, juega un papel importante en la relaciones con las fuentes y la influencia que tiene los procesos atmosféricos con las concentraciones de las contaminantes Figura 3.

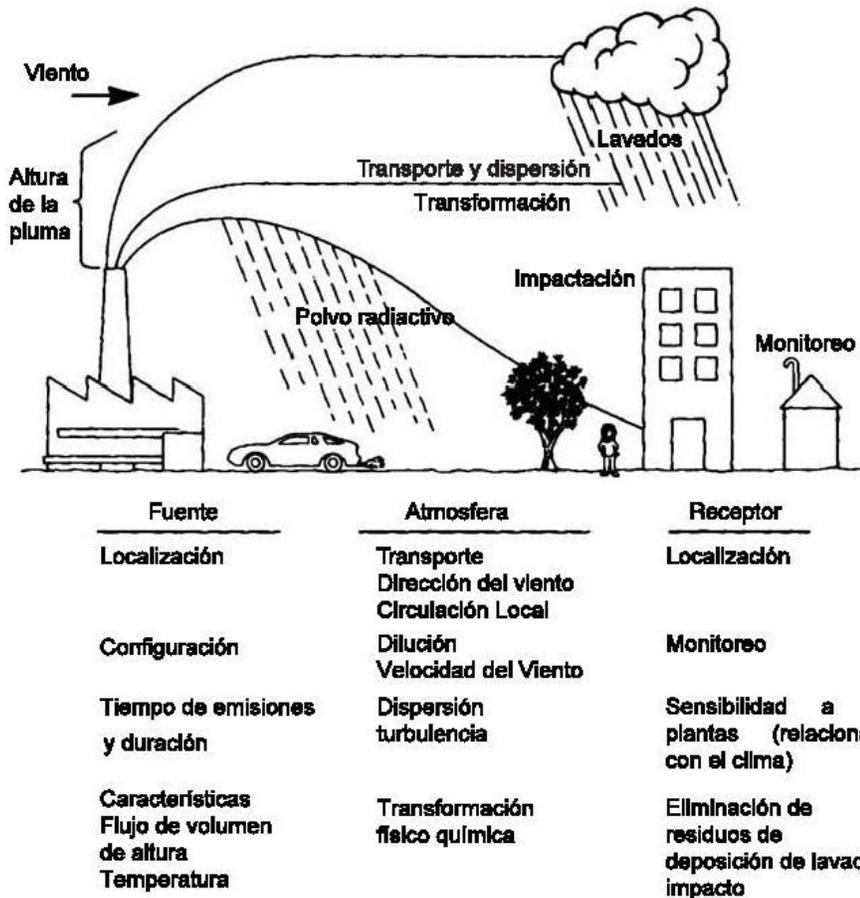


Figura 3. Papel de la atmosfera en la contaminación del aire, traducida y adaptada de (Daniel A, 2008).

3.2.1 Parámetros meteorológicos

Para la distribución de los contaminantes en el aire, también es necesario conocer las leyes de propagación que se dan a través de una masa de aire en diferentes condiciones meteorológica (Monin, 1959); condiciones que para la aplicación de modelos y análisis de la dispersión de los contaminantes atmosféricos, es de gran importancia para las correlaciones de las distancias características transportadas de las especies químicas emitidas al aire y la vida útil que tiene en la atmosfera (Leelóssy et al., 2014).

3.2.1.1 Dirección del viento

La dirección de viento en la fuente es el punto de inicio del proceso de transporte de un contaminante, este parámetro meteorológico marca un factor primordial en la precisión de una medición de las concentraciones, Si el viento sopla directamente hacia un receptor según (EPA, 1981; PHILIP K, 1991) un receptor se define como, la ubicación que recibe contaminantes transportados. Según (Daniel A, 2008) un cambio en la dirección de tan solo 5°, puede variar la precisión de una medición de la dirección del viento, lo cual hace que las concentraciones en el receptor caigan aproximadamente un 10% en condiciones inestables, alrededor del 50% en condiciones neutrales y alrededor del 90% en condiciones estables. La dirección del transporte de la pluma es muy importante en la evaluación del impacto de la fuente, donde existan receptores sensibles o dos o más fuentes.

3.2.1.2 Velocidad de viento

Según (John H, 1983) la velocidad de viento responde a la dinámica atmosférica vertical, la cual hace que la velocidad del viento aumente con la altura; así mismo describe la variación de la velocidad de viento con la capa límite superficial. Un perfil de la ley de potencia se utiliza frecuentemente en trabajos de contaminación del aire:

$$u(z) = u(z_a) \left(\frac{z}{z_a} \right)^p \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde $u(z)$ es la velocidad de viento a la altura z , $u(z_a)$ la velocidad del viento a la altura de medición del anemómetro z_a , y p un exponente que varía aproximadamente entre 0.1 a 0.1, así mismo, el investigador John H señala que los perfiles de viento de la ley de potencia no necesariamente representan bien los datos. El exponente en realidad varía con la estabilidad atmosférica, la rugosidad de la superficie y la profundidad de la capa.

La velocidad del viento afecta el tiempo de viaje del punto de emisión al receptor, por lo tanto, la mitad de la velocidad del viento duplicara el tiempo aerotransportado.

3.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS AEROSOLLES

La mayoría de los aerosoles naturales están compuestos de materiales de la corteza, materia biogénica y sal marina, por otro lado los aerosoles antropogénicos están constituidos según (Lazaridis, 2011) por hollín, carbón elemental de procesos

de fuentes primarias y de material carbonoso formado de fuentes secundarias como el carbón orgánico, así como la materia inorgánica (nitratos, sulfatos, amonio y agua).

Según (EPA, 2001) los aerosoles están formados de dos principales componentes: una fase gaseosa (el gas que lo contiene que en el caso de la atmosfera es el aire) y una fase particulada, ya sea solida o líquida en suspensión. En cuanto a la fracción particulada en el caso de las partículas finas, suelen estar como 1. Sulfatos, nitratos, iones amonio y agua, 2. formación fotoquímica de los aerosoles orgánicos o 3. carbón, materia orgánica y componentes metálicos emitidos directamente en la atmosfera. Las partículas gruesas en la atmosfera están formada principalmente por silicio, carbonato de calcio, minerales arcillosos, hollín y, algunas veces, sustancias orgánicas.

Existe una relación general entre la composición química y el diámetro de partícula. Las partículas de diámetros menores o iguales a 2.5 μm contienen mayores cantidades de sulfatos (SO_4^{-2}), iones hidrógeno (H^{+1}) y iones amonio (NH_4^{+1}), así como fracciones significativas de nitratos (NO_3^{-1}) y ion cloruro (Cl^{-1}) (EPA, 2001).

(Watson & Chow, 1998) describe que la mayor de la masa de partículas $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} en áreas urbanas y rurales puede explicarse por una combinación de los siguientes componentes químicos:

Material geológico: El material particulado suspendido se compone principalmente de óxidos de aluminio (Al_2O_3), dióxido de silicio (SiO_2), dióxido de potasio (K_2O), monóxido de calcio (CaO), óxido de hierro (Fe_2O_3), aluminio (Al), silicio (Si), calcio (Ca), titanio (Ti), hierro (Fe) y otros óxidos (Chow & Watson, 1992; Watson & Chow, 2015). La combinación precisa de estos minerales depende de la geología de la zona y de los procesos industriales, tales como la minería, la producción de cemento, acerería entre otros. El material geológico es el principal componente en la fracción de partículas gruesas (Houck, 1991), y lo constituye aproximadamente el 50% de PM_{10} mientras que entre el 5 al 15% lo componen $\text{PM}_{2.5}$. (Houck, 1991) también concluyó que los componentes geológicos más abundantes en material fugitivo de caminos son el Si (33%), el AL (15%), el Fe (9.5%), el Ca (5%) y el K (3%).

Sulfato: El sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), bisulfato de amonio ($(\text{NH}_4\text{HSO}_4)$), y ácido sulfúrico (H_2SO_4) son las formas más comunes de sulfato encontrado en material particulado en la atmósfera. Estos compuestos son solubles en agua y son componentes del material particulado, principalmente de la fracción de tamaño $\text{PM}_{2.5}$. En las zonas costeras se puede encontrar el sulfato de sodio (Na_2SO_4) que

se forma cuando el ácido sulfúrico ha sido neutralizado por cloruro de sodio (NaCl) en la sal del mar. Las concentraciones en masa de sulfato en la fracción fina indican orígenes de fuentes antropogénicas, así como también la acumulación másica de la conversión de gas a partículas.

El sulfato de sodio (Na_2SO_4) se puede encontrar en áreas costeras donde el ácido sulfúrico ha sido neutralizado por el cloruro de sodio (NaCl) en la sal del mar. Aunque el yeso (Ca_2SO_4) y algunos otros compuestos geológicos contienen sulfato, estos no se disuelven fácilmente en el agua para el análisis químico, son más abundantes en la fracción gruesa que en $\text{PM}_{2.5}$, y generalmente se clasifican en la fracción geológica.

Nitratos: El nitrato de amonio (NH_4NO_3) es el compuesto de nitrato más abundante en la atmósfera. Este compuesto resulta de un equilibrio reversible de gas/partículas entre el gas de amoníaco (NH_3), el gas ácido nítrico (HNO_3) y las partículas de nitrato de amonio. Las partículas con más contenido higroscópico, tienden a contener más sulfatos, nitratos y compuestos orgánicos secundarios, mientras que las partículas con menos contenido higroscópico, tienden a contener más de carbono elemental, compuestos orgánicos primarios, y los componentes de la corteza terrestre.

Amonio: sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), bisulfato de amonio (NH_4HSO_4), y El nitrato de amonio (NH_4NO_3) son los compuestos más comunes que contienen amonio de reacciones irreversibles entre el ácido sulfúrico y el gas amoníaco. De acuerdo a (Chow & Watson, 1992) muestra un ejemplo en el que el sulfato está presente principalmente como sulfato de amonio neutralizado, mientras que el bisulfato de amonio y el ácido sulfúrico no están presentes en gran abundancia en la atmósfera.

Carbono orgánico: el carbono orgánico en partículas consta de cientos, posiblemente miles, de compuestos separados que contienen más de 20 átomos de carbono ($> \text{C}_{20}$). (Rogge, Hildemann, Marurek, & Cass, 2011) identifica varios de los compuestos que se han medido en las partículas, pero éstas no constituyen más del 10% del carbono orgánico medido. Debido a esta falta de especificidad molecular, y debido a la naturaleza semi-volátil de muchos compuestos de carbono (C_{20} a C_{40}), el "carbono orgánico" en partículas se mide operativamente mediante el método de muestreo y análisis.

Carbón elemental: El carbono elemental es negro, a menudo llamado "hollín". El carbono elemental contiene carbono puro y grafito, pero también contiene

materiales orgánicos no volátiles de alto peso molecular, de color oscuro, como alquitrán, biogénicos y coque.

Vapor de agua: nitratos solubles, sulfatos, amonio, sodio, otros iones inorgánicos y algunos materiales orgánicos absorben el vapor de agua de la atmósfera, especialmente cuando la humedad relativa excede el 70%. El ácido sulfúrico absorbe un poco de agua en todas las humedades. Las partículas que contienen estos compuestos crecen en el modo de gota. La cantidad precisa de agua cuantificada en un PM_{2.5} depende de su composición iónica y la humedad relativa de equilibrio aplicada antes del pesaje de laboratorio.

A lo largo de la historia se han presentado diversas investigaciones que proporcionan una base de datos sobre la composición molecular de las emisiones atmosféricas, facilitando así, la posibilidad de estimar las contribuciones de los compuestos marcadores claves de fuentes caracterizadas e identificadas, por medio de la técnica de análisis como cromatografía de gases de alta resolución (HRGC) y cromatografía de gases / espectrometría de masas (GC / MS) en los aerosoles.

Según (Delany, Parkin, Griffin, Goldberg, & Reimann, 1967) por medio de técnicas de recolección de material particulado aerotransportado mayores de 1 μm en las islas de Barbados, concluyeron que el material recolectado provenía en un mayor proporción de los continentes de europeos y africano. Además, identificaron componentes minerales con varios elementos biológicos como microbios y fragmentos de plantas vasculares, entre ellos hifas de hongos, organismos marinos y diatomeas de agua dulce, que también se encuentran en los sedimentos del Atlántico.

Cabe agregar que estudios realizados por (Ramírez et al., 2018) en la ciudad de Bogotá, identificaron que la composición química y distribución de fuentes de PM₁₀ en una estación de fondo o background en la ciudad; revelaron que los principales componentes del material particulado PM₁₀ estaba compuesto por un 51% de fracción carbonosa, 23% de polvo mineral, 15% otros compuestos, 11% de compuestos inorgánicos secundarios y por último un 0.4% de sal marina.

(Vargas, Rojas, Pachon, & Russell, 2012) obtuvieron en el estudio una caracterización química del material particulado PM₁₀ en el occidente de Bogotá, por medio de la fracción asociados identificaron fuentes de emisiones a trazadores químicos de fuentes móviles con altas concentraciones de material carbonoso y elementos de la corteza contribuyendo un 35% del Pm₁₀; la segunda fuente se

identificado fue el polvo resuspendido y aerotransportado por el viento, constituyendo un 21% del PM₁₀.

La caracterización de material particulado en el aire de una zona de explotación de carbón a cielo abierto en el norte de Colombia, indicó que el Carbono C en forma de grafito, CaCO₃, K, y Si, fueron los principales elementos presentes en las partículas suspendidas totales (Angulo L. C., Huertas J. I., 2011).

3.4 MUESTREO DE MATERIAL PARTICULADO

Para monitorear los contaminantes como el material particulado, implica la utilización de métodos específicos para cada uno de los contaminantes criterios establecidos en la resolución 2254 del 01 de noviembre de 2017, para el cumplimiento del objetivo establecido en la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire (MADS, 2010), estos métodos están basados en muestreadores para la clasificación de partículas en la cual emplean combinaciones de entradas de tamaño selectivo, medios de filtros, porta filtros, motores y controladores de flujo. Estos equipos hacen referencia al método desarrollado por la EPA de acuerdo al Título 40, Parte 53 del Código de Reglamentos Federales (CFR); Los métodos automatizados para contaminantes distintos de PM₁₀ son aceptables para uso a temperaturas de refugio entre 20 ° C y 30 ° C, así mismo el voltajes de línea entre 105 y 125 voltios a menos que se especifiquen límites más amplios en la descripción del método (EPA, 2017).

3.4.1 Métodos equivalentes para el monitoreo de PM

Existen uso de métodos equivalentes Tabla 3. En la cual se pueden observar los referidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), las Directivas de la Comunidad Europea o las Guías para la Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Tabla 3. Referencia designada por la EPA de los EE. UU. Y métodos equivalentes para PM₁₀ y PM_{2.5}

Método para Muestreadores de TSP	N° Referencia	Código del Método
Método de referencia (Alto-volumen)	Ninguna	802

Método para Muestreadores de PM10	N° Referencia	Código del Método
Andersen Instruments RAAS10-100	RFPS-0699-130	130
Andersen Instruments RAAS10-200	RFPS-0699-131	131
Andersen Instruments RAAS10-300	RFPS-0699-132	132
BGI or Mesa Laboratories Incorporated Model PQ100	RFPS-1298-124	124
BGI or Mesa Laboratories Incorporated Model PQ200	RFPS-1298-125	125
Ecotech Model 3000 PM10 High Volume Sampler	RFPS-0706-162	162
Met One Instruments, Inc. E-FRM– PM10	RFPS-0216-231	231
New Star Environmental Model NS-6070	RFPS-0202-141	141
Oregon DEQ Medium volume sampler	RFPS-0389-071	71
Rupprecht & Patashnick Partisol® 2000	RFPS-0694-098	98
R & P Partisol®-FRM 2000	RFPS-1298-126	126
R & P Partisol®-Plus 2025 Seq.	RFPS-1298-127	127
Sierra-Andersen/GMW 1200	RFPS-1287-063	63
Sierra-Andersen/GMW 321-B	RFPS-1287-064	64
Sierra-Andersen/GMW 321-C	RFPS-1287-065	65
Sierra-Andersen/GMW SA241, SA241M Dichot.	RFPS-0789-073	73
Thermo Scientific Partisol® 2000	RFPS-0694-098	98
Thermo Scientific Partisol® 2000-D, Partisol® 2000i-D	EQPS-311-197	197
Thermo Scientific Partisol® 2000-FRM, Partisol® 2000i	RFPS-1298-126	126
Thermo Scientific Partisol®-Plus 2025 Seq., Partisol® 2025i Seq	RFPS-1298-127	127
Thermo Scientific Partisol®-Plus 2025-D Seq., Partisol® 2025i-D Seq	EQPS-0311-198	198
Tisch Environmental Model TE-6070	RFPS-0202-141	141
Tisch Environmental Model TE-Wilbur 10	RFPS-0714-216	216
W&A/Thermo Electron Model 600 HVL	RFPS-1087-062	62
Método para Muestreadores de PM2.5	N° Referencia	Código del Método
Andersen Model RAAS2.5-200 Audit with WINS	RFPS-0299-128	128
BGI or Mesa Laboratories Inc. PQ200/200A with WINS	RFPS-0498-116	116
BGI or Mesa Laboratories Inc. PQ200-VSCC™ or PQ200A-VSCC™	RFPS-0498-116 or EQPM-0202-142	142
Graseby Andersen RAAS2.5-100 with WINS	RFPS-0598-119	119
Graseby Andersen RAAS2.5-300 with WINS	RFPS-0598-120	120
Met One Instruments, Inc. E-FRM with WINS	RFPS-0315-221	221
Met One Instruments, Inc. E-FRM with VSCC™	RFPS-0315-221	521
Met One Instruments, Inc. E-FRM with URG	EQPS-0316-235	235
R & P Partisol®-FRM 2000 PM2.5 with WINS	RFPS-0498-117	117

R & P Partisol®-FRM 2000 PM-2.5 Thermo Scientific with VSCC™	RFPS-0498-117 or EQPM-0202-143	143
R & P Partisol® 2000 PM-2.5 Audit with WINS	RFPS-0499-129	129
R & P Partisol® 2000 PM-2.5 Audit with VSCC™	RFPS-0499-129 or EQPM-0202-144	144
R & P Partisol®-Plus 2025 PM-2.5 Seq. with WINS	RFPS-0498-118	118
R & P Partisol®-Plus 2025 PM-2.5 Seq. with VSCC™	RFPS-0498-118 or EQPM-0202-145	145
Thermo Electron RAAS2.5-100 with VSCC™	RFPS-0598-119 or EQPM-0804-153	153
Thermo Electron RAAS2.5-100 with WINS	RFPS-0598-119	119
Thermo Electron RAAS2.5-200 with VSCC™	RFPS-0299-128 or EQPM-0804-154	154
Thermo Electron RAAS2.5-200 with WINS	RFPS-0299-128	128
Thermo Electron RAAS2.5-300 with VSCC™	RFPS-0598-120 or EQPM-0804-155	155
Thermo Electron RAAS2.5-300 with WINS	RFPS-0598-120	120
Thermo Environmental Model 605 CAPS	RFPS-1098-123	123
Thermo Scientific Partisol® 2000-D Dichot., Partisol® 2000i-D Dichot.	EQPS-0509-177	177
Thermo Scientific Dichot. Partisol®-Plus Model 2025-D Seq., Partisol® 2025i-D Dichot. Seq.	EQPS-0509-179	179
Thermo Scientific Partisol® 2000-FRM, Partisol® 2000i with WINS	RFPS-0498-117	117
Thermo Scientific Partisol® 2000-FRM, Partisol® 2000i with VSCC™	RFPS-0498-117 or EQPM-0202-143	143
Thermo Scientific Partisol®-Plus 2025 Seq., Partisol® 2025i Seq with WINS	RFPS-0498-118	118
Thermo Scientific Partisol®-Plus 2025 Seq., Partisol® 2025i Seq with VSCC™	RFPS-0498-118 or EQPM-0202-145	145
Tisch Environmental Model TE-Wilbur 2.5 with WINS	RFPS-1014-219	219
Tisch Environmental Model TE-Wilbur 2.5 with VSCC™	RFPS-1014-219	519
Tisch Environmental Model TE-Wilbur 2.5 with Tisch TE-PM2.5C cyclone	RFPS-1014-219 or EQPS-0415-223	223
URG-MASS100 with WINS	RFPS-0400-135	135

URG-MASS100 with VSCC™	RFPS-0400-135	535
------------------------	---------------	-----

Fuente: adaptado de (EPA, 2017).

En estos métodos las entradas de tamaño selectivo se caracterizan por las curvas de efectividad de muestreo, este proceso es definido por el diámetro aerodinámico en el que el 50% de las partículas muestreadas penetran en una entrada se denomina punto de corte del 50% (d_{50}). La relación del diámetro de partícula para el cual el 16% de las partículas muestreadas penetran en la entrada al diámetro al que el 84% penetra en la entrada (d_{16} / d_{84}) se denomina pendiente. Una pendiente más pequeña indica un punto de corte más agudo, lo que resulta en una mejor distinción entre las partículas que son más grandes y más pequeñas que d_{50} . Una pendiente de unidad indica que el 100% de las partículas con un diámetro aerodinámico menor que el punto de corte pasan a través de la entrada al filtro, y se recolecta el 0% de aquellas más grandes que el punto de corte. Ninguna entrada aerodinámica puede tener un punto de corte tan agudo, y las pendientes típicamente varían de 1.3 a 2. (Watson & Chow, 1998).

Por medio del volumen o caudales de entradas en los muestreadores se clasifican como Alto volumen (~ 1,000 L / min), volumen medio (~ 100 L / min), volumen bajo (~ 10 a 20 L / min) y mini - volumen (<5 L / min), Las entradas de volumen medio y alto son especialmente útiles cuando las muestras se toman en paralelo en varios sustratos, ya que los caudales se pueden mantener lo suficientemente altos como para obtener un depósito adecuado para el análisis. (Watson & Chow, 1998).

En la siguiente tabla, se relacionan las entradas para los tamaños selectivos de acuerdo con muestreadores de alto, medio y bajo volumen de acuerdo a (Soo, Monaghan, Lee, Kashon, & Harper, 2016).

Tabla 4. Relación de los tamaños selectivos de acuerdo con el flujo de los muestreadores

Identificador de entrada (fabricante)	Principio de operación	d_{50} (mm); Pendiente (sin unidad)	Tasa de flujo (L/min)	Referencia de PM10 o equivalencia	Comentarios
Alto -Volumen					

SAa or GMCC Model 320 (Graseby Andersen, Atlanta, GA)	Impactador	15;1,5	1,13 3	Ninguna	De una sola etapa, sin engrasar
SA or GMW Model 321A	Impactador	10,2; 1,45	1,13 3	RFPS-1287-065	Dos etapas con engrasado.
SA or GMW Model 321B	Impactador	9,7; 1,4	1,13 3	RFPS-1287-064	Dos etapas con engrasado.
SA or GMW Model 1200	Impactador	9,7; 1,5	1,13 3	RFPS-1287-063	De una sola etapa con cuña engrasada (cuerpo con bisagras).
GMW Wedding PM10 (General Metal Works, Village of Cleves, OH)	Flujo ciclonico	8,8	1,13 3	Ninguna	No hay puerto de limpieza de entrada.
Wedding IP10 PM10 (Wedding & Associates, Fort Collins, CO)	Flujo ciclonico	9,6;1,37	1,13 3	RFPS-1087-062	Puerto de limpieza en la parte superior de la entrada
Medio-Volumen					
SA 254 Medium-Volume PM10 Inlet	Impactador	10; 1,6d	113	RFPS-0389-071	Varios tornillos pequeños deben ser retirados para limpiar.
Wedding Medium Flow PM10 Inlet	Flujo ciclonico	9,5;1,12	113	Ninguna	Tiene un puerto de limpieza. Puede utilizar un cepillo de botella para limpiar.
Bendix 240 Cyclone (Sensidyne, Inc., Learwater, FL)	Flujo ciclonico	2,5; 1,7	113	Ninguna	La tapa de plástico actúa como una tolva para recoger partículas grandes.
Bajo-Volumen					
SA 246B	Impactador virtual	10,2; 1,41	16,7	RFPS-0789-073, EQPM-0990-76	La parte superior se desenrosca para permitir el acceso a la superficie de impactador.
Sierra-Anderson 244 and 245	Impactador virtual	2,5	16,7	Ninguna	Impactador virtual se puede volver a montar hacia atrás cuando

					desmontado para su limpieza.
AirMetrics Inc. (Springfield, OR)	Impactador directo	10; 2,5;	5	Ninguna	El impactador de nylon debe limpiarse y reengrasarse después de cada 72 horas de muestreo.

Fuente: adaptado y traducido de (Watson & Chow, 1998)

3.4.2 Medios y porta filtros

Los filtros de muestreo de material particulado consisten en una esterilla fibrosa estrechamente tejida o en una membrana de plástico que ha sido penetrada por poros microscópicos; en la tabla 5 se identifican los filtros más utilizados para el muestreo de aire, de acuerdo con sus fabricantes y se especifican las características físicas y el porcentaje de eficiencia de recolección.

Tabla 5. Lista de filtro y resultados de eficiencia de recolección.

Filtro	Marca	Tamaño del poro (µm)	Tasa de flujo (L/min)	Rango de eficiencia de recolección Mínimo (%)	Rango de eficiencia de recolección Maximo (%)	Presión inicial dros (kPa)	Caída de presión del delta (kpa)
MCE	SKC	0,45	1,7	99,64	100	2,5	0,04
			2,5	98,82	100	3,74	0,01
			4,4	99,99	100	6,1	0,02
			11,2	**	**	**	**
	SKC	0,8	1,7	99,99	100	0,88	0
			2,5	99,99	100	1,22	0,01
			4,4	100	100	2,07	0,02
			11,2	**	**	**	**
	SKC	1,2	1,7	100	100	0,7	0,02
			2,5	99,76	100	1,06	0,02
			4,4	100	100	1,73	0,01
			11,2	**	**	**	**
	SKC	5	1,7	99,81	100	0,36	0,01
			2,5	99,87	100	0,51	0,02

			4,4	99,7	100	0,9	0,03
			11,2	99,17	100	2,27	0,11
	Millipore	0,45	1,7	99,99	100	2,75	0,007
			2,5	99,72	100	4,06	0,07
			4,4	99,97	100	7,51	0,12
			11,2	**	**	**	**
	Millipore	0,8	1,7	99,99	100	0,92	0,01
			2,5	99,91	100	1,36	0,02
			4,4	99,96	100	2,34	0,06
			11,2	99,99	100	6,17	0,46
	Millipore	1,2	1,7	99,99	100	0,753	0,01
			2,5	99,97	100	0,99	0,027
			4,4	99,99	100	1,74	0,067
			11,2	99,93	100	4,55	0,497
	Millipore	5	1,7	99,84	100	0,35	0
			2,5	99,73	100	0,487	0,01
			4,4	99,36	100	0,813	0,023
			11,2	98,86	100	2,21	0,28
	Gelman	0,8	1,7	99,74	100	1,46	0,017
			2,5	99,94	100	2,06	0,017
			4,4	99,99	100	3,6	0,053
			11,2	**	**	**	**
Polycarbonate	SKC	0,4	1,7	99,5	100	2,54	0,213
			2,5	98,98	100	4,89	0,46
			4,4	98,24	100	7,22	1,03
			11,2	99,48	100	14,8	2,08
	SKC	0,8	1,7	74,83	100	1,12	0,297
			2,5	94,17	100	1,6	0,463
			4,4	95,11	100	2,51	1,08
			11,2	96,55	100	7,52	3,5
	Millipore	2	1,7	73,41	100	1,39	0,577
			2,5	81,21	100	1,99	1,05
			4,4	86,24	100	3,57	2,65
			11,2	94,54	100	9,33	8,92
	Millipore	5	1,7	22,48	96	0,517	0,083
			2,5	54,94	97	0,687	0,577
			4,4	65,07	94	1,2	3,74
			11,2	79,03	99	2,81	16,9
	Poretics	0,4	1,7	99,5	100	2,39	0,24
			2,5	99,49	100	3,53	0,437
			4,4	99,57	100	5,73	0,89

			11,2	**	**	**	**
PTFE	SKC	0,45	1,7	99,98	100	1,65	0,04
			2,5	99,99	100	2,37	0,057
			4,4	99,74	100	4,32	0,177
			11,2	99,83	100	9,83	1,05
	SKC	2	1,7	99,34	100	0,423	0,027
			2,5	99,53	100	0,636	0,04
			4,4	98,94	100	1,41	0,263
			11,2	99,39	100	2,64	0,69
	Pall	2	1,7	99,85	100	0,433	0,02
			2,5	99,89	100	0,6	0,04
			4,4	99,78	100	0,997	0,1
			11,2	99,69	100	2,53	0,37
	Pall	5	1,7	94,76	100	1,78	0,723
			2,5	95,37	100	2,9	1,66
			4,4	95,28	100	4,76	5,37
			11,2	**	**	**	**
Gelman	1	1,7	100	100	1,64	0,13	
		2,5	99,03	100	2,66	0,497	
		4,4	99,95	100	4,69	2,49	
PVC	SKC	0,8	1,7	99,78	100	1,02	0,06
			2,5	99,72	100	1,62	0,28
			4,4	99,58	100	1,86	0,123
			11,2	95,22	100	5,42	0,807
	SKC	5	1,7	96,08	100	0,277	0,013
			2,5	99,71	100	0,347	0,01
			4,4	99,45	100	0,657	0,04
			11,2	92,98	100	1,587	0,3
	Gelman	5	1,7	99,21	100	0,283	0,027
			2,5	99,11	100	0,467	0,13
			4,4	99,13	100	0,723	0,3
			11,2	98,26	100	1,91	0,38
	Millipore	0,8	1,7	99,84	100	1,94	0,007
			2,5	100	100	2,66	0,02
			4,4	99,93	100	**	**
			11,2	**	**	**	**
Millipore	5	1,7	99,95	100	0,267	0,023	
		2,5	99,64	100	0,35	0,047	
		4,4	99,6	100	0,69	0,113	
		11,2	98,73	100	1,86	0,487	
Silver	SKC	0,8	1,7	94,02	100	0,663	0,17

		2,5	93,44	100	0,946	0,343
		4,4	93,2	100	1,63	0,557
		11,2	94,23	100	4,59	2,8
Sterlitech	0,45	1,7	98,31	100	2,45	0,44
		2,5	98,23	100	3,56	0,783
		4,4	98,5	100	7,02	1.677
		11,2	**	**	**	**
Sterlitech	0,8	1,7	95,14	100	0,697	0,17
		2,5	94,13	100	0,943	0,653
		4,4	92,69	100	1,68	0,727
		11,2	86,51	100	4,28	3,15
Sterlitech	1,2	1,7	95,09	100	0,607	0,127
		2,5	93,89	100	0,85	0,327
		4,4	93,89	100	1,46	0,873
		11,2	93,65	100	3,82	2,95
Sterlitech	5	1,7	47,34	100	0,136	0,02
		2,5	54,52	100	0,18	0,11
		4,4	42,1	100	0,317	0,077
		11,2	63,36	99	0,777	1.582

Fuente: adaptado de (Soo et al., 2016)

Notas

** No disponible en esta condición de prueba.

^a Las mediciones se realizaron utilizando tres filtros diferentes para cada tipo de filtro junto con tres dependencias de tiempo.

^b Valores medios obtenidos a partir de tres filtros descargados.

^c Valores medios obtenidos de tres filtros cargados.

3.5 ANALISIS DE DATOS DE CALIDAD DE AIRE A TRAVES DE LA FUNCIÓN DE PROBABILIDAD CONDICIONAL (CPF)

En la gestión de la contaminación del aire, una de las áreas importantes es la identificación de fuentes de emisiones locales y distantes, a través del modelado de receptores; las técnicas utilizadas en los modelos de receptores son muy diversas y se ha aplicado en una amplia gama de situaciones (Uria-Tellaetxe & Carslaw, 2014). Es importante resaltar que estos modelos tienen la capacidad de identificar y caracterizar las fuentes de emisiones, que quizás sería difícil o imposibles por otros medios. Según (Ho & Clappier, 2011) Los modelos de calidad de aire se pueden utilizar junto con los inventarios de emisiones para proporcionar dicha información lo cual en la práctica se hace difícil, esto debido a muchas razones entre las cuales la información incompleta de las fuentes y la dificultad de la modelación de los procesos de la capa límite.

Por esta razón el análisis de los datos de la calidad de aire sigue siendo un enfoque central de diversas investigaciones (Gavriil, Grivas, Kassomenos, Chaloulakou, & Spyrellis, 2006; Ghose, Mrinal K, 2008; Hopke, 2003).

La función de probabilidad condicional (CPF) es una técnica comúnmente utilizada que permite la identificación de las fuentes por su simplicidad y efectividad para proporcionar información direccional acerca de las fuentes principales (Ashbaugh, Malm, & Sadeh, 1985); esta función estima la probabilidad de que la concentración medida exceda un criterio de umbral establecido para un sector de viento determinado. CPF se define matemáticamente como:

$$CPF_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde $m_{\Delta\theta}$ es el número de ocurrencias del sector de viento $\Delta\theta$, donde las contribuciones de la fuente superan un cierto umbral de concentración que representen un alto percentil de concentración como por ejemplo 75th $\Delta\theta$ o 90th, y $n_{\Delta\theta}$ es el número total de ocurrencias de este sector de viento y $\Delta\theta$ es el tamaño del sector de viento por ejemplo 45° .

La función de probabilidad bivariada condicional (CBPF) acopla el CPF ordinario con la velocidad del viento como una tercera variable, asignando la concentración de contaminante observada a celdas definidas por rangos de dirección y velocidad del viento en lugar de solo a los sectores de la dirección del viento. Se puede definir como:

$$CBPF_{\Delta\theta, \Delta u} = \frac{m_{\Delta\theta, \Delta u}}{n_{\Delta\theta, \Delta u}} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde $m_{\Delta\theta, \Delta u}$ es el número de muestras en el sector del viento $\Delta\theta$, con intervalos de velocidad del viento Δu , habiendo concentraciones mayores que el umbral, $n_{\Delta\theta, \Delta u}$ es el número total de muestras en es intervalo de velocidad – dirección de viento. La extensión al caso bivariado proporciona más información sobre la naturaleza de las fuentes porque los diferentes tipos de fuentes pueden tener diferentes dependencias de la velocidad del viento. Por lo tanto, el uso de una tercera variable puede proporcionar más información sobre el tipo de fuente en cuestión. Cabe señalar que la tercera variable trazada en el eje radial no tiene que ser la velocidad

del viento. El problema clave es que la tercera variable permite algún tipo de discriminación entre los tipos de fuentes debido a la forma en que se dispersan.

Las parcelas polares bivariadas muestran cómo la concentración de una especie varía conjuntamente con la velocidad del viento y la dirección del viento en coordenadas polares. Las gráficas han demostrado ser útiles en una variedad de configuraciones, p. Ej. Caracterizar las fuentes aeroportuarias y las características de dispersión de los cañones callejeros, de acuerdo a (D. C. Carslaw, Beevers, Ropkins, & Bell, 2006). La dirección del viento junto con la velocidad del viento puede ser altamente efectiva para discriminar diferentes fuentes de emisión. Mediante el uso de coordenadas polares, los gráficos proporcionan una técnica gráfica útil que puede proporcionar información direccional sobre las fuentes, así como la dependencia de las concentraciones de la velocidad del viento.

3.5.1 Software de análisis estadístico para el análisis de contaminación de aire.

R (www.r-project.org) representa el sistema ideal para trabajar con características principales como la manipulación efectiva de datos, el análisis de datos / estadísticas, los gráficos de alta calidad y la visualización, se prestan para analizar los datos de contaminación del aire. Si bien R comenzó y probablemente es más conocido como un lenguaje de programación estadística, su gran capacidad para trabajar con datos en general significa que tiene un impacto mucho más amplio, que abarca una amplia gama de disciplinas. La capacidad de desarrollar los propios análisis, inventar nuevos enfoques, etc.

Este software cuenta con la capacidad para el análisis de la contaminación de aire, por medio de la utilización de función de probabilidad bivariada condicional (CBPF) acopla a parcelas polares bivariadas. (D. C. Carslaw et al., 2006; D. C. Carslaw & Ropkins, 2012) han demostrado que la utilización es extremadamente valiosa para la identificación y comprensión de las fuentes de contaminación del aire, por medio de gráficas que muestran como la concentración de un contaminante varía, según la velocidad y dirección del viento en un punto o receptor. R trabaja por medio de coordenadas polares que ayuda a la comprensión de la dependencia direccional de las diferentes fuentes y los procesos de transporte y dispersión de los contaminantes en la atmosfera; particularmente cuando hay disponible información del monitoreo en más de un sitio o receptor, esto hace posible la identificación de características particulares de las fuentes relacionadas con la velocidad y dirección del viento.

En situaciones urbanas, las parcelas polares bivariadas han demostrado ser muy útiles para comprender las complejidades de la dispersión en los cañones de las calles y alrededor de las uniones (Tomlin et al., 2009). Estas gráficas son un primer paso útil en el análisis de datos porque proporcionan una buena visión general de los diferentes tipos de fuentes. Un subconjunto de información contenida en estas gráficas se puede extraer y analizar utilizando otras funciones, por ejemplo, Cuantificar tendencias o comprender variaciones temporales.

R ofrece una amplia variedad de técnicas gráficas estadísticas (análisis de series de tiempo lineal y no lineal de modelado, pruebas estadísticas clásicas, clasificación, agrupación) y, y es altamente extensible.

Uno de los puntos fuertes de R es la facilidad con la que las parcelas con calidad de publicación bien diseñada pueden ser producidas, incluyendo símbolos y fórmulas matemáticas cuando sea necesario.

R está disponible como software libre bajo los términos de la Free Software Foundation 's Licencia Pública General de GNU en forma de código fuente. Se compila y ejecuta en una amplia variedad de plataformas UNIX y sistemas similares (incluyendo FreeBSD y Linux), Windows y MacOS.

3.5.1.1 Package Openair:

El paquete Openair tiene aproximadamente 23 funciones principales y 8 funciones de utilidad. Adicionalmente, el proyecto Openair produce periódicamente nuevas aplicaciones y mejoras a las existentes. En los estudios realizados con Openair, se produce un importante número de gráficos y se seleccionan aquellos que muestran algo particularmente útil o informativo.

En la siguiente tabla se presentan las principales herramientas de Openair agrupadas por su principal aplicación:

Tabla 6. Herramientas de Openair Agrupadas por similitud en su utilidad

Función	Elemento principal de análisis
Grafica de resumen de datos	Genera grafica donde se resumen los datos de cada estación

Rosa de vientos por años	Muestra la variación de dirección y velocidad
Rosa percentil Grafico polar de frecuencias Grafico polar de frecuencias Rosa de contaminantes	Estas herramientas permiten relacionar la concentración de los contaminantes con la dirección y/o velocidad del viento
Grafico temporal anular Función grafico de tiempo Grafico calendario Variación temporal Datos condensados	Estas herramientas permiten evaluar valores de concentración en función de diferentes escalas de tiempo.
Regresión lineal cualitativa y cuantitativa - Tendencias suavizadas	Permiten estimar tendencias en forma
Matriz de correlación - Diagrama de dispersión - Relación lineal	Estudio de variable

Fuente: tomado de (García Guadalupe, Ramírez Sánchez, Ulloa Godínez, Arias, & Pérez, 2012)

4. DISEÑO METODOLOGICO

Este estudio se desarrolló en el área de influencia de la mina de explotación a cielo abierto en el departamento de La Guajira, en el cual se identificaron las estaciones de monitoreo de calidad de aire de la empresa de carbón Cerrejón, se ubicaron estaciones de muestreo de material particulado PM₁₀, para un muestreo in situ y la toma de muestras para los cálculos de las concentraciones y posterior análisis fisicoquímicos. Se describirán los resultados de las variables identificadas y monitoreadas por las redes de monitoreo de calidad de aire de los parámetros meteorológicos y las concentraciones del material particulado muestreado, posteriormente se analizarán las correlaciones del caso y el análisis de las probabilidades condicional a dichos parámetros dando así las posibles explicaciones para comprender las complejas relaciones de la dispersión de la contaminación por material particulado en el área de estudio.

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

De acuerdo a (Arregoces, Rojano, Ângulo, & Restrepo, 2016; Cerrejón, 2007) el Cerrejón es una mina dedicada a la explotación, exploración, extracción, transporte, embarque y exportación de carbón térmico de diversas calidades, el yacimiento explotado por esta compañía se encuentra localizado al noreste de Colombia, en el departamento de La Guajira, frontera con Venezuela. Con coordenadas 11° 5' 2"N; 72° 40' 31"W, ver Figura 4. La explotación se realiza en los depósitos de carbón que tienen una extensión de 69.661 hectáreas, y esta extensión se encuentra dividida por cinco áreas de explotación: Zona Norte, Patilla, Oreganal y Zona Sur y Zona Central.

El área de influencia por la explotación de carbón en el departamento de La Guajira abarca los municipios de Albania, Hatonuevo y Barrancas (Cerrejón, 2006) y de acuerdo a los investigadores (Rojano, Angulo, & Restrepo, 2015) una distancia de 150 km de la costa, a 100 km de Riohacha, capital del departamento de La Guajira.

La operación minera a cielo abierto genera el 92.75% de carbón mineral produciendo en nuestro país, así mismo la producción de carbón por el departamento de La Guajira entre los años 2016 y 2017, representaron el 36.11% y 35.96% respectivamente (Ministerio de Minas y Energía, 2017). En cuantos a los planes de expansión de operación tiene aumentarla a 42 millones de toneladas (Cerrejón, 2011).

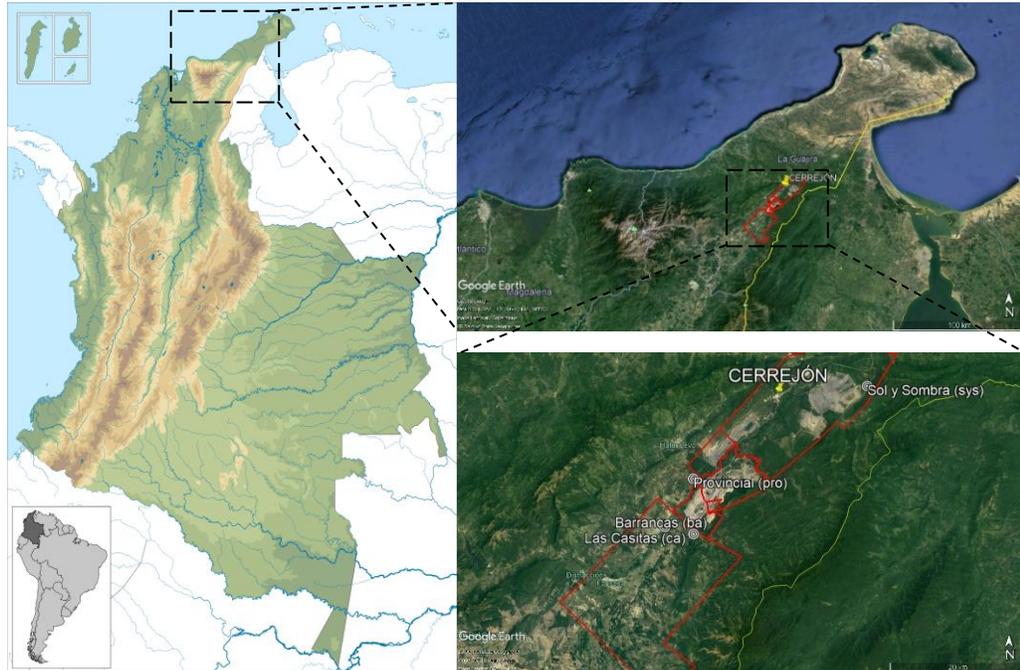


Figura 4. Localización de la mina de Carbón Cerrejón, Fuente Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.

Según (Sostenible, 2017) la topografía del terreno es representada por una llanura aluvial entre los sistemas montañosos de la Serranía del Perijá por el oriente y la Sierra Nevada de Santa Marta por el occidente. (Arregocés, Rojano, Restrepo, & Angulo, 2016) expones que las condiciones meteorológicas como la media anual es de 30°C, así mismo los vientos más fuertes se presentan en los meses de febrero, marzo y julio con un valor promedio de 3,90 m/s. de acuerdo a los autores en el mes de febrero se presenta los valores máximo con un registro de (5,2 m/s) y un mínimo de (1,7 m/s) en el mes de septiembre. La dirección predominante de los vientos es noreste con frecuencias superiores al 30%, aunque también las direcciones Norte – noreste y Este – Noreste, lo que representa en la zona de estudio una consideración en las direcciones de viento.

4.1.1 Temperatura

El comportamiento de la temperatura media para el Caribe, presentaron variaciones entre los 24 y 28°C y homogéneo en la Sierra Nevada de Santa Marta y la Cuenca del Cesar con 10°C en promedio. Los trimestres no marcaron mayor diferencia a través del año.

4.1.2 Precipitación

Las menores lluvias se presentaron en La Alta Guajira con totales de 0-250mm para los primeros 6 trimestres, al igual que los 2 trimestres finales del año, característico de la Región Caribe, que conservó su régimen bimodal durante todo el año

4.2 CAPTURA Y DEPURACIÓN DE INFORMACIÓN

La primera etapa de la investigación consistió en la recopilación de información de la zona de estudio, relacionada con datos meteorológicos de las estaciones de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón, los cuales se utilizaron en el análisis de parcelas polares bivariadas a través de software estadístico R y su paquete de análisis de datos de calidad de aire Openair. Esta red está compuesta de 19 estaciones concentración de material particulado PM₁₀ y PST, además entro de las cuales se miden por medio de sensores meteorológicos variables como temperatura (horaria, diaria, media, máxima y mínima); humedad relativa (horaria, diaria, media); velocidad del viento (horaria, diaria, media); Dirección del viento (horaria, diaria, media); Precipitación (horaria, diaria, media) y presión (horaria, diaria, media).

4.2.1 Análisis de la variación temporal de las concentraciones de PM₁₀, TSP y Datos meteorológicos de la zona minera del Cerrejón en el periodo 2012 al 2016.

Para el establecimiento del análisis primeramente se estableció la selección de las estaciones de muestreo para esta investigación, escogiendo las estaciones que hacían parte de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón, dentro de las cuales se tenía acceso a información de las siguientes estaciones:

1. Sol y Sombra
2. Remedios
3. Provincial
4. Patilla
5. Papayal
6. Barrancas
7. Las casitas

De las 7 estaciones se tuvieron en cuenta los registros de los datos registrados de la concentración del PM₁₀ y TSP los parámetros meteorológicos, estaciones que tuvieran una representatividad de las presencias de comunidades en la zona de estudio y facilidad de instalación de equipos de muestreo. Dando como resultado y cumpliendo con los criterios anteriormente mencionados se evaluó la representatividad de los datos de las siete estaciones, eliminando así los datos que no tuvieran la continuidad y relación de días muestreados con las variables necesarias para el estudio.

Arrojando que de las siete estaciones se escogiera solo 4 estaciones que presentaba una relación de muestreo de las variables meteorológicas y concentraciones de material particulado de las estaciones de la red de calidad de aire del Cerrejón.

Las estaciones seleccionadas se localizan en la zona norte: con la estación Sol y Sombra (SyS) la cual representa la estación de fondo o también conocida por su nombre en inglés background; zona centro: estación Provincial (Pro) y zona sur: estaciones Barrancas (Ba) escogida por su representatividad de vientos debajo de las explotaciones mineras y la estación las Casitas (Ca). Las estaciones Ca y Pro se escogieron por los asentamientos de poblaciones indígenas y condiciones de vida que hacen representativo el muestreo en estas dos estaciones. Las estaciones de muestreo seleccionadas se muestran la figura 5 y Tabla 7.

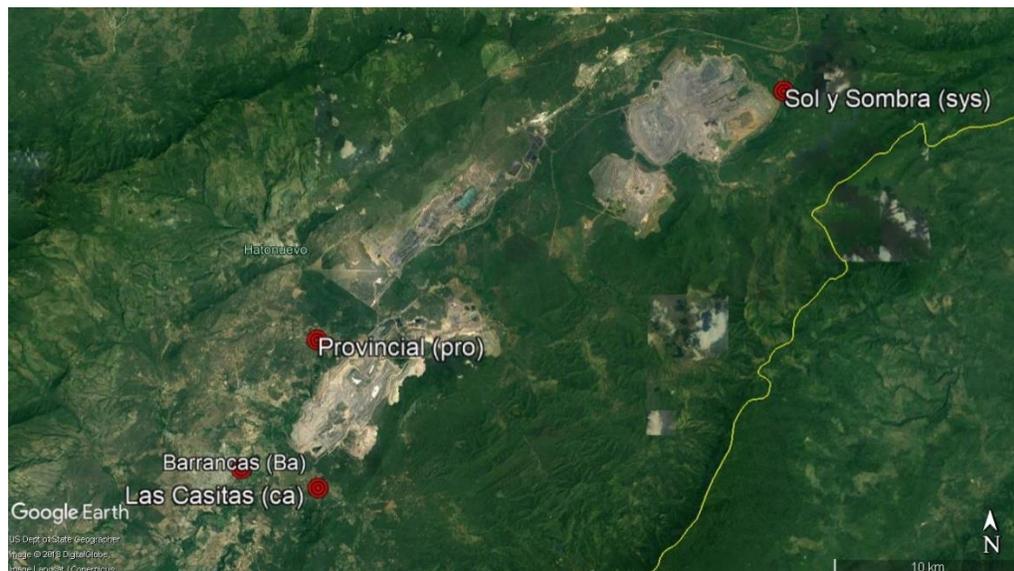


Figura 5. Localización de las estaciones de monitoreo de la zona de influencia de la mina de Cerrejón. Fuente Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.

Tabla 7. Ubicación y características de las estaciones de la Red de calidad de aire de Cerrejón.

Estaciones	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (m)	contaminante	Variable meteorológica*
Sol y Sombra (SYS)	11.143	-72.519	117	TSP y PM ₁₀	VV, DV, T
Provincial (Pro)	11.022	-72.742	156	TPS y PM ₁₀	VV, DV, T
Barrancas (Ba)	10.960	-72.780	150	TPS y PM ₁₀	VV, DV, T
Las Casitas (Ca)	10.955	-72.741	162	TPS y PM ₁₀	VV, DV, T

Fuente: Propia

Las cuatro estaciones seleccionadas por los criterios de evaluación representan a la zona minera de carbón a cielo abierto en el departamento de La Guajira, teniendo en cuenta todas las interacciones que están cubren y la pertinencia con el trabajo de investigación.

4.2.2 Análisis de los factores meteorológicos de velocidad y dirección de viento

Para todo el periodo en estudio 2012-2016 las condiciones meteorológicas que se emplearon para el análisis de correlación con las concentraciones registradas del PM10 fueron: la dirección del viento (grados sexagesimales) y velocidad del viento (metros por segundo),

Los datos de las variables meteorológicas han sido obtenidos por los sensores de cada una de las estaciones seleccionadas y adecuada en MS Excel correspondiente a la fecha de registros, teniendo dos matrices de datos: una de las variables meteorológicas por los registros puros registrados por los sensores y la segunda con las concentraciones de material particulado de TSP y PM₁₀.

Para poder procesar los datos se reorganizo la información en un archivo de MS Excel por cada estación para todo el periodo comprendido entre 2012 al 2016 y convirtiéndolo a formato a valores planos separados por comas (.csv), teniendo en cuanto el tratamiento estadístico a la base de datos y así proceder al análisis de las rosas de vientos y comportamientos en cuanto a las direcciones por estaciones de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón.

4.2.3 Muestreadores de TSP Y PM₁₀ En las estaciones de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón.

En el estudio se tuvo en cuenta los equipos que disponía la red monitoreo de calidad de aire del Cerrejón, para la cual cuenta con muestreadores de alto volumen en las estaciones seleccionadas. Teniendo en cuenta que para el desarrollo del proyecto se utilizó la misma tecnología de los muestreadores para lo cual se comparte el mismo procedimiento para la determinación gravimétrica de acuerdo al método de referencia para contaminantes de PM₁₀ y TSP (Appendix J to Part 50 para PM₁₀) y (Appendix B to Part 50 para TSP) establecidos por la Federal Regulations de los Estados Unidos.

Se empleó equipos de la red del Cerrejón Hi-Vol para TSP y PM₁₀ de la Marca Tisch Environmental, modelo TE-6070 para PM₁₀ y modelo TE-5170 para TSP (Figura 6). Estos equipos utilizaban escobillas, a base de carbono en sus motores.



Figura 6. Muestreadores de alto volumen TE-6070 y TE-5170 para la determinación de PM₁₀ y TSP por método gravimétrico, de la red del Cerrejón.

El proyecto trabajo además con equipos adquiridos por la Universidad Popular del Cesar en el marco de un proyecto de investigación, en el cual se manejaron equipos PM₁₀ de la misma marca Tisch Environmental, como fue el modelo TE-6070DV-BL sin escobillas (Brushless), la cual es la diferencia con el modelo TE-6070 de la red del Cerrejón. Estos equipos, se ubicó un equipo en las cuatro estaciones seleccionadas en el estudio y trabajaron simultáneamente con los equipos de la red para la recolección de muestras y posterior caracterización química de la masa del material particulado recolectados en los filtros.

Los equipos instalados y operados en este proyecto se garantizó el cumplimiento de las condiciones de operación como es el caudal que vario entre 1.1 a 1.21 m³/min a través de un cabezal de corte PM₁₀ recogiendo las partículas clasificadas en filtros de fibra de cuarzo de 8 "x 10". Este caudal volumétrico se controló por medio de un controlador de flujo volumétrico con el que cuenta el equipo. La campaña de muestreo realizado a través de los equipos sin escobillas (Brushless) en el periodo entre junio de 2015 a junio de 2016, en la cual se recolectaron 146 muestras con fibra de cuarzo.



Figura 7. Instalación del equipo TE-6070DV-BL sin escobillas en la Estación Sol y Sombra



Figura 8. Instalación del equipo TE-6070DV-BL sin escobillas en la Estación Provincial



Figura 9. Instalación del equipo TE-6070DV-BL sin escobillas en la Estación Barrancas



Figura 10. Instalación del equipo TE-6070DV-BL sin escobillas en la Estación Las Casitas

El proceso de calibración (Figura 11) de las campañas de muestreo se tuvo en cuenta la programación de calibración de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón determinando los caudales de calibración y la pendiente e intercepción resultante para cada equipo, siguiendo los procedimientos establecidos por el fabricante Tisch para cada modelo.

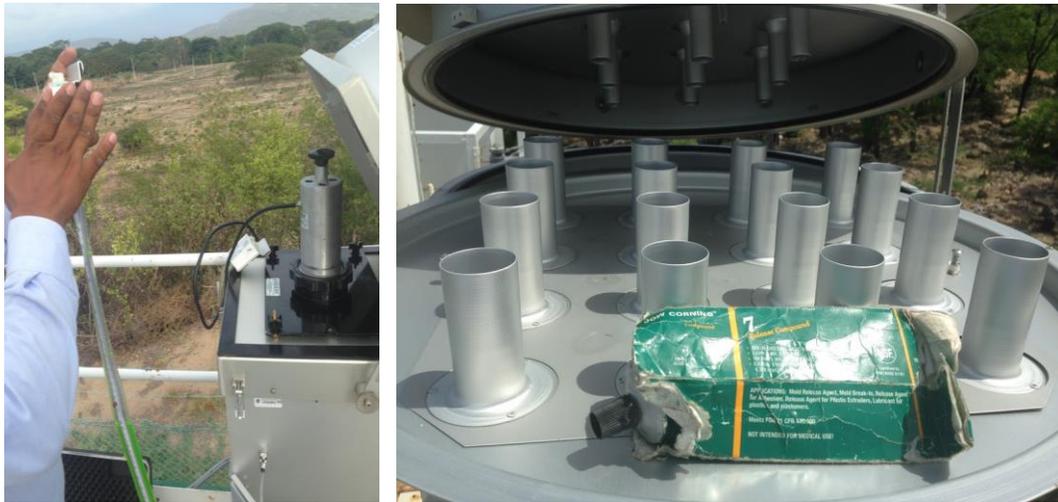


Figura 11. Calibración y mantenimiento a Muestreadores de alto volumen TE-6070 para la determinación de PM₁₀, de la red del Cerrejón.

Se trabajo con los datos resultante de la campaña de muestreo realizada durante 5 años por la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón, ciclos de 24 horas cada tercer día; teniendo en cuenta las mediciones correspondientes de los caudales antes y después del muestreo.

La Tabla 8 muestra el Número de muestras de PM₁₀ tomadas en la campaña de muestreo 05 – 2015 al 05 – 2016 con los equipos Tisch Environmental, modelo TE-6070DV-BL sin escobillas (Brushless).

Tabla 8. Número de muestras de PM₁₀ recolectada con equipos Tisch Environmental, modelo TE-6070DV-BL sin escobillas (Brushless).

Estaciones	TSP	PM ₁₀	PM ₁₀ UPC Análisis Químico
Sol y Sombra (SYS)	513	507	50
Provincial (Pro)	497	502	22
Barrancas (Ba)	506	489	43
Las Casitas (Ca)	499	506	33
Total	2015	2004	148

Fuente: Propia

4.3 ANALISIS Y CALCULO DE LAS CONCENTRACIONES DEL MATERIAL PARTICULADO.

La tabulación y cálculo de las concentraciones del material particulado se realizó mediante hoja de cálculo dinámica de MS-Excel 2016, por medio de análisis descriptivo. a las muestras tomadas

4.4 ANÁLISIS DE LAS INTERACCION, CORRELACIÓN Y REGRESIÓN MULTIPLE EN LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE DEL CERREJÓN.

Los datos disponibles se organizaron por minería de datos por medio de MS-Excel® 2016 Para Windows, el análisis estadístico se realizó por el software Statgraphics y además se utilizó el software de código Abierto R y el paquete de herramientas para el análisis de la calidad de aire desarrollado en R llamado Openair (D. Carslaw, 2015). Los análisis de tendencias se calcularon por medio de la regresión múltiple por medio de Statgraphics; las correlaciones temporales junto con el análisis de rosas de vientos se realizaron utilizando la opción windRose, además, el análisis por función de probabilidad condicionada entre la contaminación PM₁₀ y TSP con las variables meteorológica de velocidad y dirección del viento en las estaciones seleccionadas se realizó con la opción de PolarPlot del paquete Openair (Grange et al., 2016).

El análisis de Componente Principales ACP se realizó por medio del software estadístico Statgraphics, teniendo en cuenta la base de datos organizadas y evaluada por medio de MS-Excel® para Windows versión 2016. En la cual se organizó toda la caracterización química de las 148 muestras recolectadas en la campaña de muestreo realiza entre junio de 2015 a junio de 2016.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se utilizó la información correspondiente al periodo comprendido entre los años 2012 al 2016 de las cuatro estaciones que hacen parte de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón; las cuales son: Sol y Sombra, Provincial, Barrancas y Las Casitas, teniendo en cuenta un porcentaje de captura mayor al 75%, para lo cual se utilizó minería de datos y análisis por herramientas estadísticas como R con su paquete Openair, al igual que Statgraphics.

Se hizo un análisis para determinar las interrelaciones entre las mayores concentraciones de PM₁₀ y TSP con la dirección y velocidad de viento, empleando herramientas estadísticas basada en la función de probabilidad condicionada por medio de grafico polar y polar anular.

Como complemento se realizó el análisis de la caracterización fisicoquímica de las muestras de material particulado PM₁₀ recolectadas en el año 2015 – 2016 por las estaciones TE-6070DV-BL sin escobillas y en la búsqueda de generar un mayor entendimiento de las condiciones y procesos locales sobre las relaciones de la contaminación por material particulado entre las fuentes y los contaminantes, se realizó una evaluación por componente principales (APC) y así identificar las posibles asociaciones a las fuentes de emisiones.

Los análisis obtenidos en la caracterización química arrojó una matriz de 41 elementos químicos obtenidos en las muestras de las estaciones seleccionadas como son (Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Rb, Sr, Pb, P, Ar, Co, Ga, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Sm, W, Au, Hg, Pb, Bi). De los filtros de cuarzo de 254 x 203 mm, utilizados en el muestreo de receptores, se adecuaron para el análisis químico, Seguidamente, se le hicieron tres punzadas de 47 mm, los que se colocaron en 15 ml de una solución de extracción (HNO₃ al 5,5%/HCl al 16,75% diluido con agua Milli-Q) en un recipiente de digestión con Teflón. Las muestras, se digirieron en un microondas CEM MARSXpress, usando un programa con una rampa de 23 min a 185 °C siguiendo el Método IO-3.1 de la EPA ; esta detección se realizó por análisis XFR utilizando un Spectro X-Lab 2000 El equipo tiene un sistema de excitación primario, compuesto por un ánodo del tubo de rayos X de paladio (Pd) de 400 W de potencia, con siete sistemas de excitación secundario compuesto por: tarjeta de dispersión Mo-K-Compton, tarjeta de polarización B4C, tarjeta de polarización Al₂O₃, tarjeta secundaria Co-K, tarjeta secundaria Si-K, tarjeta secundaria Al-K y un cristal de grafito pirolítico altamente orientado (HOPG, por su sigla en inglés).

Estos análisis se obtuvieron en cooperación con la Universidad de Clarkson de los Estados Unidos y para algunas muestras digeridas y diluidas con ácido, se analizaron, usando una ICP-MS Thermo X-series 2, según el Método IO-3.5 de la EPA.

5.1 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10, TSP DE LA ZONA MINERA DEL CERREJÓN EN EL PERIODO 2012 AL 2016.

En la figura 12 se representa el resumen de la variación de datos de la estación Sol y Sombra, esta grafica muestra para todo el periodo, los valores estadísticos más importantes de los datos procesados, tales como: media, mediana, valor mínimo y máximo, percentil 95 y el histograma, de igual forma se puede observar la representación gráfica de los datos existente y faltantes de la estación representada con la franja azul y roja respectivamente. El valor del porcentaje de captura de los contaminantes y variables meteorológicas para cada año se muestra de calor verde.

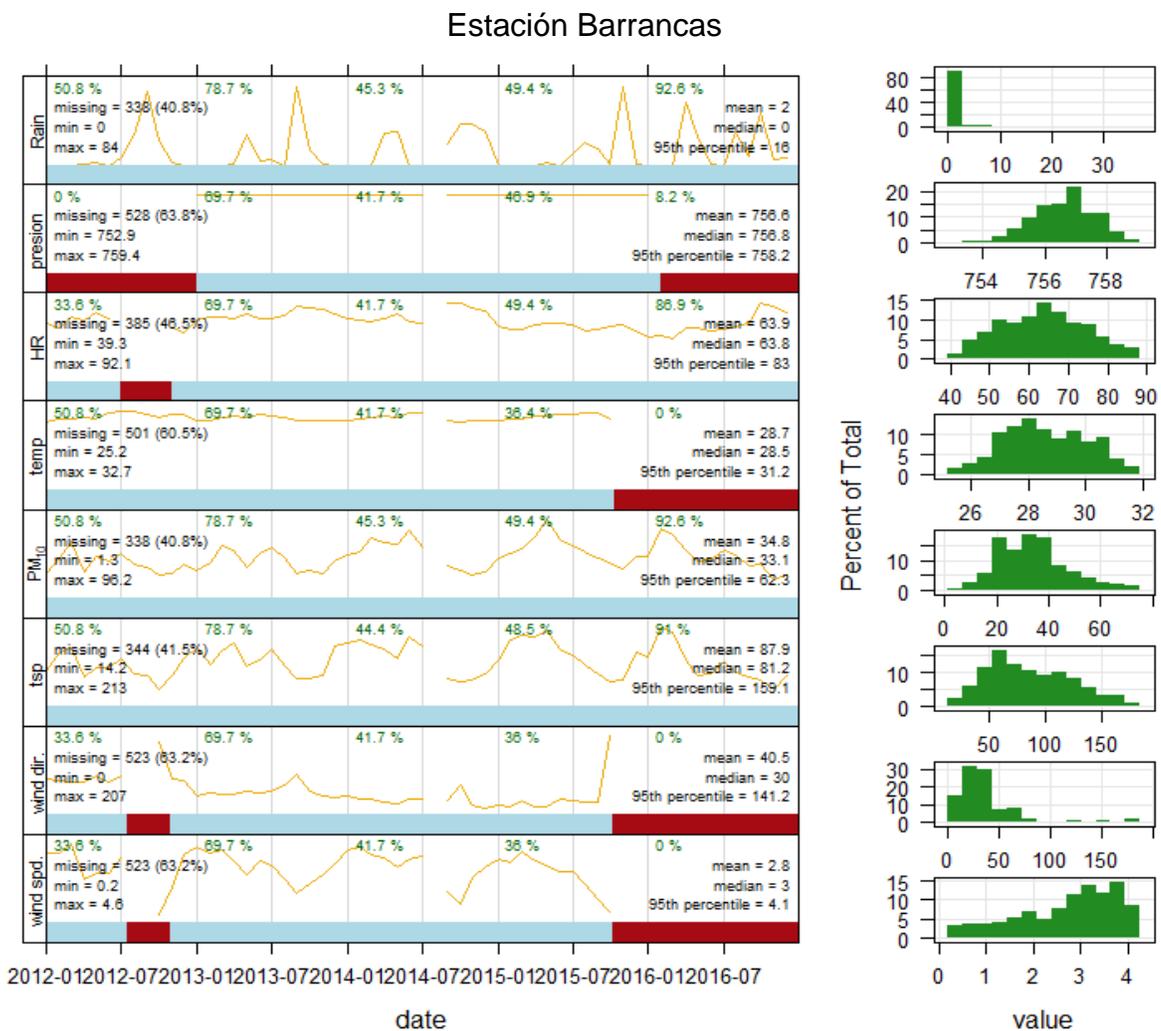
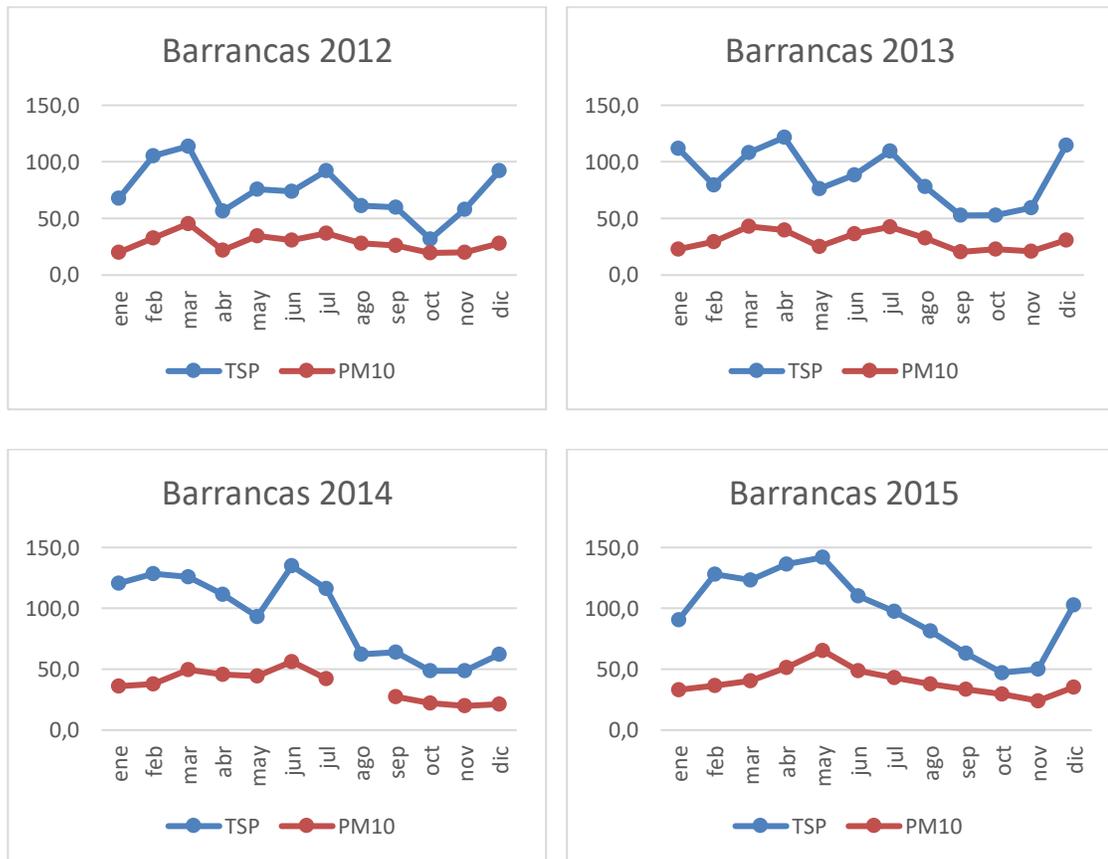


Figura 12. Grafica resumen de los datos de Barrancas periodo 2012-2016.

Teniendo en cuenta el análisis y la depuración de la base de datos, la cual cumple con las suposiciones para la aplicación de los análisis estadísticos respectivos como es la normalidad y los diferentes coeficientes de cada prueba estadística realizada a las estaciones, así mismo se presenta una muestra de cada uno de los análisis realizados de las cuatro estaciones. En el anexo 1 se presentan las demás estaciones tenidas en cuenta en el estudio.

5.1.1 Análisis de la concentración de PM_{10} en las estaciones de Cerrejón.

En las Figura 13 se muestra el material particulado en las estaciones seleccionadas y el periodo seleccionado no presentan incongruencia con respecto a los valores de los contaminantes estudiados. En el anexo 2 se muestra las concentraciones de las estaciones del estudio



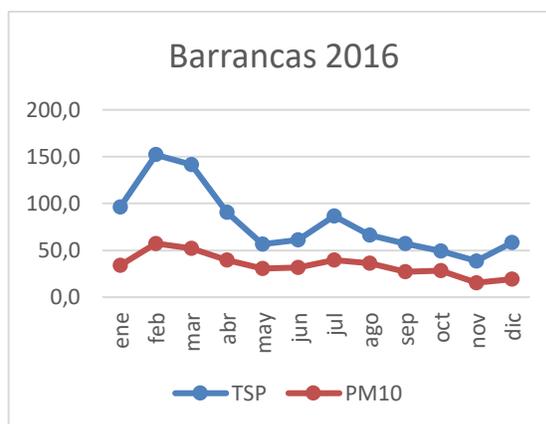


Figura 13. Comportamiento de la concentración de PM_{10} y PST

De acuerdo con el comportamiento registrados en las estaciones de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón (Tabla 9), los meses que registran concentraciones más elevadas son los meses de temporada seca, así mismo se evidencias que en el primer trimestre de los años se sobre pasa los niveles máximos permisibles de TSP.

Tabla 9. Concentraciones de PM_{10} registrada entre 2012 – 2016.

	Barrancas batsp	Barrancas bapm10	Casitas capm10	Casitas catsp	Provincial patbsp	Patilla papm10	Patilla protbsp	Provincial propm10	Sol y Sombra syspm10	Sol y Sombra systsp
2012	73,77	28,57	39,32	95,81	81,29	30,02	102,59	36,01	16,26	33,63
2013	83,45	29,82	40,72	115,21	59,38	19,92	93,18	32,37	20,63	37,94
2014	85,89	30,23	38,15	101,28	38,93	12,92	87,78	35,81	24,75	42,63
2015	94,66	38,16	38,69	101,39	89,07	33,75	100,46	40,35	25,29	46,37
2016	76,49	32,59	39,80	98,26	71,99	29,66	86,12	35,84	22,08	40,65

Fuente: Propia

5.1.2 Diagramas de correlación para PM_{10} , TSP, la velocidad y dirección del viento.

Para el análisis de la calidad del aire entre los contaminantes seleccionados y condiciones meteorológica suelen presentar relaciones más o menos fuertes entre sí, sin embargo, estas relaciones que suelen existir pueden resultar difícil teniendo en cuenta las sinergias, relaciones cruzadas de la zona e interferencias, además de la complejidad de trabajar con series largas de datos, en este caso del 2012 al 2016.

Los datos de la campaña de medición obtenidos de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón fueron sometidos a análisis de correlación, dando como resultados una matriz Figura 15, que muestran las correlaciones entre las variables de tres maneras. La forma indica una correlación positiva, negativa o cero de acuerdo con la orientación de la elipse; orientadas hacia la derecha significan una correlación positiva, hacia la izquierda indica una correlación negativa y la forma del círculo significa una correlación cero. El color indica la importancia estadística de la correlación, el valor numérico se describe en porcentaje y representa el coeficiente de correlación de Pearson.

Se crearon diagrama de correlación (Figura 14) para cada estación seleccionada, con el objetivo de observar una correlación de las concentraciones del material particulado PM₁₀ y TSP con las variables meteorológicas como fueron la velocidad y dirección del viento, Humedad relativa, temperatura, precipitación y presión.

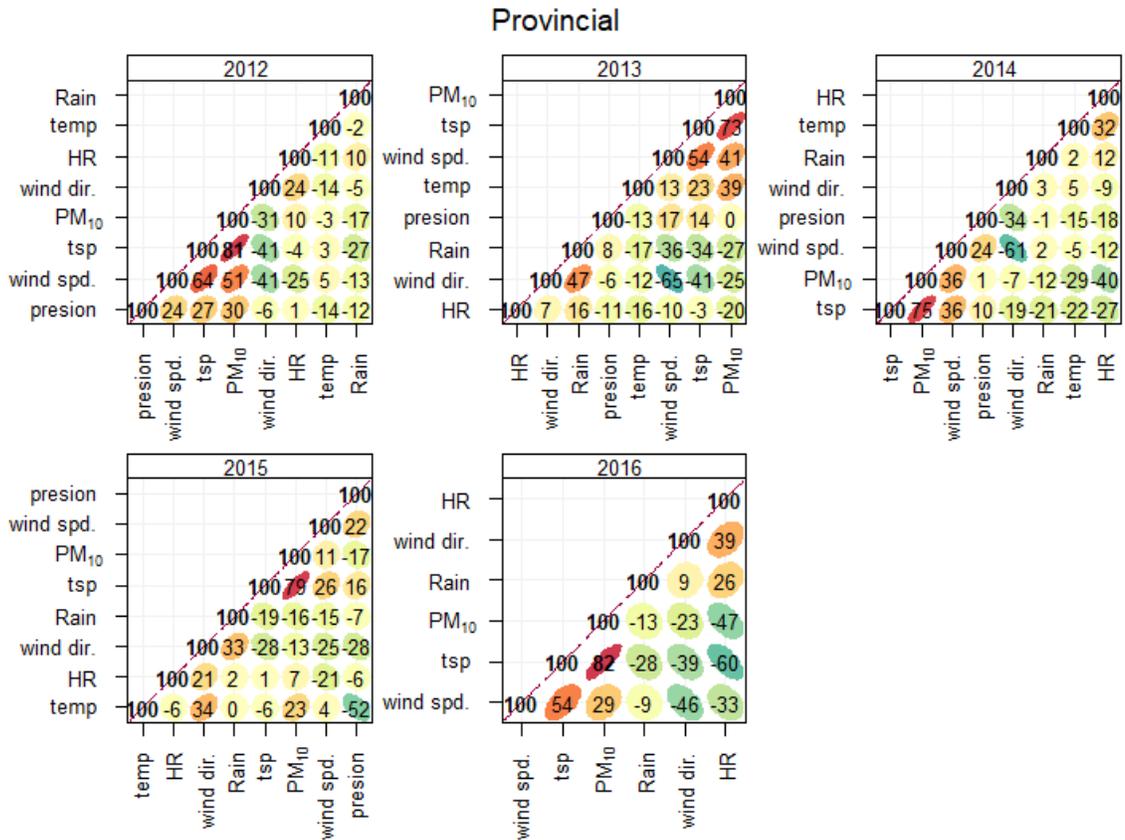


Figura 14. Matriz de correlación de la estación de Provincial de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón.

En la figura 14 y anexo 3, muestran que en la mayoría de los casos la correlación significativa mostrada en cada estación como era de esperarse se da entre las concentraciones de PM_{10} y TSP, además las concentraciones del material particulado están correlacionadas negativamente con la dirección del viento como se muestra en la estación de provincial, lo cual hace que el comportamiento de la dirección de viento en esta estación no experimentan cambios significativos en cuanto a las concentraciones del material particulado. Caso contrario sucede con la velocidad del viento aumentado la tendencia del 2015 al 2016 dando un coeficiente de r de 0.24 y 0.54 respectivamente.

Cabe resaltar que en la estación Sol y Sombra identificada como estación de fondo no presenta cambios significativos en las concentraciones del material particulado monitoreado ni de las velocidades de viento. Lo que demuestra unos resultados coherentes con el diseño de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón.

En cuanto a los diagramas de correlación por cada uno de los años comprendido entre el 2012 al 2016, se identifican las asociaciones de las variables de cada estación con respecto a otras estaciones de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón seleccionadas; en el caso de la estación Barrancas se puede identificar la asociación significativa (Figura 15), que comparten con variables de otras estaciones (Ba – Ca – Pro – SyS – Pa), dichas variables son: la velocidad del viento y concentraciones de material particulado PM_{10} de la estación Las Casitas; en cuanto a la estación de Provincial se identifica una alta asociación con las concentraciones del material particulado PM_{10} , TSP y la dirección de viento; de la misma forma se tiene una alta relación con la velocidad de viento de la estación Sol y Sombra. De igual forma en las matrices de correlación y los demás análisis se tuvo en cuenta la estación Patilla, pero no se relacionó como una estación relevante, ya que la estación está en procesos de reubicación continua por los procesos de reasentamiento de la población, lo que hizo que se tuviera como una variable de la zona, pero no se asumiera como una estación relevante para el estudio.

Teniendo en cuenta los resultados de la matriz de correlaciones para el periodo 2012 – 2016 para la estación Las Casitas, en relación con las demás estaciones se evidencia que las asociaciones no son significativamente altas como las demás estaciones, la asociación más alta presentada fue con el material particulado TSP de la estación Patilla con un coeficiente de $r = 0.66$; así mismo la concentración de PM_{10} de la estación Provincial presenta una correlación o asociación positiva significativamente mediana con un coeficiente de $r = 0.61$; las demás variables correlacionadas y mostradas no supera un valor de 0.31. lo que sugiera una baja relación con las variables dirección, velocidad y PM_{10} de la estación Sol y Sombra y la velocidad de viento de la estación provincial.

Para la estación Provincial se destaca la asociatividad con variables de la concentración de material particulado TSP de Barrancas con valores de $r = 0.8$ y las concentraciones de PM_{10} de la estación Provincial con valores de $r = 0.77$.

Se observa que las correlaciones de la estación Sol y Sombra de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón con las variables meteorológicas son bajas y que representa coeficientes con calores cercanos a 0.1; resultado así un buen efecto de representatividad como estación de fondo en la red de muestreo. Ya que solo presenta valores significativamente altos con su misma concentración de PM_{10} .

Matriz de correlación para el periodo del 2012 al 2016

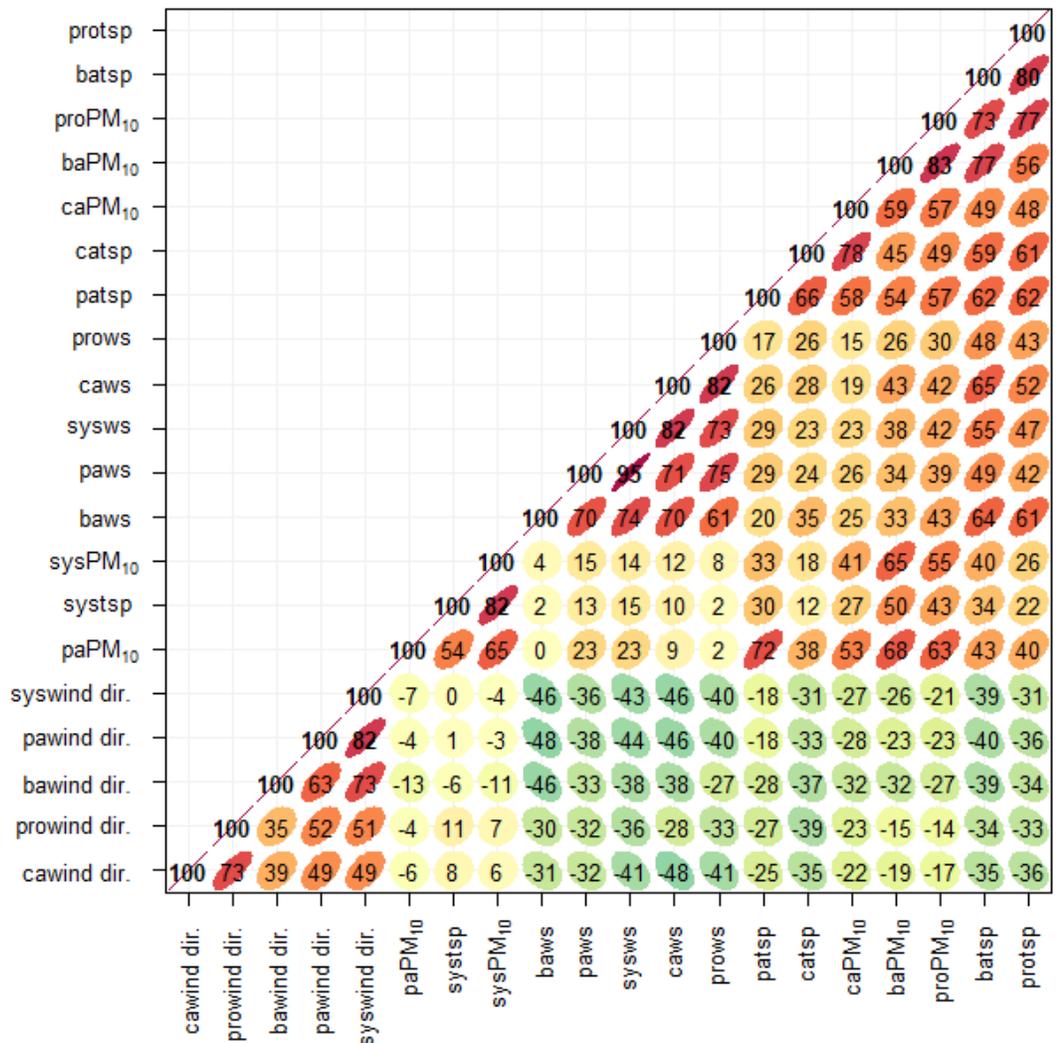


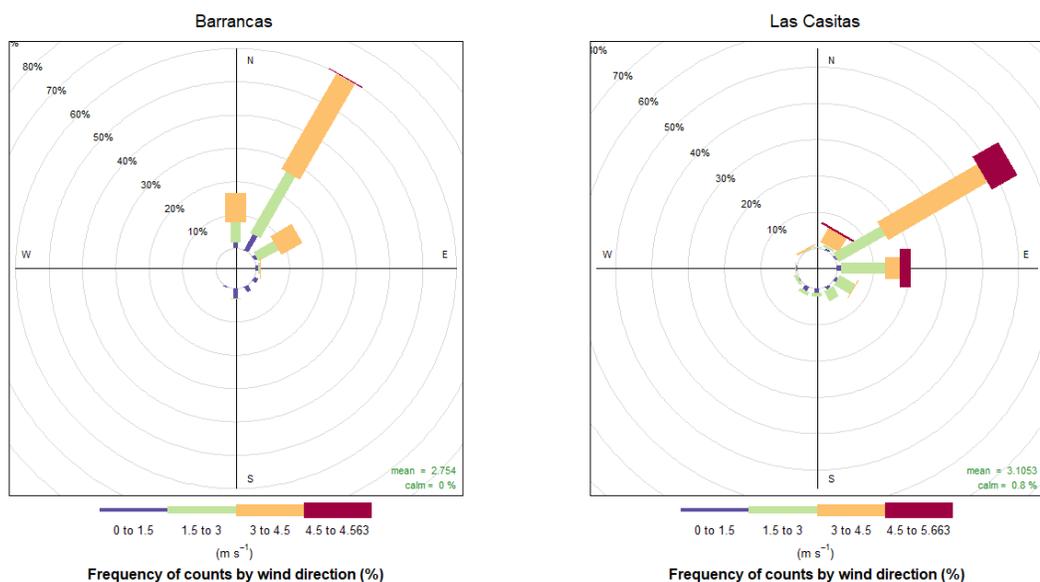
Figura 15. Matriz de correlación de la estación de Barrancas de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón del 2012 al 2016.

5.1.2.1 Análisis de los factores meteorológicos de velocidad y dirección de viento en las estaciones seleccionadas

Rosas de vientos

Las rosas de vientos muestran la distribución de las frecuencias de la velocidad y dirección de viento analizados por periodos horario y diario; lo cual permite identificar las direcciones predominantes y sus velocidades, teniendo en cuenta la dirección del viento lo cual coincide con fuentes emisoras significativas de contaminante de material particulado de interés en este estudio; relacionando con la alta probabilidad que los contaminantes monitoreados en las estaciones seleccionadas hayan sido transportados de las fuentes según su sector y distribución eólico de la región.

En la Figura 16 muestran las rosas de vientos para los periodos 2012 – 2016 para cada estación seleccionada en la zona de influencia del Cerrejón (Tabla 7), se puede observar como las direcciones predominantes y las mayores velocidades de los vientos para las estaciones de Barrancas son Norte- Noreste presentado una frecuencia aproximada del 60%. Así mismo las estaciones Provincial, Las Casitas y Sol Y Sombra también presentan frecuencia aproximada del 40%, 55% y 70% respectivamente en direcciones Este – Noreste.



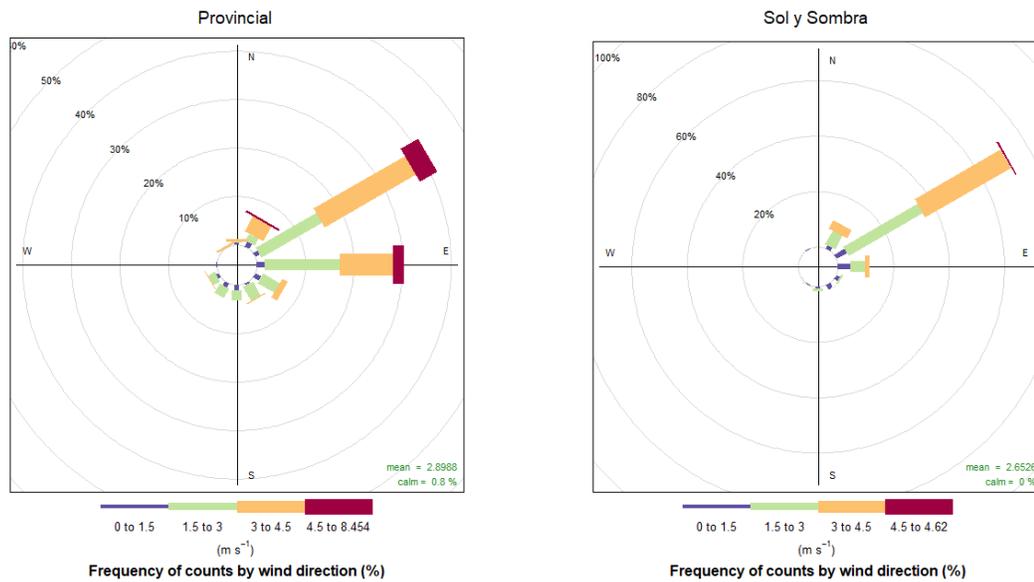


Figura 16. Rosas de vientos para los periodos 2012 – 2016 de las estaciones de la red de calidad de aire del Cerrejón.

La estación Provincial parece recibir influencia de casi todas las direcciones, igual que Las casitas, el promedio de la velocidad de viento observada en las estaciones (Ba – Ca- Pro- SyS) oscila entre 2.6 a 3.1 ms⁻¹, presentándose las mayores velocidades de viento en la estación Provincial con valor cercano a 8.45 ms⁻¹.

En la Figura 17 muestra la rosa de viento desagregada para la estación de Barrancas, de cada uno de los años estudiado exceptuando el año 2016 para el cual presentó problemas en el sensor de medición, para los dos primeros años 2012 y 2013 se observa una dirección predominante Este – Noreste que cambia en los años subsiguiente 2014 al 2015, atenuándose a la dirección Norte – Noreste, lo cual propicia condiciones de transporte de emisiones de varias fuente a la estación de muestreo.

En la Figura 18 se observa que la dirección de viento predominante Noreste en los doce meses del año, marcando una tendencia para los meses de enero a junio, noviembre y diciembre, en la cual predomina la dirección Norte – Noreste, exceptuando los meses de julio a octubre predominando para ese periodo direcciones de Este – Noreste.

Barrancas

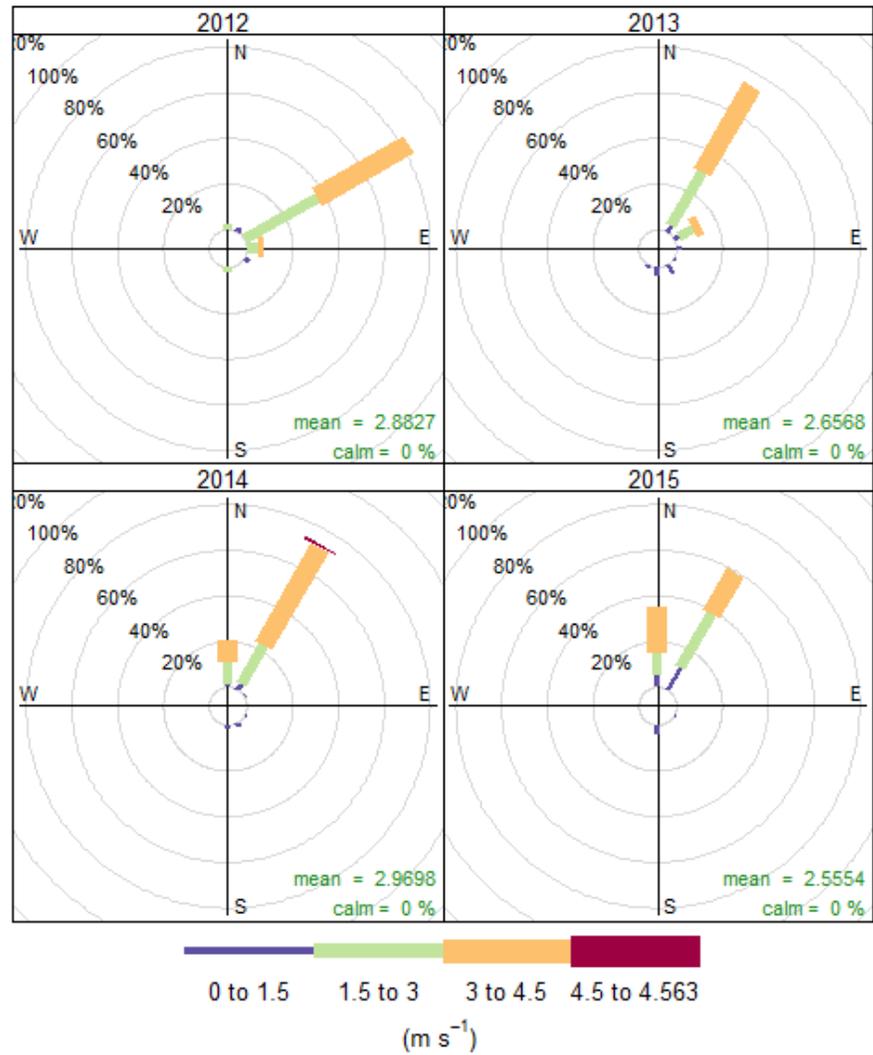
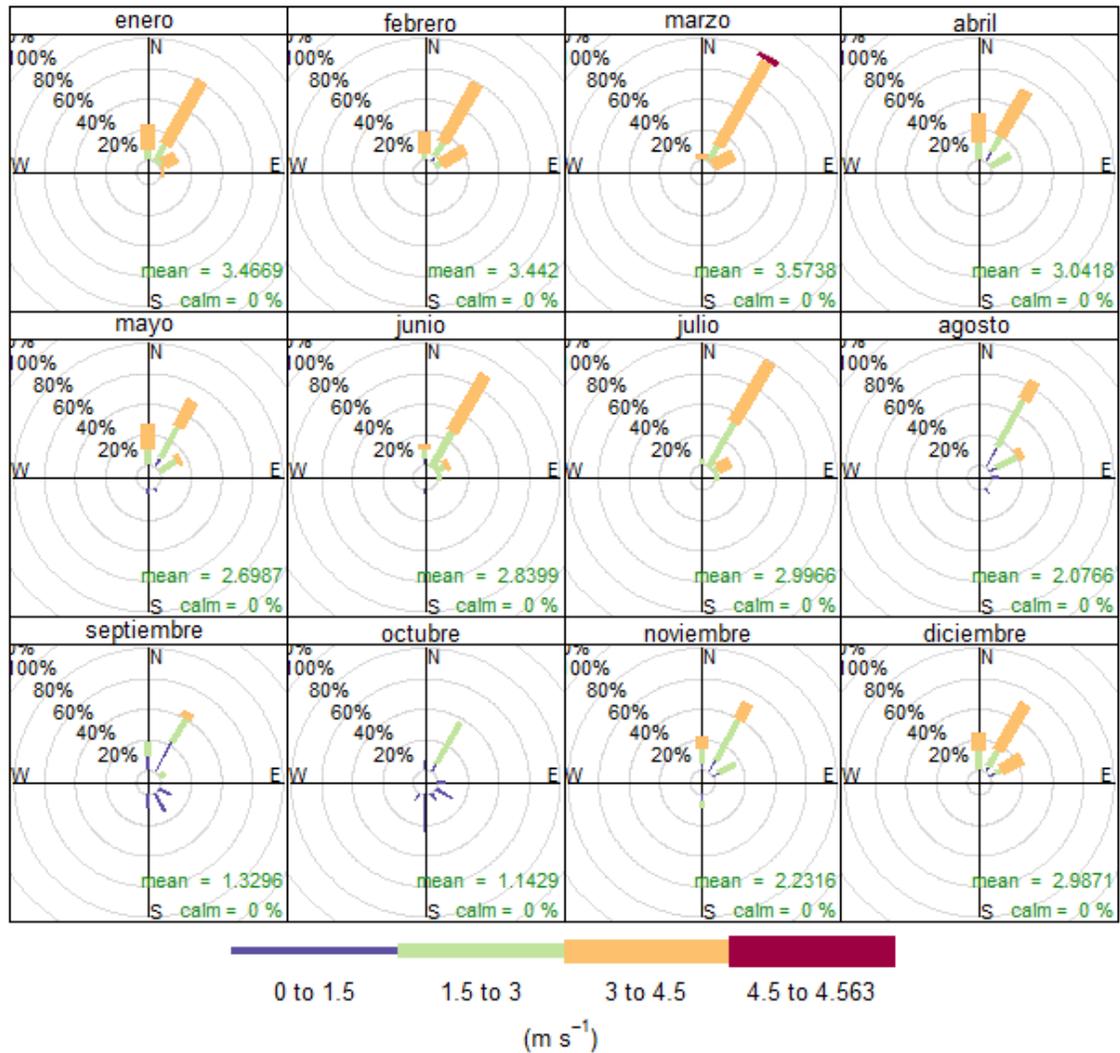


Figura 17. Rosa de los vientos para periodos anuales entre 2012 al 2016 en la estación Barrancas.

Barrancas



Frequency of counts by wind direction (%)

Figura 18. Rosa de los vientos para periodos mensuales entre 2012 al 2016 en la estación Barrancas.

Las estaciones restantes se pueden ver en el anexo 3, las estaciones presentan un comportamiento similar en cuanto a la dirección predominante y otras direcciones presentes en cada mes del año. La estación de Barrancas presenta un comportamiento diferente a las demás estaciones, es por ello que aumenta la probabilidad que este afectada por varias fuentes de contaminación debido al comportamiento de las direcciones de los vientos ante descrito.

5.2 ANALISIS DE LAS CONCENTRACIONES DEL MATERIAL PARTICULADO POR REGRESIÓN MÚLTIPLE EN LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE DEL CERREJÓN.

Este análisis se realiza mediante software estadístico Statgraphics, arrojando como resultados de las regresiones lineales múltiples por cada estación que hace parte del estudio. y Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%. En los modelos creados.

5.2.1 Análisis de las concentraciones de TSP y PM₁₀ mediante regresiones múltiples para las estaciones seleccionadas de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón.

- Barrancas

En la siguiente Tabla se presenta los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la concentración de TSP de Barrancas (batsp) y 19 variables independientes, dando como modelo la ecuación:

$$\text{batsp} = 5,04855 + 1,56538 \cdot \text{bapm10} + 6,93627 \cdot \text{baws} - 0,23922 \cdot \text{capm10} + 7,59707 \cdot \text{caws} + 0,273654 \cdot \text{patsp} - 0,529956 \cdot \text{papm10} + 0,301862 \cdot \text{protsp} - 0,393345 \cdot \text{propm10} - 0,0635886 \cdot \text{prowd} - 7,46861 \cdot \text{sysws}$$

Tabla 10. Modelo de regresión para la concentración de TSP de la estación Barrancas

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico T	Valor-P
		Estándar			
CONSTANTE	5,04855	6,22567		0,810925	0,4191
bapm10	1,56538	0,156237		10,0193	0,0000
baws	6,93627	1,89234		3,66545	0,0004
capm10	-0,23922	0,0831523		-2,87689	0,0048
caws	7,59707	1,86182		4,08046	0,0001
patsp	0,273654	0,0545536		5,01625	0,0000
papm10	-0,529956	0,172758		-3,06762	0,0027
protsp	0,301862	0,0498993		6,04942	0,0000
propm10	-0,393345	0,180551		-2,17858	0,0314
prowd	-0,0635886	0,031353		-2,02815	0,0449
sysws	-7,46861	1,89852		-3,93391	0,0001

Fuente: Propia

Tabla 11. Análisis de Varianza para la concentración de TSP de la estación Barrancas

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	118189,	10	11818,9	82,13	0,0000
Residuo	16549,7	115	143,911		
Total (Corr.)	134738,	125			

Fuente: Propia

R-cuadrada = 87,7171 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 86,6491 por ciento
 Error estándar del est. = 11,9963
 Error absoluto medio = 9,11973
 Estadístico Durbin-Watson = 1,62364 (P=0,0171)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,188072

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 87,7171% de la variabilidad en batsp. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 86,6491%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 11,9963. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones; El error absoluto medio (MAE) de 9,11973 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0449, que corresponde a prowd. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%.

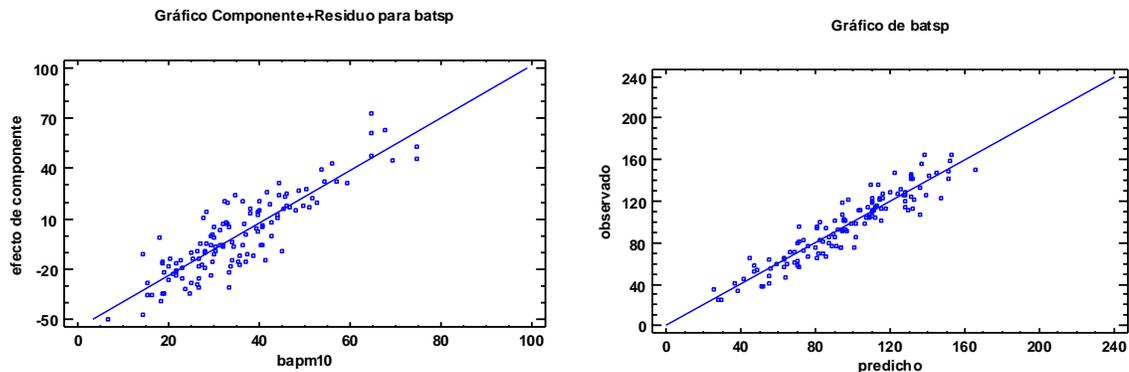


Figura 19. Gráfico NOVA para contaminante TSP (batsp)

PM₁₀ Barrancas

En la Tabla 12 y 13 se presenta los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la concentración de PM₁₀ de Barrancas (baPM₁₀) y 19 variables independientes, dando como modelo la ecuación:

$$\text{baPM}_{10} = -1,34048 + 0,28799*\text{batsp} - 1,74797*\text{baws} + 0,0960058*\text{capm10} - 0,089236*\text{patsp} + 0,36972*\text{papm10} - 0,134291*\text{protsp} + 0,425135*\text{propm10} + 1,39491*\text{sysws}$$

Tabla 12. Modelo de regresión para la concentración de PM₁₀ de la estación Barrancas

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	-1,34048	1,95292	-0,686397	0,4938
batsp	0,28799	0,0259891	11,0812	0,0000
baws	-1,74797	0,83838	-2,08493	0,0393
capm10	0,0960058	0,0346219	2,77298	0,0065
patsp	-0,089236	0,0242525	-3,67945	0,0004
papm10	0,36972	0,0691698	5,3451	0,0000
protsp	-0,134291	0,0214738	-6,25371	0,0000
propm10	0,425135	0,0687958	6,17966	0,0000
sysws	1,39491	0,653965	2,133	0,0350

Fuente: Propia

Tabla 13. Análisis de Varianza para la concentración de PM₁₀ de la estación Barrancas

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	18720,9	8	2340,11	86,37	0,0000
Residuo	3169,85	117	27,0928		
Total (Corr.)	21890,8	125			

Fuente: Propia

R-cuadrada = 85,5197 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 84,5296 por ciento

Error estándar del est. = 5,20507

Error absoluto medio = 3,94492

Estadístico Durbin-Watson = 1,69441 (P=0,0432)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,139307

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 85,5197% de la variabilidad en bapm10. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables

independientes, es 84,5296%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 5,20507. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones.

El error absoluto medio (MAE) de 3,94492 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

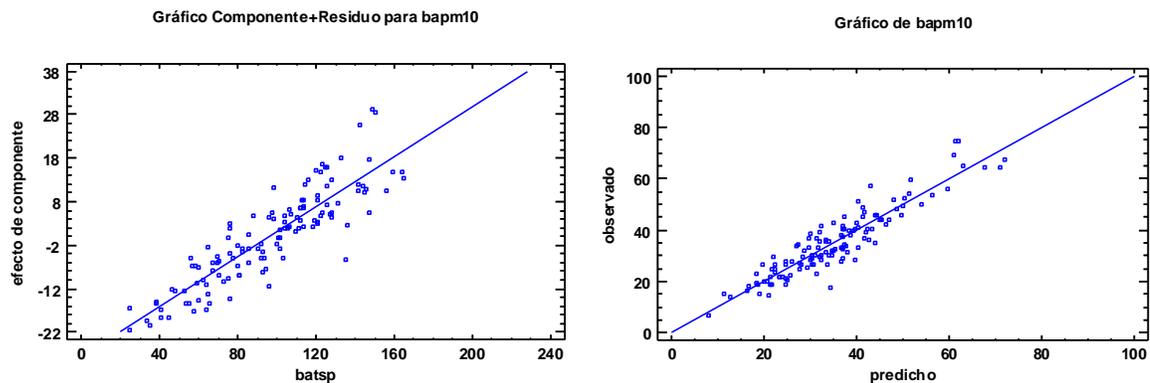


Figura 20. Gráfico NOVA para contaminante PM₁₀ (bapm₁₀)

Como resultado de la regresión lineal y de acuerdo con el modelo creado por cada contaminante en la estación de Barrancas, estos modelos explican las tendencias con un intervalo de confianza del 95% en cuanto a la predicción estadística del crecimiento lineal de los contaminantes analizados, teniendo en cuenta las correlaciones o asociaciones anteriormente descritas (sección 4.1.2), se hace coherente el modelo, ya que las variables de causalidad son las identificadas en dichas correlaciones.

Por lo anterior se puede inferir que la estación de Barrancas tiene una alta probabilidad de influencia por la velocidad de vientos que incide en la zona de explotación del Cerrejón, monitoreada como velocidad de viento en la estación de fondo; así mismo se identifica relación de las concentraciones de TSP de la estación Provincial, el cual representa un crecimiento del 0.30 de la concentración de TSP y PM₁₀ de la estación de Barrancas.

- Las Casitas

En las siguientes Tablas se presenta los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la concentración de TSP de Las Casitas (catsp) y 19 variables independientes, dando como modelo la ecuación:

$$\text{catsp} = 42,5751 + 1,78555 \cdot \text{capm10} + 0,557472 \cdot \text{patsp} - 0,963112 \cdot \text{papm10} + 0,284236 \cdot \text{protsp} + 6,56509 \cdot \text{prows} - 0,647243 \cdot \text{syspm10} - 15,0928 \cdot \text{sysws} - 0,313805 \cdot \text{syswd}$$

Tabla 14. Modelo de regresión para la concentración de TSP de la estación Las Casitas

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico T	Valor-P
		Estándar			
CONSTANTE	42,5751	14,7111		2,89408	0,0045
capm10	1,78555	0,159251		11,2122	0,0000
patsp	0,557472	0,110679		5,03685	0,0000
papm10	-0,963112	0,333786		-2,88541	0,0047
protsp	0,284236	0,067819		4,1911	0,0001
prows	6,56509	2,78808		2,3547	0,0202
syspm10	-0,647243	0,254051		-2,54769	0,0121
sysws	-15,0928	3,23417		-4,66665	0,0000
syswd	-0,313805	0,0994044		-3,15685	0,0020

Fuente: Propia

Tabla 15. Análisis de Varianza para la concentración de TSP de la estación Las Casitas

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	234105,	8	29263,1	52,02	0,0000
Residuo	65815,7	117	562,528		
Total (Corr.)	299920,	125			

Fuente: Propia

R-cuadrada = 78,0556 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 76,5551 porciento

Error estándar del est. = 23,7177

Error absoluto medio = 17,8173

Estadístico Durbin-Watson = 1,87145 (P=0,2364)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0602945

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 78,0556% de la variabilidad en catsp. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 76,5551%. El error estándar del estimado muestra que la

desviación estándar de los residuos es 23,7177. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, El error absoluto medio (MAE) de 17,8173 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

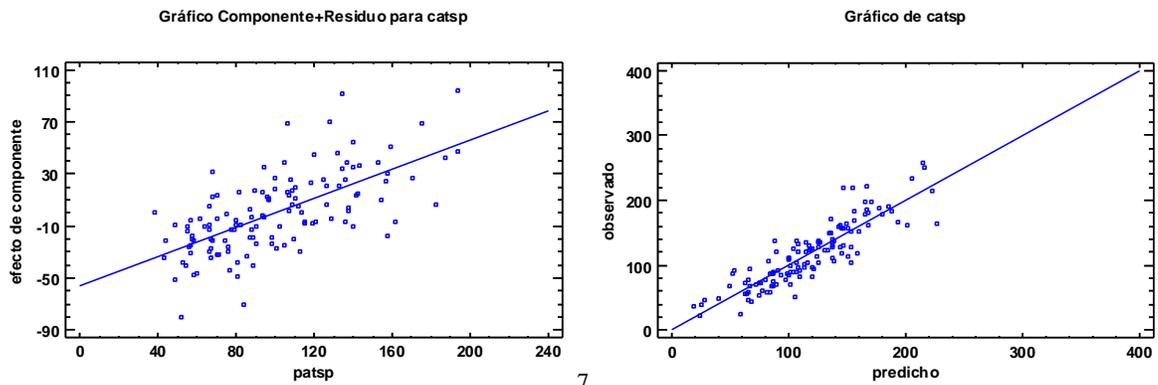


Figura 21. Gráfico NOVA para contaminante TSP (catsp)

PM₁₀ Las Casitas

En la Tabla 16 y 17 se presenta los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la concentración de PM₁₀ de Las Casitas (caPM₁₀) y 19 variables independientes, dando como modelo la ecuación:

$$\text{capm10} = 4,00922 - 0,206996 \cdot \text{batsp} + 0,462534 \cdot \text{bapm10} + 0,259272 \cdot \text{catsp} + 2,33765 \cdot \text{paws} + 0,26683 \cdot \text{syspm10}$$

Tabla 16. Modelo de regresión para la concentración de PM₁₀ de la estación Las Casitas

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	4,00922	3,11604	1,28664	0,2007
batsp	-0,206996	0,0407917	-5,07447	0,0000
bapm10	0,462534	0,113979	4,05807	0,0001
catsp	0,259272	0,0185919	13,9454	0,0000
paws	2,33765	0,881791	2,65103	0,0091
syspm10	0,26683	0,0880462	3,03057	0,0030

Fuente: Propia

Tabla 17. Análisis de Varianza para la concentración de PM₁₀ de la estación Las Casitas

Fuente	Suma	de	Gl	Cuadrado	Razón-F	Valor-P
--------	------	----	----	----------	---------	---------

	Cuadrados		Medio		
Modelo	22875,1	5	4575,02	55,76	0,0000
Residuo	9844,95	120	82,0412		
Total (Corr.)	32720,1	125			

Fuente: Propia

R-cuadrada = 69,9116 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 68,6579 por ciento
Error estándar del est. = 9,05766
Error absoluto medio = 6,33145
Estadístico Durbin-Watson = 1,8523 (P=0,2046)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0731501

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 69,9116% de la variabilidad en capm10. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 68,6579%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 9,05766. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones,

El error absoluto medio (MAE) de 6,33145 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

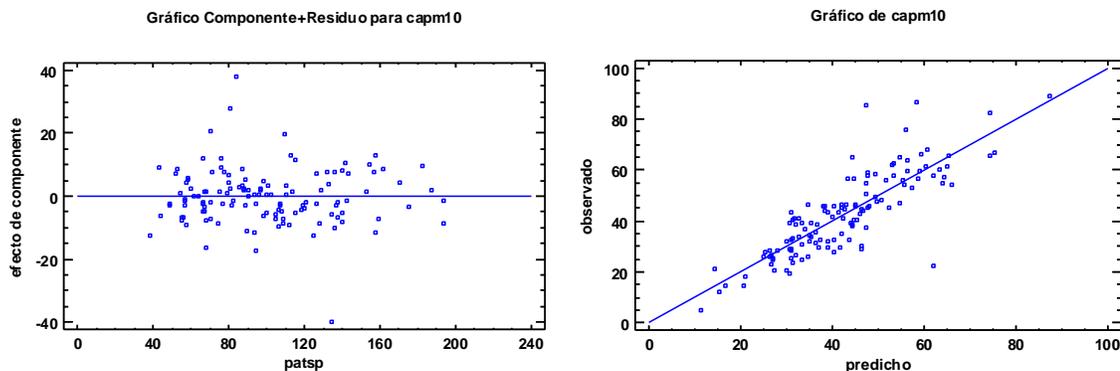


Figura 22. Gráfico NOVA para contaminante PM_{10} ($capm_{10}$)

Teniendo en cuenta el modelo de las concentraciones de TSP para la estación Las casitas, presenta una tendencia ascendente con las concentraciones de TSP en una relación de 0.28 y 6.56 de la velocidad de viento de la estación Provincial, pero presenta una tendencia descendente a la velocidad y dirección del

viento de la estación Sol y Sombra, lo cual se puede inferir que la estación de las Casitas es impactada por la dinámica de la morfología y geología formada por la actividad minera. Y guarda relación ya que, si las partículas entran con mayor velocidad y dependiendo de la dirección de los vientos y ayudado por procesos de transporte y dispersión de la atmosfera, garantizan que la partícula sea aerotransportada aumente el tiempo de resuspensión en la atmosfera, impactando a un mayor radio.

- Provincial

En las Tablas 18 y 19 se presenta los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la concentración de TSP de la estación Provincial (protsp) y 19 variables independientes, dando como modelo la ecuación:

$$\text{protsp} = -4,37543 + 0,804031 \cdot \text{batsp} - 1,78092 \cdot \text{bapm10} + 0,13894 \cdot \text{catsp} - 11,7814 \cdot \text{caws} - 16,1512 \cdot \text{paws} + 2,12866 \cdot \text{propm10} + 8,59122 \cdot \text{prows} + 19,8422 \cdot \text{sysws}$$

Tabla 18. Modelo de regresión para la concentración de TSP de la estación Provincial

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico	
		Estándar	T	Valor-P	
CONSTANTE	-4,37543	6,57518	-0,665447	0,5071	
batsp	0,804031	0,0957423	8,39787	0,0000	
bapm10	-1,78092	0,224577	-7,93013	0,0000	
catsp	0,13894	0,0398941	3,48271	0,0007	
caws	-11,7814	4,05874	-2,90273	0,0044	
paws	-16,1512	5,72684	-2,82026	0,0056	
propm10	2,12866	0,19532	10,8983	0,0000	
prows	8,59122	2,8434	3,02146	0,0031	
sysws	19,8422	6,9054	2,87343	0,0048	

Fuente: Propia

Tabla 19. Análisis de Varianza para la concentración de TSP de la estación Provincial

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	179113,	8	22389,1	68,64	0,0000
Residuo	38165,8	117	326,203		
Total (Corr.)	217279,	125			

Fuente: Propia

R-cuadrada = 82,4346 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 81,2336 por ciento
 Error estándar del est. = 18,0611
 Error absoluto medio = 13,4357
 Estadístico Durbin-Watson = 1,96633 (P=0,4255)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,00884333

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 82,4346% de la variabilidad en protsp. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 81,2336%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 18,0611. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, El error absoluto medio (MAE) de 13,4357 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

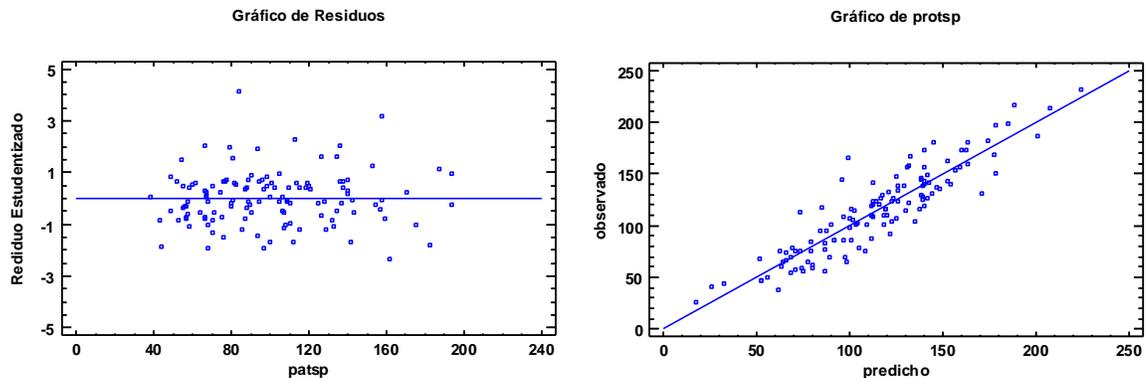


Figura 23. Gráfico NOVA para contaminante TSP (protsp)

PM₁₀ Provincial

En la Tabla 20 y 21 se presenta los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la concentración de PM₁₀ de Provincial (proPM₁₀) y 19 variables independientes, dando como modelo la ecuación:

$$\text{propm10} = 1,69525 - 0,125507 \cdot \text{batsp} + 0,557661 \cdot \text{bapm10} + 3,19081 \cdot \text{caws} + 4,74723 \cdot \text{paws} + 0,222021 \cdot \text{protsp} - 2,57123 \cdot \text{prows} + 0,224841 \cdot \text{syspm10} - 5,06018 \cdot \text{sysws}$$

Tabla 20. Modelo de regresión para la concentración de PM₁₀ de la estación Provincial

		Error	Estadístico	
--	--	-------	-------------	--

Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	1,69525	1,99424	0,850075	0,3970
batsp	-0,125507	0,0362425	-3,46298	0,0007
bapm10	0,557661	0,0749741	7,43805	0,0000
caws	3,19081	1,2878	2,47772	0,0147
paws	4,74723	1,78432	2,66053	0,0089
protsp	0,222021	0,0191201	11,6119	0,0000
prows	-2,57123	0,893904	-2,87641	0,0048
syspm10	0,224841	0,0564984	3,97959	0,0001
sysws	-5,06018	2,1642	-2,33813	0,0211

Fuente: Propia

Tabla 21. Análisis de Varianza para la concentración de PM10 de la estación Provincial

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	20478,4	8	2559,81	79,78	0,0000
Residuo	3754,26	117	32,0877		
Total (Corr.)	24232,7	125			

Fuente: Propia

R-cuadrada = 84,5075 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 83,4482 por ciento

Error estándar del est. = 5,6646

Error absoluto medio = 3,9743

Estadístico Durbin-Watson = 1,92868 (P=0,3453)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0225778

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 84,5075% de la variabilidad en propm10. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 83,4482%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 5,6646. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, El error absoluto medio (MAE) de 3,9743 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

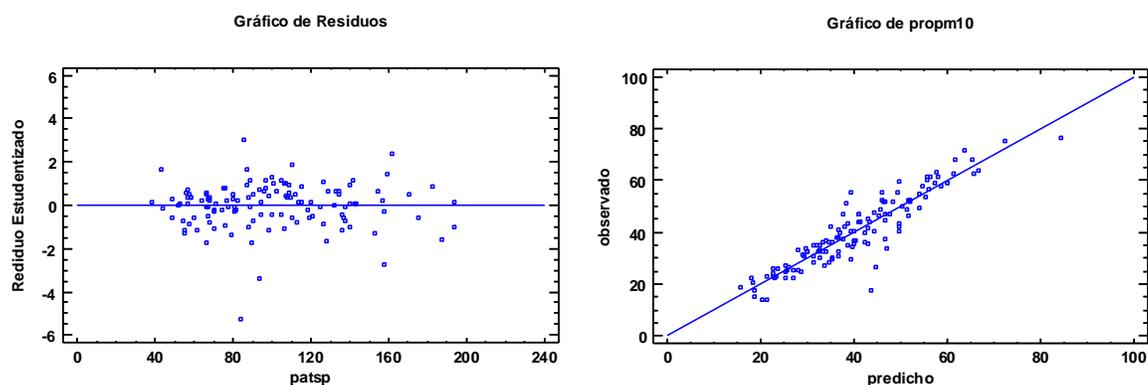


Figura 24. Gráfico NOVA para contaminante PM₁₀ (*propm₁₀*)

En el modelo de la estación de Provincial se destaca la tendencia líneas ascendente para las velocidades de viento de las estaciones Sol y Sombra y Patilla y como era de esperar una tendencia con TSP de la estación de Barrancas.

- Sol y Sombra

En las Tablas 22 y 23 se presenta los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la concentración de TSP de la estación Sol y Sombra (*systsp*) y 19 variables independientes, dando como modelo la ecuación:

$$\text{systsp} = 3,19967 - 3,78653 \cdot \text{caws} - 8,12724 \cdot \text{paws} + 0,319761 \cdot \text{pawd} + 0,111398 \cdot \text{prowd} + 1,30362 \cdot \text{syspm10} + 12,5996 \cdot \text{sysws} - 0,363873 \cdot \text{syswd}$$

Tabla 22. Modelo de regresión para la concentración de TSP de la estación Sol y Sombra

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	3,19967	6,27243	0,510117	0,6109
caws	-3,78653	1,67148	-2,26538	0,0253
paws	-8,12724	3,51989	-2,30895	0,0227
pawd	0,319761	0,112914	2,83189	0,0054
prowd	0,111398	0,037939	2,93623	0,0040
syspm10	1,30362	0,0866182	15,0502	0,0000
sysws	12,5996	4,4872	2,80789	0,0058
syswd	-0,363873	0,131079	-2,77599	0,0064

Fuente: Propia

Tabla 23. Análisis de Varianza para la concentración de TSP de la estación Sol y Sombra

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
--------	-------------------	-------	----------------	---------	---------

Modelo	44353,2	7	6336,17	49,33	0,0000
Residuo	15156,3	118	128,443		
Total (Corr.)	59509,5	125			

Fuente: Propia

R-cuadrada = 74,5313 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 73,0204 por ciento
Error estándar del est. = 11,3333
Error absoluto medio = 7,4261
Estadístico Durbin-Watson = 1,94086 (P=0,3707)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0295025

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 74,5313% de la variabilidad en systsp. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 73,0204%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 11,3333. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, El error absoluto medio (MAE) de 7,4261 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

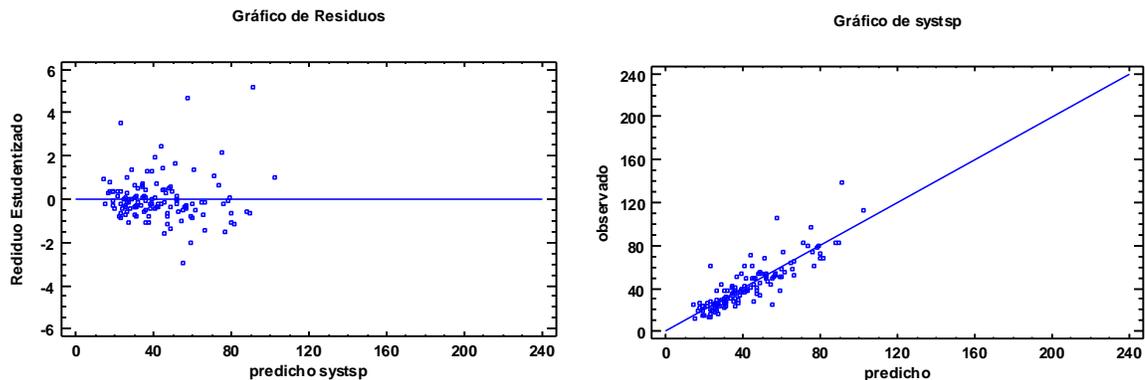


Figura 25. Gráfico NOVA para contaminante TSP (systsp)

PM₁₀ Sol y Sombra

En la Tabla 24 y 25 se presenta los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la concentración de PM₁₀ de

Sol y Sombra (sysPM₁₀) y 19 variables independientes, dando como modelo la ecuación:

$$\text{syspm}_{10} = 6,52942 + 0,0784624 \cdot \text{batsp} - 0,0528273 \cdot \text{catsp} + 0,143429 \cdot \text{capm}_{10} - 0,0832151 \cdot \text{patsp} + 0,369301 \cdot \text{papm}_{10} + 5,53358 \cdot \text{paws} - 0,0647579 \cdot \text{pawd} + 0,349817 \cdot \text{systsp} - 7,21964 \cdot \text{sysws}$$

Tabla 24. Modelo de regresión para la concentración de PM₁₀ de la estación Sol y Sombra

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	6,52942	4,07704	1,60151	0,1120
batsp	0,0784624	0,022867	3,43124	0,0008
catsp	-0,0528273	0,0208452	-2,53427	0,0126
capm10	0,143429	0,0558091	2,57	0,0114
patsp	-0,0832151	0,0289303	-2,8764	0,0048
papm10	0,369301	0,0782876	4,71724	0,0000
paws	5,53358	1,58422	3,49294	0,0007
pawd	-0,0647579	0,0263543	-2,4572	0,0155
systsp	0,349817	0,0317771	11,0085	0,0000
sysws	-7,21964	1,78076	-4,05426	0,0001

Fuente: Propia

Tabla 25. Análisis de Varianza para la concentración de PM₁₀ de la estación Sol y sombra

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	15395,9	9	1710,66	50,41	0,0000
Residuo	3936,81	116	33,938		
Total (Corr.)	19332,7	125			

Fuente: Propia

R-cuadrada = 79,6365 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 78,0566 por ciento

Error estándar del est. = 5,82563

Error absoluto medio = 4,23126

Estadístico Durbin-Watson = 1,77865 (P=0,1077)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,110331

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 79,6365% de la variabilidad en syspm₁₀. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 78,0566%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 5,82563. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, el error absoluto medio (MAE) de 4,23126 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es

mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

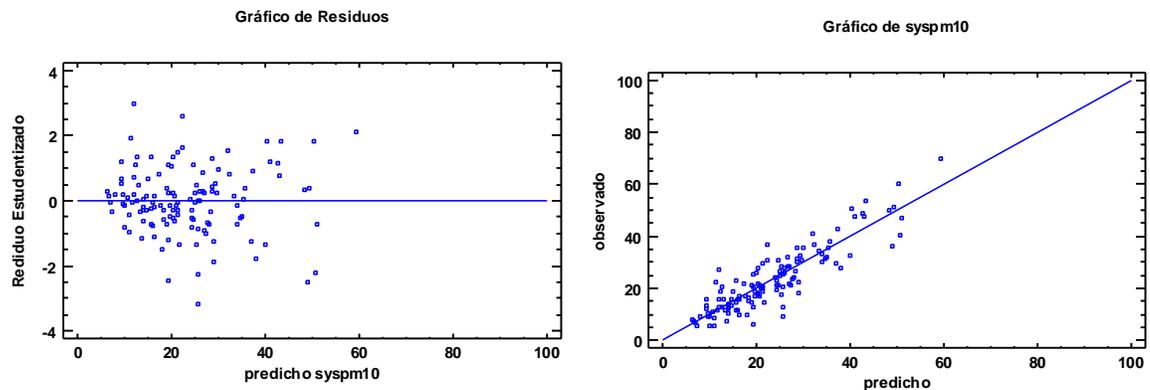


Figura 26. Gráfico NOVA para contaminante PM_{10} ($syspm_{10}$)

De acuerdo con el modelo desarrollad para la estación Sol y Sombra esta tiene una tendencia a las condiciones meteorológicas de la zona y a la generación de las concentraciones de PM_{10} monitorea en la misma estación, lo cual se debe a concentraciones de material particulado de fondo en la lona de estudio.

De acuerdo a los modelos predicho de las contaminación de PM_{10} y TSP se evidencia que guarda una relación con lo analizado en las correlaciones y es ratificado en las tendencias de cada modelo descrito, así mismo su nivel de confianza mayor al 95% hacen de ellos que la predicción sea confiable estadísticamente y da evidencias de cómo es la tendencia de la distribución de la contaminación por material particulado en la zona de estudio, lo que se infiere que las estaciones de Provincial y Las Casitas tiene tendencia significativa y marcada por la actividad minera de la zona.

Así mismo, se evidencia que la estación de Sol y Sombra en cuanto a las concentraciones de PM_{10} está influenciada por los cambios de dirección del viento, lo cual hace que por dinámica atmosférica esta estación tenga en su modelo variables de PM_{10} procedentes de otras estaciones.

En cuanto a la estación de Barrancas se evidencia la influencia de las contribuciones de la estación de Provincial reflejado en las tendencias de su modelo de predicción.

5.3 ANÁLISIS DE LAS INTERACCIONES DEL MATERIAL PARTICULADO DE TSP Y PM₁₀ DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE DEL CERREJÓN SELECCIONADAS POR FUNCION PROBABILIDAD CONDICIONADA.

5.3.1 Descripción de las parcelas polares para Pm₁₀

Este análisis se realizó mediante los gráficos polar desarrollados en la herramienta Openair del software de acceso libre R, en la cual se trabajó con las concentraciones de TSP y PM₁₀ medido en las estaciones seleccionada de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón; en términos generales el año que presento mayor concentración de concentraciones de material particulado en la mayoría de las estaciones fue para el año 2015 (Sección 4.1.1.).

Los análisis principales en esta sección se han llevado a cabo utilizando la función de diagrama polar en Openair. Estas son parcelas bivariadas de concentraciones de contaminación que indican cómo las concentraciones de contaminación varían según la velocidad del viento y la dirección del viento. Estas gráficas se calculan usando técnicas estadísticas de suavizado para mostrar una superficie continua. La estación de monitoreo está representada por el origen del gráfico en el centro de la gráfica. Los ángulos muestran la dirección del viento y la distancia desde el origen indica la velocidad del viento.

En la Figura 27 muestra las concentraciones de PM₁₀ trazadas con la velocidad del viento y la dirección en las cuatro (4) estaciones del sistema de vigilancia de calidad de aire (utilizando todos los datos desde el año 2012 y hasta el 2016 de cada sitio). Indica claramente que las concentraciones más altas de PM₁₀ son monitoreadas en condiciones de dirección y velocidad asociadas a la explotación de la mina el Cerrejón. Este análisis deja observar que los valores más altos de la concentración de PM₁₀ en las estaciones se presentan con velocidad aproximados al intervalo de 4 a 5 ms⁻¹, exceptuando la estación Provincial, en la cual se puede observar una influencia de fuentes de contaminación cercana a la estación de monitoreo. Como es de esperarse, ya que la estación queda ubicada en el centro de operaciones minera, de igual forma se observa una fuente muy importante de la dirección Este – Noreste, dirección en la cual se ubican los talleres de la empresa de extracción de carbón Caipa que comparte operaciones con la empresa Cerrejón y además de el tajo Patilla de explotación de la empresa Cerrejón vientos arriba de esa estación.

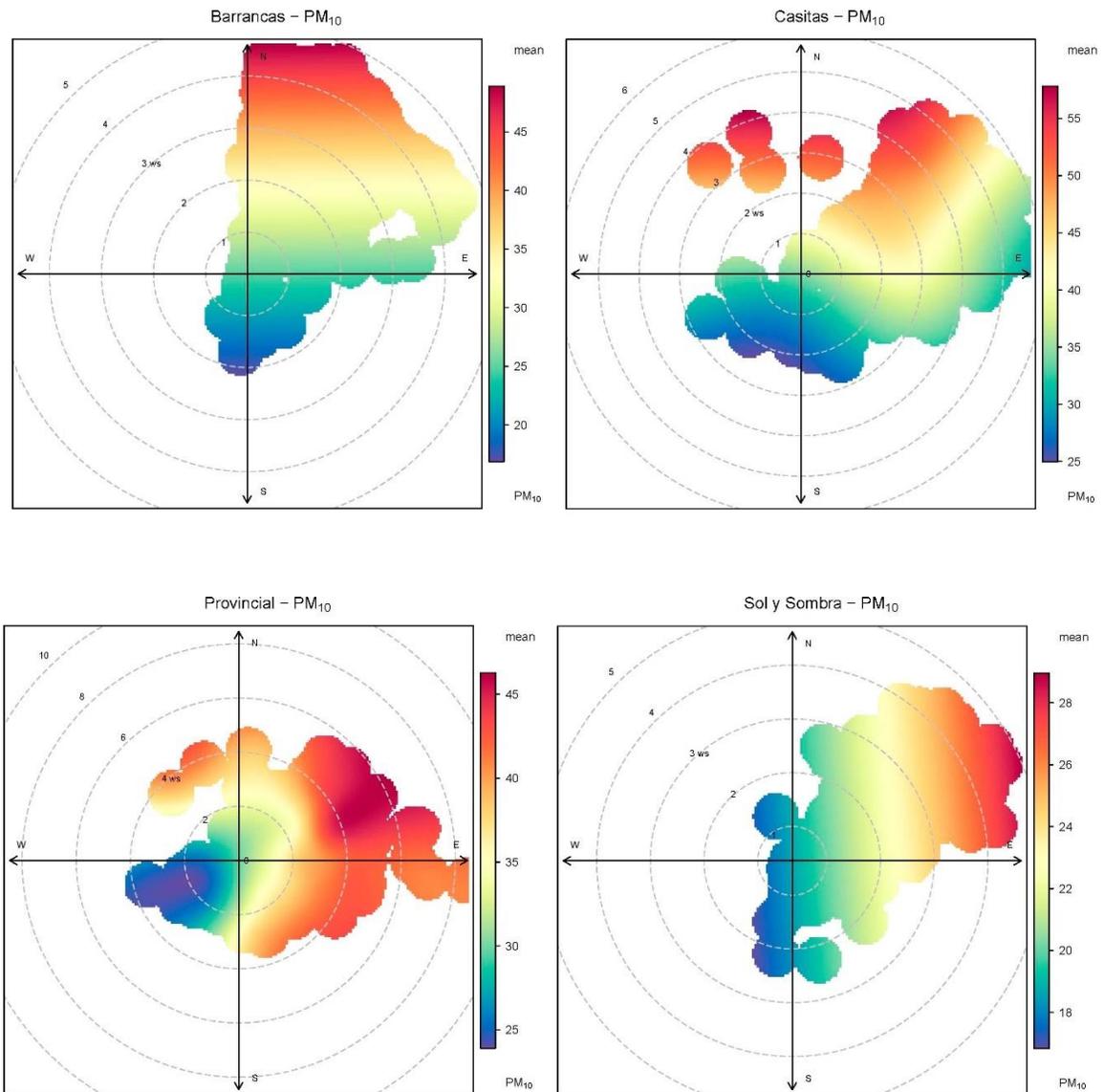


Figura 27. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM₁₀ de las estaciones de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón 2012-2016.

- Provincial

En la Figura 28 muestra que la estación provincial está influenciada por mínimo tres fuentes importantes, así mismo en la Figura 29 se observa por medio de la función de probabilidad bivariada de concentración de contaminación PM₁₀ y clusters de graficas Polares en la cual se representan las participaciones en la superficie polar por fuente identificada para el año 2016. Podemos inferir que esta

estación está siendo impactada probablemente por mínimo 3 fuentes principales que representa las mayores concentraciones del PM_{10} en direcciones Este – Noreste y Este – Sureste y Sur.

Dentro de las 6 particiones identificadas para la construcción de las gráficas polar de la estación Provincial y teniendo en cuenta contribución homogénea de los componentes vectoriales del viento y de la concentración de PM_{10} podemos observar que los clusters 1,2 y 5 en donde se presenta los mayores niveles de contaminación, es muy probable que el origen de esas fuentes o cluster sea por la actividad minera ver figura 30.

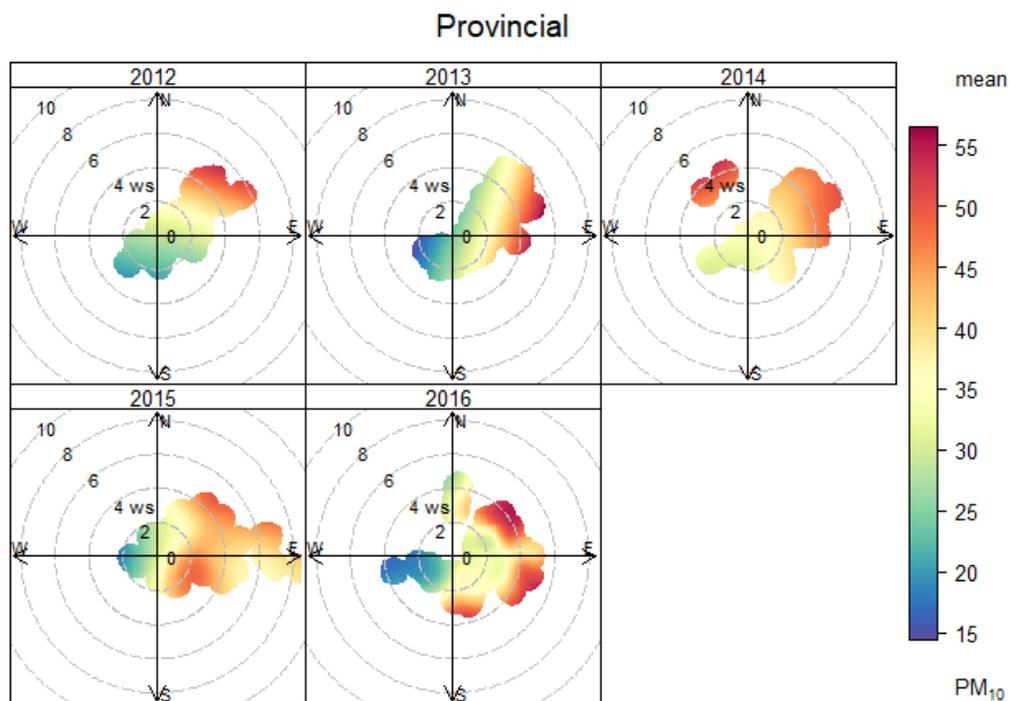


Figura 28. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Provincial para el periodo 2012 – 2016.

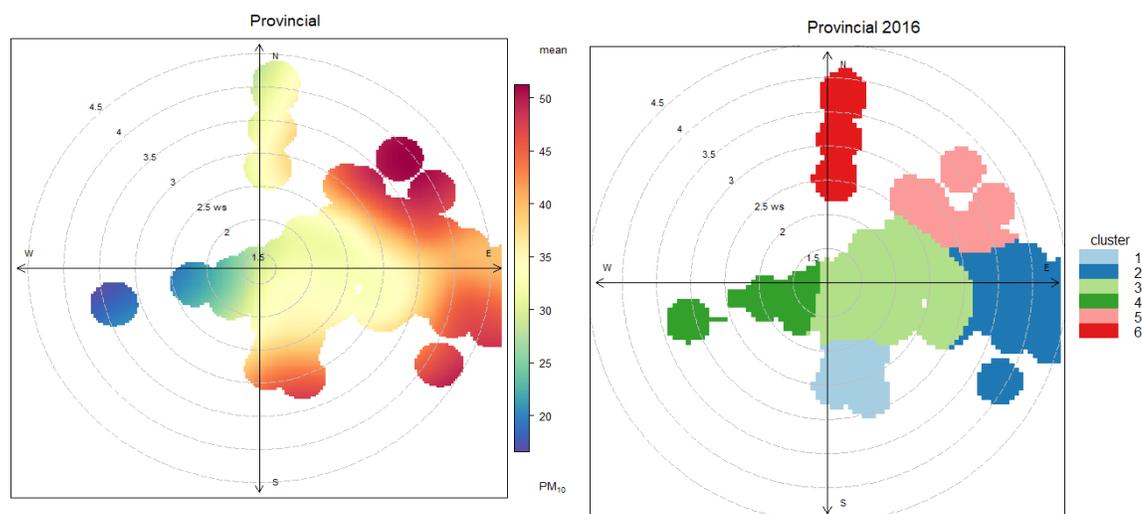


Figura 29. Gráfico Polar de Participaciones de PM_{10} de la estación Provincial para el año 2016.



Figura 30. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Provincial para el periodo 2016 representada en Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.

- Barrancas

Otra estación de interés para la zona es Barrancas, debido a la influencia urbana y posible relación a la afectación a la salud de la población del casco urbano por exposición a contaminación atmosférica como el material particulado, se observa en la Figura 27 que las concentraciones tienen como origen de la fuente la dirección del Norte, así mismo en la Figura 31. Se muestra que para el último año estudiado 2016, presenta una distribución de las fuentes que impacta a esta estación con direcciones Norte, Norte – Noreste y Sur – Sureste.

En la Figura 32 se evidencia 6 participaciones de las cuales podemos inferir que la participación número 1, es una fuente cercana a la estación ya que se presenta concentraciones mayores con velocidades menores a 1 m/s. lo cual

concuenda con actividades desarrollada por terceros en el predio de instalación de la estación ver anexo 5; la participación o clusters 4 posiblemente representa una fuente de agricultura o semi urbana, ya que en esa dirección se evidencias actividades agrícolas y la ubicación de asentamiento de la población llamado Papayal.

En la Figura 33 se evidencia que la estación Barrancas no presenta una influencia directa de la actividad minera del Cerrejón; pero cabe destacar que por los procesos dinámicos de la atmosfera como son el transporte y dispersión de los contaminantes recibe de la estación Provincial aporte de contaminante de material particulado, lo cual es explicado por la Figura 32, además se observa una mayor concentración de PM_{10} con dirección Noreste, la cual es la dirección que predomina en la rosa de viento para casi todas las estaciones de la zona de estudio; es importante en la estación de Barrancas ya que en esa dirección se encuentra ubicado la estación Provincial y de acuerdo con el modelo de regresión lineal múltiple, esta es impactada por las variables monitoreadas en la estación Provincial.

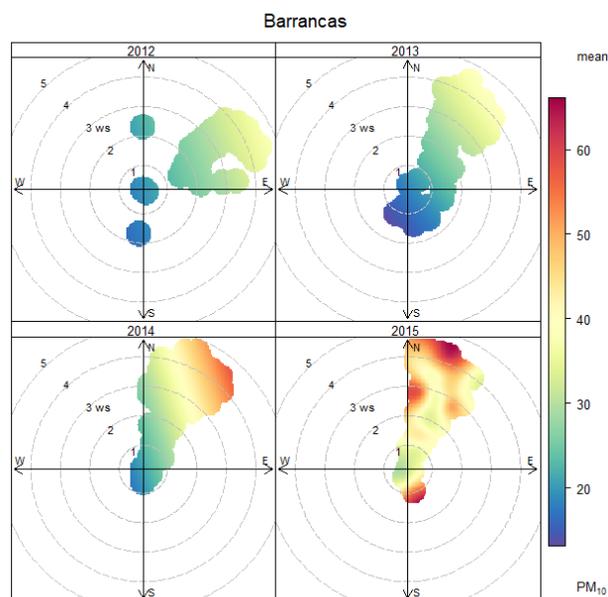


Figura 31. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Barrancas para el periodo 2012 – 2016.

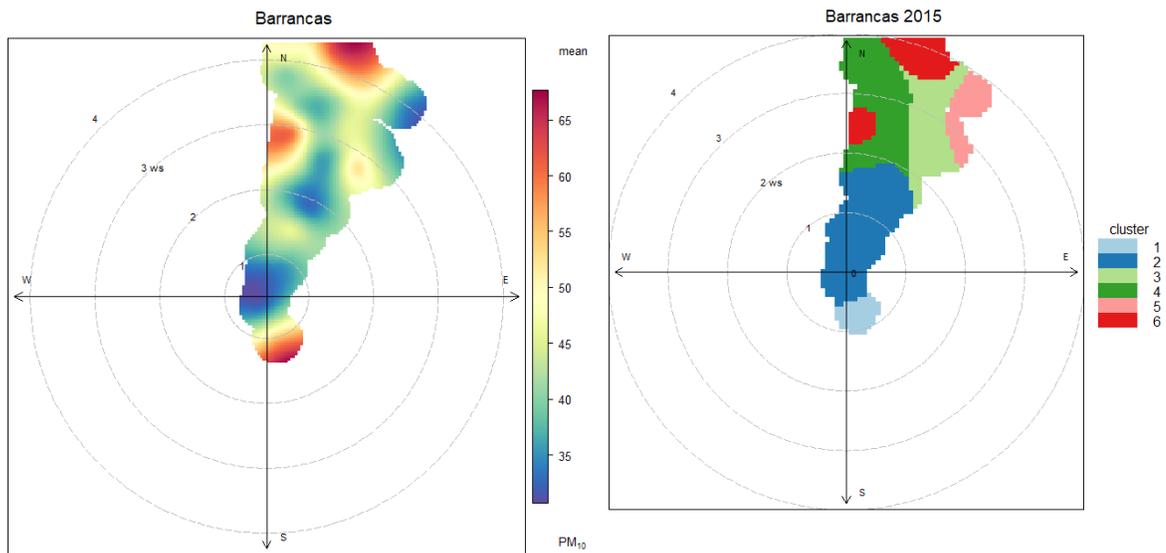


Figura 32. Gráfico Polar de Participaciones de PM_{10} de la estación Barrancas para el año 2016.

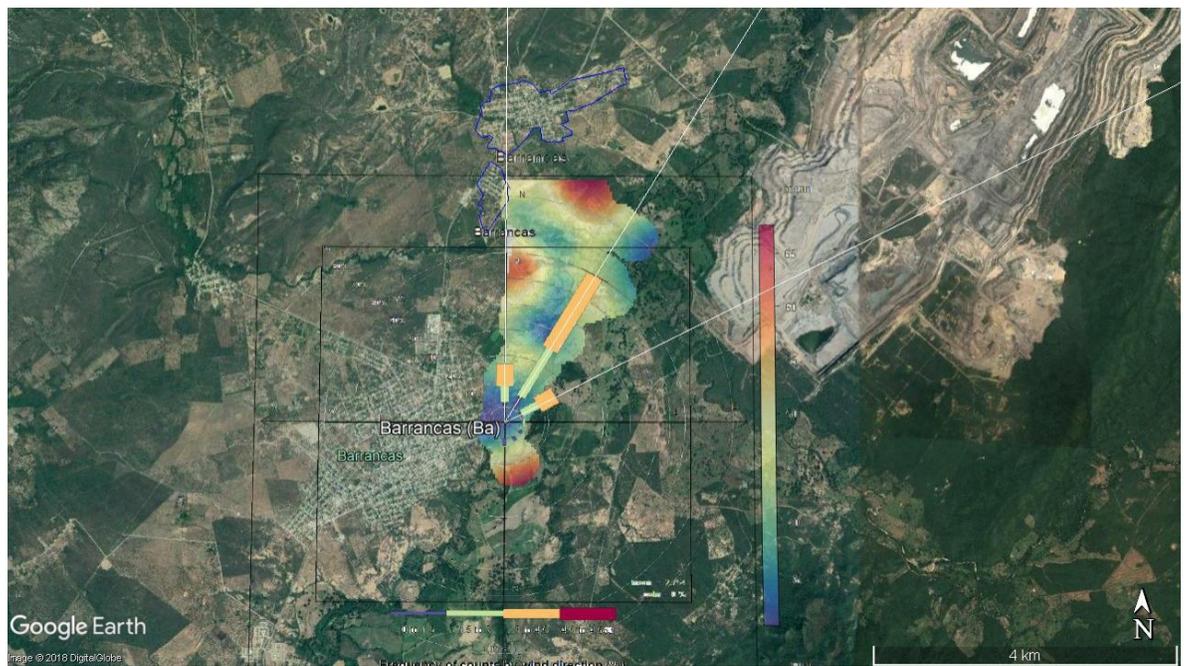


Figura 33. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Barrancas para el periodo 2016 representada en Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.

- Las Casitas

Por otra parte, la estación de Las casitas presenta un gráfico polar de probabilidad condicional de PM₁₀, en el cual se evidencia que solo está influenciada por una parte de fuente local y la otra por dispersión y representatividad es influenciada por la actividad de explotación minera del Cerrejón. En un menor grado con concentraciones menores de material particulado otra posible fuente es por la agricultura desarrollada en la zona de influencia de la estación como se muestra en la Figura 35.

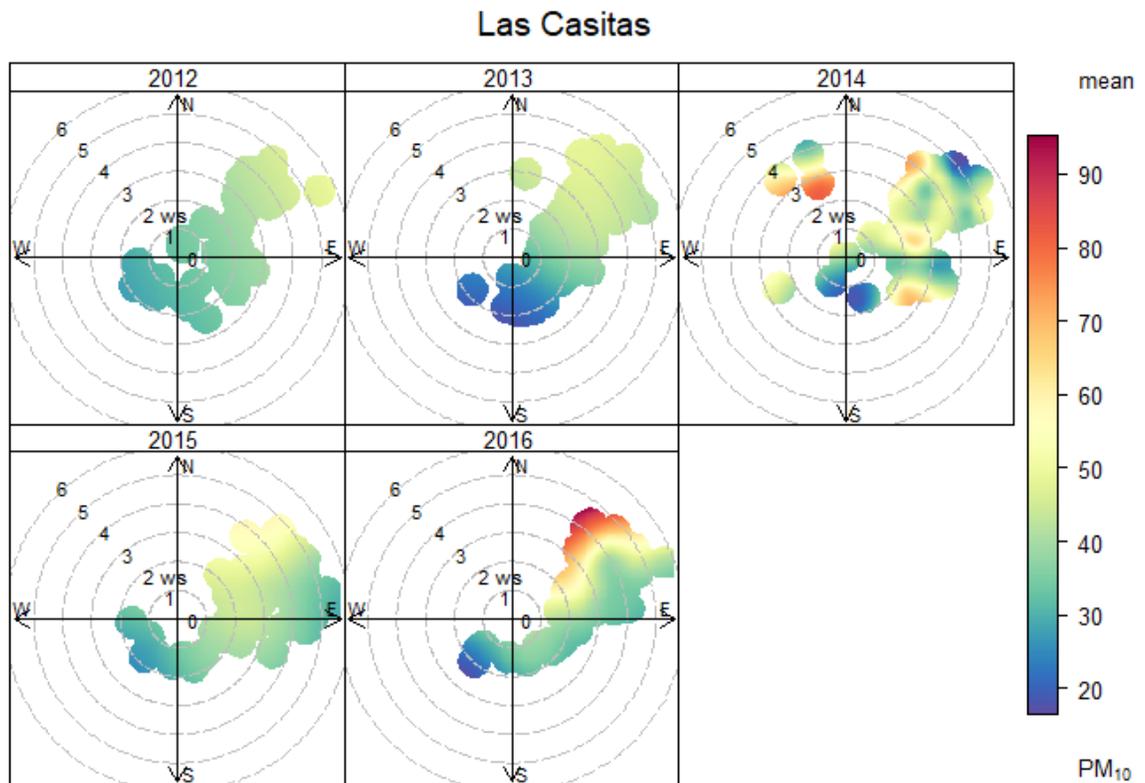


Figura 34. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM₁₀ de la estación Las Casitas para el periodo 2012 – 2016.

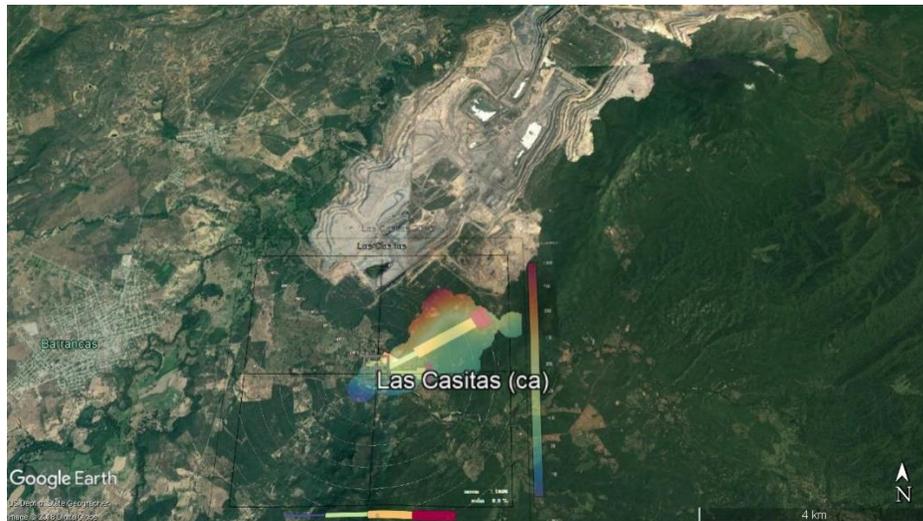


Figura 35. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM_{10} de la estación Las Casitas para el periodo 2016 representada en Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.

- Sol y Sombra

Comportamiento similar presenta la estación Sol y Sombra, en cuanto a la fuente que influye en de origen de tráfico, la vía que conduce a la vereda El Remedio. Para el año 2015 se elevaron las concentraciones monitoreadas debido a la pavimentación de la vía que conduce a la vereda El Remedio por parte de la Gobernación de La Guajira. (Figura 36 y 37)

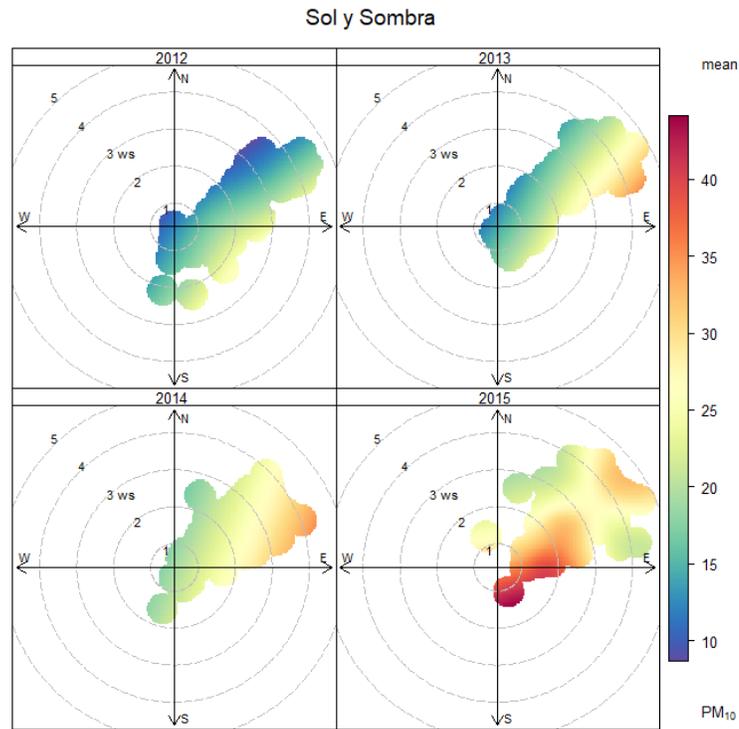


Figura 36. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM₁₀ de la estación Sol y Sombra para el periodo 2012 – 2016.



Figura 37. Gráfico polar de probabilidad condicional de PM₁₀ de la estación Sol y Sombra para el periodo 2016 representada en Google Earth versión 7.3.2.5491, 20-05-2018.

5.3.2 Descripción de las parcelas polares para TSP

En cuanto a los grafico polar de probabilidad condicional de TSP de las estaciones de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón 2012-2016. No muestra ninguna variabilidad de fuentes por estación, y la influencia de que muestra de las concentraciones del contaminante es por la actividad minera, debido a la distribución homogénea (Figura 38).

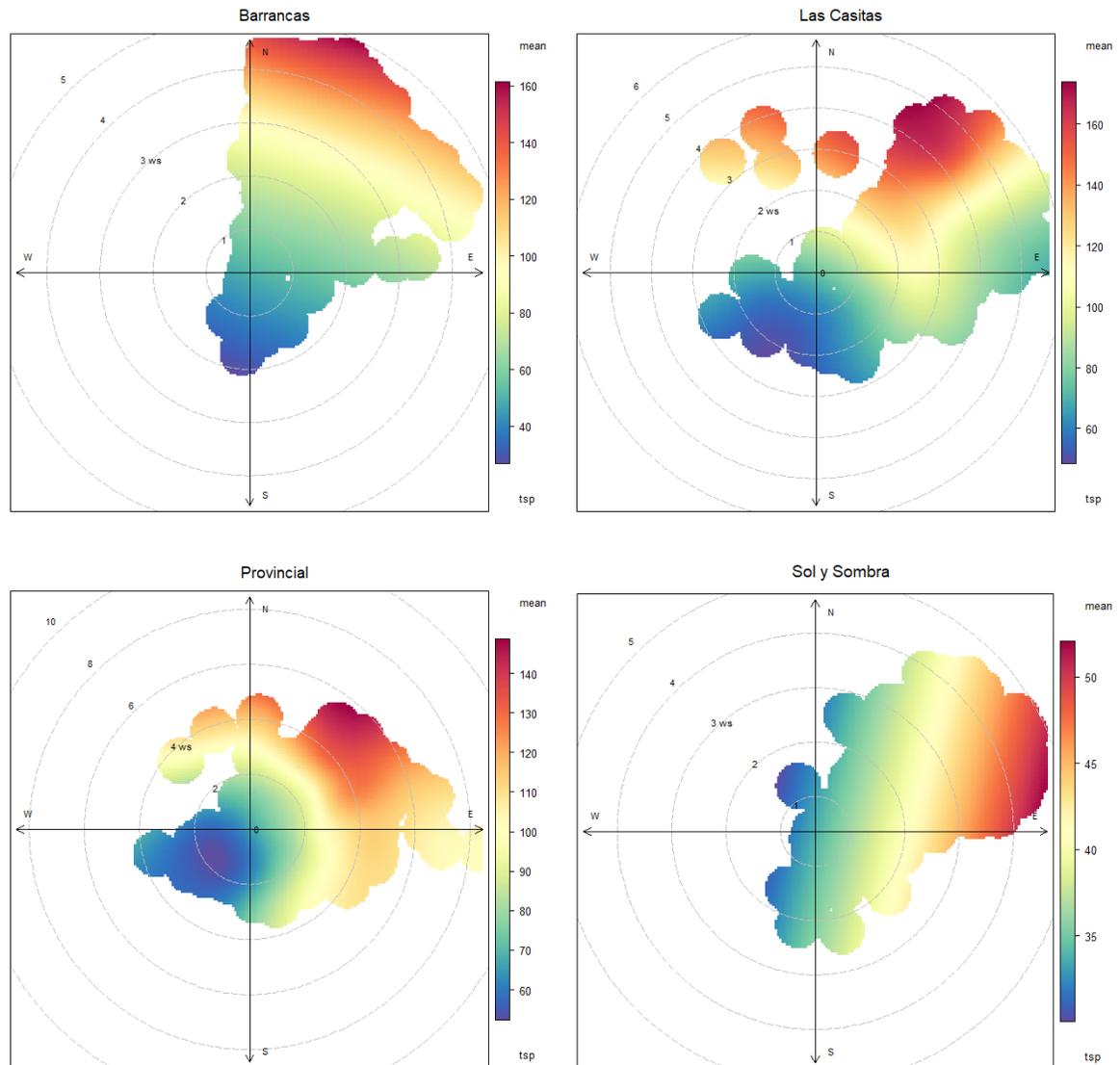


Figura 38. Gráfico polar de probabilidad condicional de TSP de las estaciones de la red de monitoreo de calidad de aire del Cerrejón 2012-2016.

5.4 ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL MATERIAL APRTICULADO PM₁₀

Los resultados de los 41 elementos químicos tales como (Li, Be, Na, Mg, Al, K, Ca, Cr, V, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, Ga, As, Se, Sr, Rb, Mo, Cd, Ag, In, Sb, Ba, Cs, Hg, Tl, Pb, Bi, U, NH₄, NO₃, PO₄ y SO₄) en las 148 muestras recolectadas con los equipos modelo TE-6070DV-BL sin escobillas (Brushless), en las cuatro estaciones seleccionadas para este estudio, permitieron analizar las abundancias de componentes químicos en las muestras recolectadas en las estaciones de monitoreo, en la cuales refleja la composición química de las emisiones de las fuentes de contaminación que impactan en cada una de ellas. Esta caracterización de las abundancias de las fracciones químicas medibles analizadas y fraccionada con en la masa de los filtros por cada muestra tomada en la campaña de muestreo. El resultado es una matriz de datos de las fracciones de abundancia de elementos químicos, lo que genera una información relevante en la zona de muestreo sobre perfiles químicos de las fuentes existente en el departamento de La Guajira; el procesamiento de esta información se realizó por medio de análisis estadísticos como es el análisis multivariado por componente Principal APC, el cual arrojo como resultado:

- **Barrancas**

Esta estación presenta como resultado del APC (Tabla 26), una reducción de dimensiones del problema total, expresados en las variables monitoreadas y analizadas en la estación; este análisis expresa una situación que contiene un conjunto de datos habitualmente correlacionados entre sí, reduciéndolo en solo 7 componentes, los cuales explican de acuerdo con su varianza total acumulada el 86.4% de la totalidad de las variables. Lo que refleja que el 86.4% de la dinámica registrada en la estación Barranca es explicado por los siete 7 componentes, teniendo en cuenta que los dos primeros componentes explican el 41.1% y 17.6% respectivamente.

Tabla 26. Matriz de varianza por análisis de componente principal de la estación de Barrancas.

Varianza total explicada		
Componente	Autovalores iniciales	Sumas de extracción de cargas al cuadrado

	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	16,832	41,053	41,053	16,832	41,053	41,053
2	7,228	17,629	58,682	7,228	17,629	58,682
3	3,716	9,064	67,746	3,716	9,064	67,746
4	2,892	7,054	74,800	2,892	7,054	74,800
5	1,943	4,738	79,539	1,943	4,738	79,539
6	1,489	3,631	83,170	1,489	3,631	83,170
7	1,350	3,294	86,463	1,350	3,294	86,463
8	,933	2,276	88,739			
9	,818	1,996	90,735			
10	,657	1,603	92,338			
11	,442	1,077	93,415			
12	,403	,982	94,397			
13	,316	,770	95,167			
14	,279	,681	95,848			
15	,267	,651	96,500			
16	,210	,512	97,012			
17	,193	,471	97,483			
18	,165	,402	97,885			
19	,159	,389	98,274			
20	,142	,345	98,620			
21	,103	,250	98,870			
22	,097	,237	99,106			
23	,066	,160	99,266			
24	,059	,145	99,411			
25	,053	,130	99,541			
26	,047	,115	99,656			
27	,038	,094	99,749			
28	,026	,063	99,812			
29	,018	,045	99,857			
30	,016	,039	99,896			
31	,012	,028	99,924			
32	,008	,020	99,943			
33	,006	,016	99,959			
34	,006	,013	99,972			
35	,004	,009	99,982			
36	,003	,008	99,990			
37	,002	,004	99,994			

38	,001	,003	99,997			
39	,001	,002	99,999			
40	,000	,000	100,000			
41	,000	,000	100,000			

Fuente: propia

Tabla 27. Matriz Resultado del análisis de componente principal de la estación de Barrancas.

Matriz de componente^a

	Componente						
	1	2	3	4	5	6	7
Li	,902						
Be	,924						
Na	,648						
Mg	,846						
Al	,909						
K	,943						
Ca	,834						
Cr		,477	,452		-,413	,358	
V	,896						
Mn	,944						
Fe			,623	,478			
Ni	,914						
Co	,955						
Cu		,729		-,329			
Zn	,388	,810					
Ga	,899						
As	,462	,524					
Se	,392	,673					
Sr	,736					,472	
Rb	,776			-,360			
Mo		,596				,392	-,360
Cd		,535	-,453	,573			
Ag	,535	,602					
In			-,369		,511	,628	
Sb		,739					-,414
Ba		,646	,324		-,426	,317	

Cs	,952						
Hg			,368	-,337	,619		-,323
TI	,392	,852					
Pb	,436	,390	-,454	,625			
Bi		,779	-,343	,399			
U	,915						
Sodium	,669		,529	,380			
NH4		,598	,324	-,332			,549
Patassium	,656		,518	,313			
Magnesium	,702		,532	,359			
Calcium	,795		,358				
Choride	,653	-,312	,357	,383			
NO3	,674		,524		,319		
PO4	-,346	,317	,379	-,371			
SO4	,348	,672	,321				,366

Fuente: propia

De los 7 componentes identificados en el ACP (Tabla 27), se identifica cuales son sus correlaciones y relaciones de ortogonalidad de las series analizadas en la estación como se representa en la Figura 39 y 40.

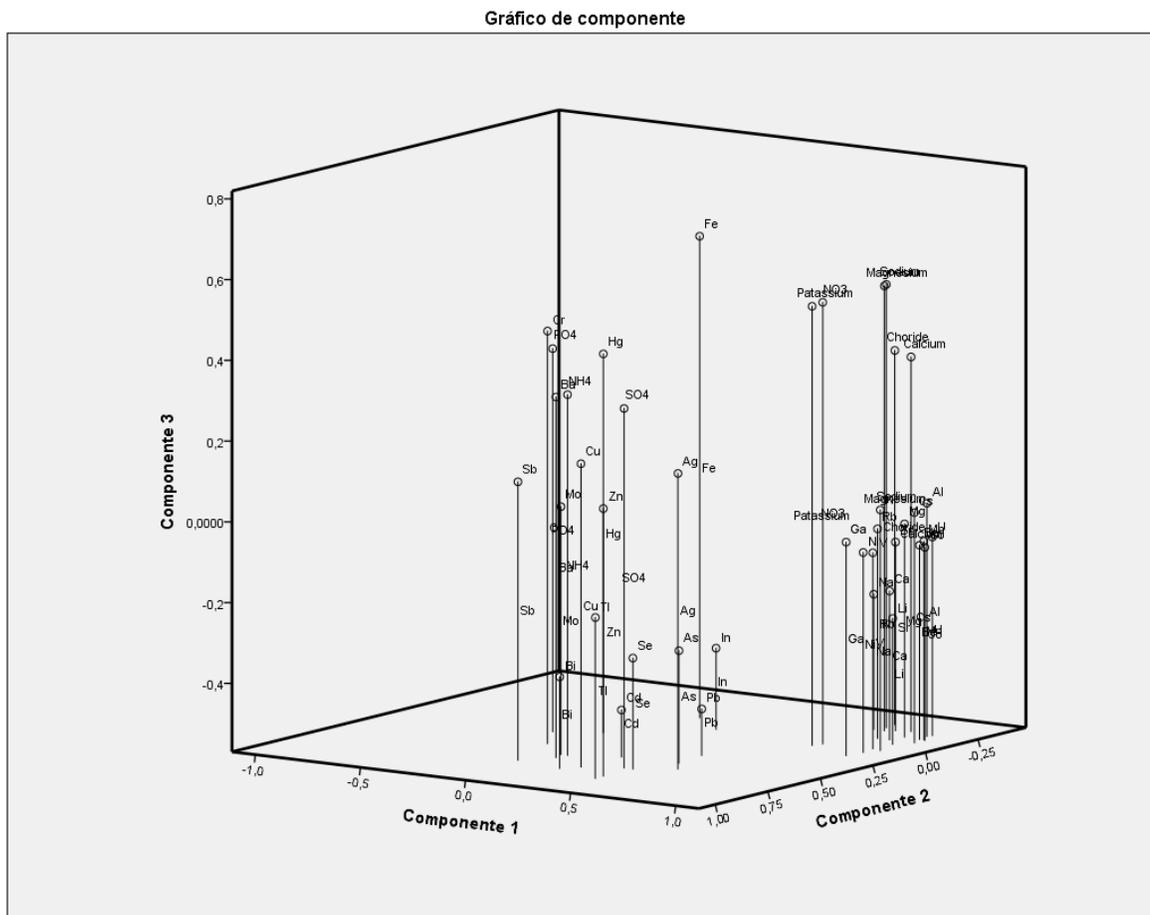


Figura 39. Gráfico de análisis de componente a nivel del suelo Barrancas.

En la Figura 39 de análisis de componente principales a nivel de suelo se ve representado las correlaciones de la especiación química desde los 3 componente donde se evidencia tendencias fuerte de agrupación de variables químicas, teniendo en cuenta la distribución de la influencia que tiene esta estación en la cual se evidenciaba que estaba afectada por fuentes semi urbanas y agrícolas.



Figura 40. Gráfico de análisis de componente por ortogonalidad por componentes pareados de Barrancas.

Para esta estación se identifica dos fuentes marcadas por la especiación química la primera de ella es Polvo de carbón, en el cual se identifican elementos químicos como (EC, OC, Ba, NH₄, Sb) que por revisión bibliográfica los relacionan a esta fuente, así mismo se observa que trazadores de uso de suelo agrícola teniendo o polvo de movimiento de tierra en cuenta el perfil químico de esta fuente por la EPA en su base de datos SPECIATE versión 4.5; en cuanto a los perfiles de PM. En cuanto a la segunda fuente identificada comparten elementos como (Mg, Al,

K y Ca). como última fuente identificada está la de residuos de combustión de camión pesado (Pb,Cd, Se Al).

- **Provincial**

En la Figura 42 se observa que esta estación esta influenciada por polvo de carbón (Ec, Oc, Ba, NH4 y Sb), Quema de madera residencial (Al, Ca, Ec, No3, K y Mg), como se evidencia en el anexo 5; y como ultima fuente se identifica material de corteza (Fe, Ec, Ga, NH4, Al, K y Zn) lo que esta relación concuerda con los datos obtenidos de los análisis anteriormente realizado en las secciones 4.1, 4.2 y 4.3. de acuerdo con la varianza total (Tabla 28), tres componentes explican el 67.5% de la totalidad de los datos, los 6 componentes restantes explican el aproximadamente el 19% restante.

Tabla 28. Matriz de varianza por análisis de componente principal de la estación de Provincial.

Componente	Varianza total explicada					
	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	19,403	40,424	40,424	19,403	40,424	40,424
2	8,195	17,072	57,496	8,195	17,072	57,496
3	4,799	9,998	67,494	4,799	9,998	67,494
4	3,415	7,114	74,609	3,415	7,114	74,609
5	2,418	5,038	79,647	2,418	5,038	79,647
6	1,913	3,986	83,632	1,913	3,986	83,632
7	1,768	3,682	87,315	1,768	3,682	87,315
8	1,401	2,919	90,234	1,401	2,919	90,234
9	,903	1,882	92,116			
10	,749	1,560	93,676			
11	,650	1,355	95,031			
12	,494	1,028	96,059			
13	,429	,895	96,954			
14	,359	,747	97,701			
15	,270	,563	98,264			
16	,203	,423	98,687			
17	,167	,348	99,035			
18	,139	,290	99,325			
19	,093	,195	99,520			
20	,068	,141	99,661			

21	,046	,095	99,756		
22	,044	,091	99,847		
23	,029	,060	99,907		
24	,022	,047	99,954		
25	,013	,028	99,981		
26	,009	,019	100,000		
27	2,057E-15	4,285E-15	100,000		
28	1,351E-15	2,814E-15	100,000		
29	9,653E-16	2,011E-15	100,000		
30	8,653E-16	1,803E-15	100,000		
31	7,408E-16	1,543E-15	100,000		
32	6,563E-16	1,367E-15	100,000		
33	4,613E-16	9,611E-16	100,000		
34	3,303E-16	6,881E-16	100,000		
35	2,224E-16	4,633E-16	100,000		
36	1,578E-16	3,287E-16	100,000		
37	1,183E-16	2,464E-16	100,000		
38	-1,039E-16	-2,165E-16	100,000		
39	-2,023E-16	-4,214E-16	100,000		
40	-2,106E-16	-4,388E-16	100,000		
41	-3,171E-16	-6,606E-16	100,000		
42	-3,731E-16	-7,773E-16	100,000		
43	-5,662E-16	-1,180E-15	100,000		
44	-6,537E-16	-1,362E-15	100,000		
45	-8,370E-16	-1,744E-15	100,000		
46	-9,161E-16	-1,908E-15	100,000		
47	-1,056E-15	-2,199E-15	100,000		
48	-2,832E-15	-5,900E-15	100,000		

Fuente: Propia

Tabla 29. Matriz Resultado del análisis de componente principal de la estación de Provincial

Matriz de coeficiente de puntuación de componente

	Componente							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Li	,045	-,014	-,040	-,009	-,071	,121	,082	-,162
Be	,045	-,035	-,018	-,017	-,105	-,023	,055	,022

Na	,043	-,039	,000	-,011	,034	-,010	,030	-,255
Mg	,018	-,021	,053	,032	-,037	,236	,328	,194
Al	,046	-,008	,030	-,027	-,027	-,149	,125	-,100
K	,048	,000	,025	,027	,099	-,028	,077	,078
Ca	,038	-,014	,002	,021	,002	,229	,212	,089
Cr	,002	,080	,016	,100	-,127	-,239	,043	-,105
V	,046	-,001	,017	-,005	,120	-,036	,026	,045
Mn	,048	-,018	-,008	,018	-,039	,055	-,103	,007
Fe	,008	,020	,120	-,015	-,086	-,306	,163	,251
Ni	,046	,039	-,032	,014	,022	,007	,023	-,105
Co	,049	-,023	,003	-,002	-,032	,026	-,043	-,029
Cu	,031	,074	-,083	,048	-,039	-,035	,006	-,044
Zn	,029	,083	-,061	,028	-,040	,069	,021	-,091
Ga	,047	,014	,011	-,051	,054	-,099	,130	-,070
As	,027	,013	,014	-,203	-,050	-,116	,005	,122
Se	,044	,030	-,048	-,068	,111	-,025	,061	-,048
Sr	,045	-,009	,071	,024	-,056	-,095	,028	,087
Rb	,044	-,013	-,035	-,020	,184	,025	,025	-,088
Mo	,014	,102	-,071	,039	-,098	,000	,028	-,043
Cd	,025	,044	-,050	-,145	,135	,172	-,064	,086
Ag	,019	,033	-,091	,071	-,065	-,038	,014	,135
In	,035	,027	-,085	,019	-,063	,046	-,189	,217
Sb	,027	,020	,009	,060	-,159	-,011	-,272	,315
Ba	,006	,085	-,047	,066	-,144	,054	,004	-,132
Cs	,049	-,015	,001	-,014	-,019	-,049	,083	-,055
Hg	-,017	,057	-,028	,060	,205	,015	,056	,322
Tl	,036	,050	-,049	-,076	,117	-,103	,057	,137
Pb	,040	-,010	,046	-,127	-,110	-,119	-,049	,032
Bi	,030	,071	-,071	-,085	,090	-,015	-,022	,130
U	,016	,091	-,090	,057	-,087	,054	-,002	-,073
Sodium	,034	-,032	,106	,110	,064	-,044	-,049	-,051
NH4	-,002	,023	,096	-,218	-,005	,039	-,169	-,112
Patassium	,031	,024	,062	,124	,108	-,046	-,139	-,125
Magnesium	,037	-,029	,110	,090	,028	,000	-,068	-,048
Calcium	,037	-,007	,087	,057	-,040	,180	-,169	,082
Choride	,038	-,041	,054	,095	-,048	,070	,049	-,006
NO3	,030	,009	,074	,148	,113	,036	-,156	,066
PO4	-,013	,042	,002	,060	,275	-,110	-,044	-,032

SO4	,019	,063	,103	-,109	,005	,061	-,171	-,150
OC1	-,033	,046	,024	,070	,001	-,001	,165	-,090
OC2	-,018	,104	,035	-,022	,028	,026	-,015	-,078
OC3	-,012	,094	,103	,055	,052	,035	,044	-,017
OC4	-,007	,090	,126	,032	,019	,017	,058	,020
EC1	-,002	,092	,112	-,034	-,070	,088	,032	,015
EC2	-,022	,066	,093	-,069	-,010	,038	,043	,020
EC3	-,002	,027	,102	-,077	-,048	,207	,093	,034

Fuente: Propia

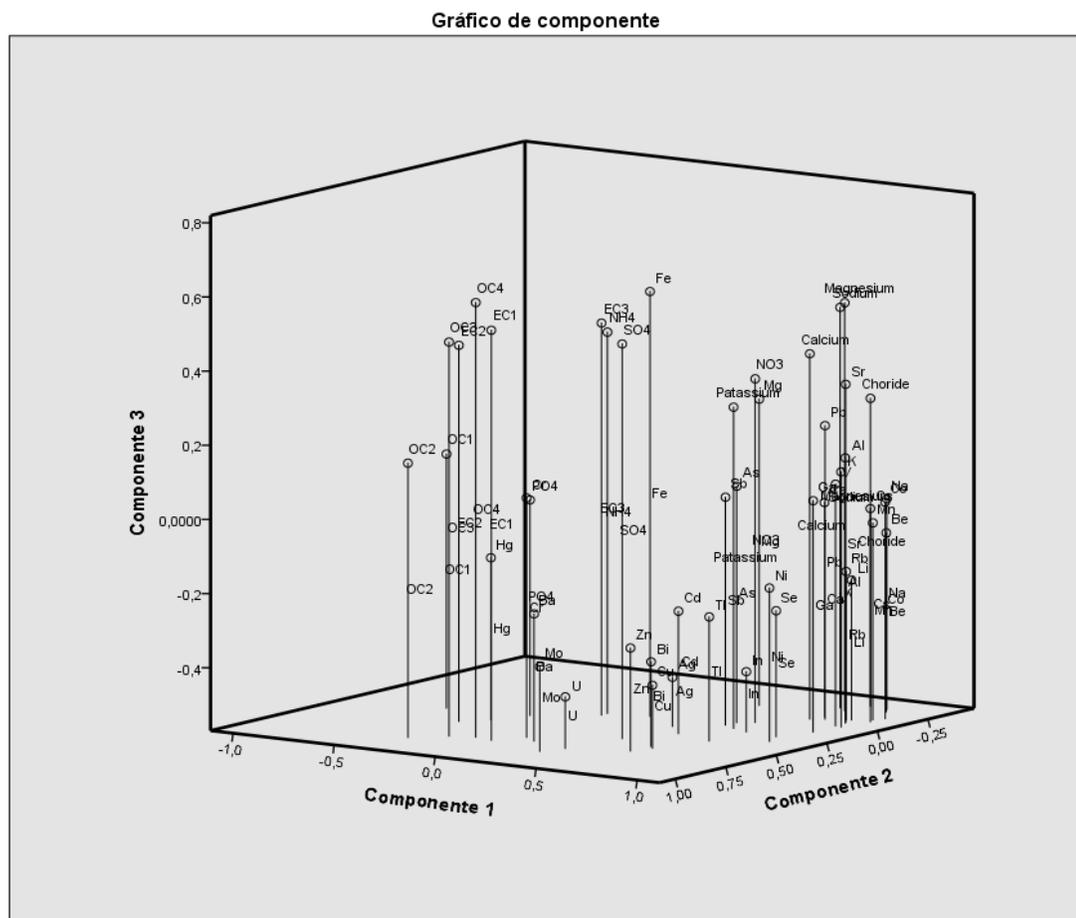


Figura 41. Gráfico de análisis de componente a nivel del suelo de Provincial.

- **Las Casitas**

Como se observa en la Tabla 30 la varianza total explicada de los tres primeros componentes no presenta mucha variabilidad, lo cual sugiere una afectación homogénea por las fuentes de contaminación. Se destaca que las 4 primeras componentes explican aproximadamente el 75.5% del total de los datos.

En cuanto al número elevado de componente principales de esta estaciones (Tabla 30), concuerda por una parte con al análisis de probabilidad condicional del PM₁₀, en el cual presentó concentraciones de dos fuentes posibles de acuerdo a velocidades de vientos registradas en la estación, las fuentes más cernas a la estación se identificó como fuentes locales.

Tabla 30. Matriz de varianza por análisis de componente principal de la estación de Las Casitas

Componente	Varianza total explicada					
	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	16,229	33,810	33,810	16,229	33,810	33,810
2	10,887	22,681	56,491	10,887	22,681	56,491
3	6,114	12,737	69,228	6,114	12,737	69,228
4	2,994	6,237	75,465	2,994	6,237	75,465
5	2,084	4,342	79,807	2,084	4,342	79,807
6	1,783	3,714	83,521	1,783	3,714	83,521
7	1,459	3,040	86,561	1,459	3,040	86,561
8	1,229	2,561	89,121	1,229	2,561	89,121
9	1,175	2,449	91,570	1,175	2,449	91,570
10	,841	1,751	93,321			
11	,687	1,431	94,752			
12	,533	1,110	95,862			
13	,405	,843	96,705			
14	,333	,695	97,400			
15	,256	,534	97,934			
16	,195	,407	98,340			
17	,175	,365	98,705			
18	,140	,291	98,996			
19	,098	,203	99,199			
20	,087	,182	99,381			
21	,067	,139	99,520			
22	,056	,116	99,635			

23	,042	,088	99,724		
24	,036	,075	99,799		
25	,029	,061	99,860		
26	,020	,041	99,901		
27	,018	,038	99,939		
28	,012	,024	99,963		
29	,009	,018	99,981		
30	,005	,010	99,991		
31	,003	,007	99,997		
32	,001	,003	100,000		
33	2,047E-15	4,265E-15	100,000		
34	1,103E-15	2,297E-15	100,000		
35	9,332E-16	1,944E-15	100,000		
36	4,647E-16	9,682E-16	100,000		
37	3,637E-16	7,577E-16	100,000		
38	1,757E-16	3,659E-16	100,000		
39	1,657E-16	3,451E-16	100,000		
40	7,861E-18	1,638E-17	100,000		
41	-8,471E-17	-1,765E-16	100,000		
42	-1,666E-16	-3,471E-16	100,000		
43	-2,622E-16	-5,462E-16	100,000		
44	-4,079E-16	-8,498E-16	100,000		
45	-4,364E-16	-9,091E-16	100,000		
46	-4,405E-16	-9,178E-16	100,000		
47	-8,161E-16	-1,700E-15	100,000		
48	-9,840E-16	-2,050E-15	100,000		

Fuente: Propia

Tabla 31. Matriz Resultado del análisis de componente principal de la estación de Las Casitas

Matriz de componente^a

	Componente								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Li	,755	-,523	,192	,145					-,129
Be	,845	-,390	-,192						-,179
Na	,686	-,595		-,146			,265		,144
Mg	,517		-,114	,251		-,344	-,108	,617	-,232
Al	,881	-,154	-,279			,148			-,166
K	,652	-,245	-,122	,145		-,360	-,368	-,202	,387

Ca	,681	-,375		,152		-,409		,218	,101
Cr		,565	-,447	,323	,412	,187			,179
V	,893		,104	,262	-,127		,224	-,106	
Mn	,843	-,442	-,144						-,187
Fe		,679	-,535	-,260		,247	-,183		
Ni	,903	-,201		,261		,126		-,116	
Co	,833	-,400	-,127				-,288	-,134	
Cu	,315	,349	,746	-,234	,281	-,213			
Zn	,700	,273	,160	,535	,234				
Ga	,937				-,138			-,140	-,160
As	,686	,292	,360	-,203		,193	-,322	,276	
Se	,621	,264	,677		-,137		,111		,102
Sr	,857		-,323	-,111		,207		,127	,157
Rb	,807	-,374		,166	-,153	-,156	,124	-,203	
Mo	,254	,473	,708		,320				,119
Cd	,620		,259	,370	-,448			,130	
Ag	,624	,291	,627	-,163					-,124
In		-,182	,365		-,359	,448	,209	,352	,534
Sb	,289	,561	,637	-,214	,320				
Ba	,182	,375	-,284	,649	,353	,277		,129	
Cs	,914	-,233	-,111			,103		-,136	-,156
Hg		,476	,353	,225	-,424	-,123	,448	-,235	,105
Tl	,666	,313	,637						
Pb	,780			-,105	-,234	,344	-,272	,185	
Bi	,317	,300	,784	-,242	,292		-,115		
U	,113			,707	,553	,258	,175	-,114	,144
Sodium	,624	,225	-,446	-,379	,183		,359		,122
NH4	,297	,578	,113	-,299		,319	-,142	-,302	,105
Potassium	,586		-,279			-,329	-,408	-,181	,494
Magnesium	,665	,268	-,492	-,359	,151		,228		
Calcium	,765	,110	-,492	-,238					
Chloride	,516	-,114	-,346	-,495	,350	-,186	,325		
NO3	,677	,405	-,376	-,153		-,132	,171		,108
PO4		,588		,255		-,451		,161	
SO4	,464	,822			-,146			,106	
OC1		,822			-,171			-,231	-,132
OC2	,101	,926	-,113	,166	-,154	-,133			
OC3		,910	-,253	,127		-,101			

OC4		,935	-,225					
EC1	,115	,926	-,221		-,165			
EC2		,921	-,264					
EC3	,105	,563	-,298	-,124	-,241	,151		-,105

Fuente: Propia

Gráfico de componente

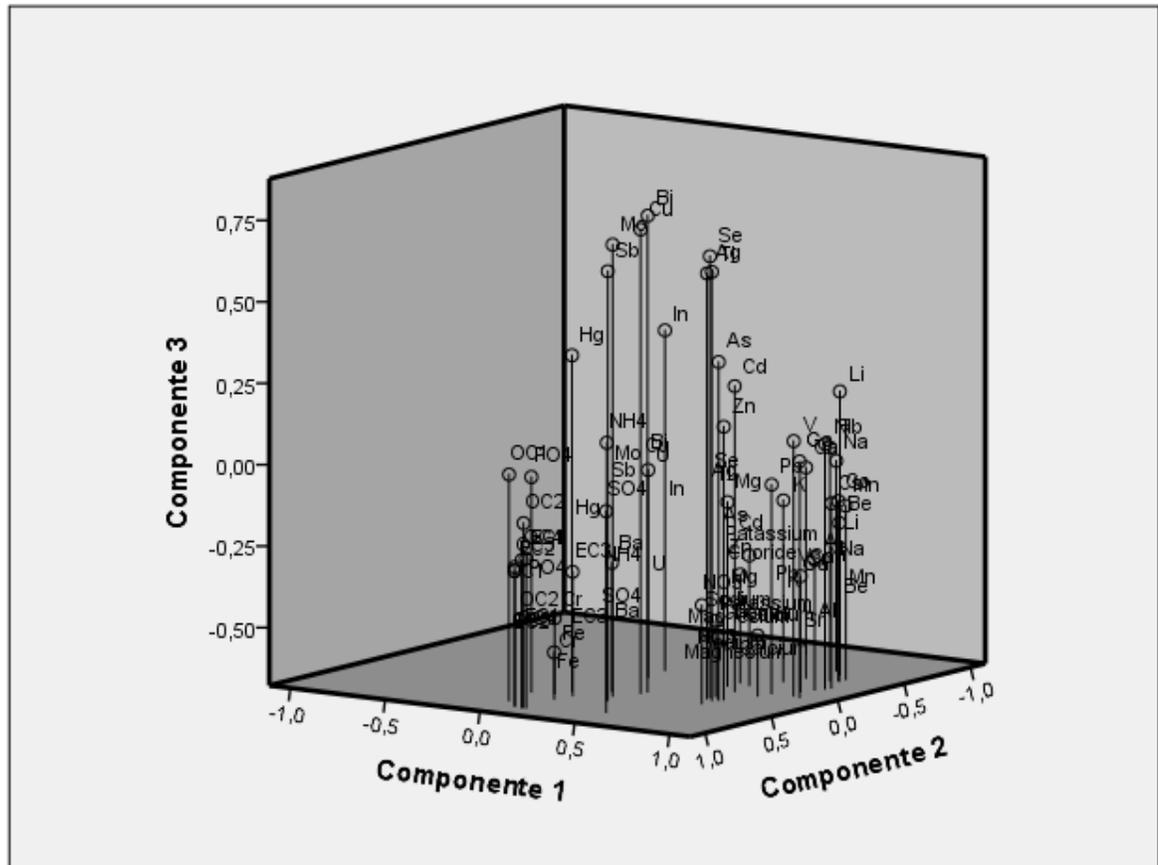


Figura 43. Gráfico de análisis de componente a nivel del suelo de Las Casitas.

Gráfico de componente



Figura 44. Gráfico de análisis de componente por ortogonalidad por componentes pareados de Las Casitas.

El ACP confirma que esta estación está impactada por tres fuentes de contaminación de acuerdo a la relación de especies químicas (Figura 44), la primera es por polvo de carbón que concuerda con la fuente más lejana que se muestra en el gráfico polar, pero en cuanto a las fuentes cercanas a la estación el ACP identifica que mínimo es impactado por dos una de ella es la quema de madera residencial, en cuanto a este perfil químico no es tan marcado, como se observa en la Figura 43.

Esta estación presenta una fuerte asociación entre la especiación química confirmado por la Tabla 31, ya que se en cada componente presenta elementos químicos con pesos relativos muy fuertes. En el anexo 5 se evidencia los registros de las actividades frecuentes de quemados de residuos sólidos en la población en cercanías a la estación de monitoreo y teniendo en cuenta las direcciones de los vientos registrados por el sensor, indicando que prácticamente esta estación es

impactada por todas las direcciones. Lo que infiere que por dinámica de transporte y dispersión locales presentadas se ve afectada por dicha actividad.

- **Sol y Sombra**

Como se observa en la Tabla 32 la varianza total es explicada por 10 componentes, los dos primeros tienen una varianza por componente alrededor del 26% lo que hace que en esta estación no presenta mucha variabilidad, lo cual sugiere una afectación homogénea por las fuentes de contaminación. Se destaca que las 2 primeras componentes estos explican aproximadamente el 53% del total de los datos. Infiriendo así que esta estación esta impactada principalmente por dos fuente de contaminación, por otro lado el 47% restante representa una diversificación de posibles fuentes de contaminación lo que representa la naturaleza de la estación y su ubicación estratégica como estación de fondo en el sistema de vigilancia de calidad de aire del Cerrejón.

Tabla 32. Matriz de varianza por análisis de componente principal de la estación de Sol y Sombra.

Componente	Varianza total explicada					
	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	13,603	28,340	28,340	13,603	28,340	28,340
2	11,756	24,492	52,832	11,756	24,492	52,832
3	4,595	9,574	62,405	4,595	9,574	62,405
4	3,162	6,587	68,992	3,162	6,587	68,992
5	2,610	5,438	74,430	2,610	5,438	74,430
6	1,971	4,107	78,537	1,971	4,107	78,537
7	1,622	3,379	81,916	1,622	3,379	81,916
8	1,282	2,671	84,587	1,282	2,671	84,587
9	1,067	2,222	86,809	1,067	2,222	86,809
10	,990	2,062	88,871			
11	,845	1,761	90,633			
12	,704	1,466	92,098			
13	,641	1,336	93,434			
14	,546	1,137	94,570			
15	,483	1,006	95,576			
16	,332	,693	96,269			
17	,263	,548	96,817			
18	,237	,494	97,311			

19	,206	,430	97,741			
20	,190	,396	98,137			
21	,159	,332	98,469			
22	,119	,248	98,717			
23	,111	,231	98,948			
24	,105	,219	99,168			
25	,086	,179	99,347			
26	,066	,137	99,483			
27	,053	,110	99,593			
28	,039	,081	99,674			
29	,031	,066	99,739			
30	,022	,045	99,784			
31	,019	,040	99,824			
32	,017	,036	99,860			
33	,015	,031	99,891			
34	,012	,025	99,916			
35	,010	,021	99,937			
36	,009	,018	99,956			
37	,007	,014	99,970			
38	,004	,009	99,979			
39	,003	,006	99,986			
40	,003	,006	99,992			
41	,002	,004	99,995			
42	,001	,002	99,998			
43	,000	,001	99,999			
44	,000	,001	99,999			
45	,000	,000	100,000			
46	8,401E-5	,000	100,000			
47	2,014E-5	4,196E-5	100,000			
48	1,065E-5	2,219E-5	100,000			

Tabla 33. Matriz Resultado del análisis de componente principal de la estación de Sol y Sombra.

Matriz de componente^a

	Componente								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Li	-,481	,731	-,260		,138	-,226			
Be	-,388	,603	-,118	-,221	,356	,426	-,128		

Na	-,492	,463			-,159		,516	,254	
Mg	-,375	,570	,325			-,257			,105
Al	-,453	,721	,267	,116		-,201	-,139	,230	
K	-,162	,753	,454	,141	-,152	,188			
Ca	-,458	,626	,105			-,272		-,124	,203
Cr	,677		-,219	,278	,359	-,198		,286	-,164
V	-,295	,689	,396	-,167	-,219		,147		-,197
Mn	-,540	,754	,168			-,181	-,122		
Fe	,158	-,344		,335	,174	,172	-,304	,557	-,236
Ni	-,155	,769	,289		-,186			-,105	-,385
Co	-,490	,820	,127				-,127		
Cu	-,112	,562	,272	-,152	-,212			-,405	-,226
Zn	,733	,506	-,291	,103		-,241			
Ga	,111	,908	,125	,121	,153	-,132	-,166		,105
As	,526	,443	-,485		-,454		-,150	,117	,114
Se	,608	,583	-,392		-,110	-,132	,115		
Sr	-,458	,553				-,145	,380	,435	
Rb	-,206	,727	,517				-,167		,200
Mo	,569	,333	-,314		,192	-,211	,240	-,146	-,246
Cd	,356	,437	-,268	-,209	-,533	,136	-,263		,204
Ag	,363	,759	-,211		,281	,286	-,149	-,154	
In		,526	-,358	-,261	,263	,482	,386		
Sb	,469	,410	-,412		,254	,430	-,245	-,144	
Ba	,761	,193	-,329		,286	-,303			-,130
Cs	-,227	,815	,162		,172	,292	-,262		
Hg	,296	,323	,274	-,115	,606	,268	,140	,144	,213
Tl	,654	,642	-,305					-,105	
Pb	,214	,331	-,482	-,176	-,627		-,185	,270	
Bi	,702	,524	-,414			-,119			
U	,660	,458	-,373	,197	,203	-,219	,146	-,163	
Sodium	-,530		-,179	,710		,140		-,164	
NH4	,718	,355	,271		-,347	,113	,117	,105	
Potassium	,162	,248		,567	-,227	,511	,212	,118	-,199
Magnesium	-,628		-,158	,669		,186		-,114	
Calcium	-,612	,321	-,100	,543					,149
Chloride	-,570		-,350	,633					
NO3	-,736	,115	-,270	,466			,106		,140
PO4	,570		,442	,105	,272	-,189			,379

SO4	,700	,377	,180	,175	-,328	,150	,157		
OC1	,603		,382	,133			,112	-,212	
OC2	,873		,312	,229					
OC3	,771	-,143	,494	,258					
OC4	,834		,414	,298					
EC1	,854		,306	,288					
EC2	,678	-,125	,506						
EC3	-,111		-,108				,517		,390

Gráfico de componente

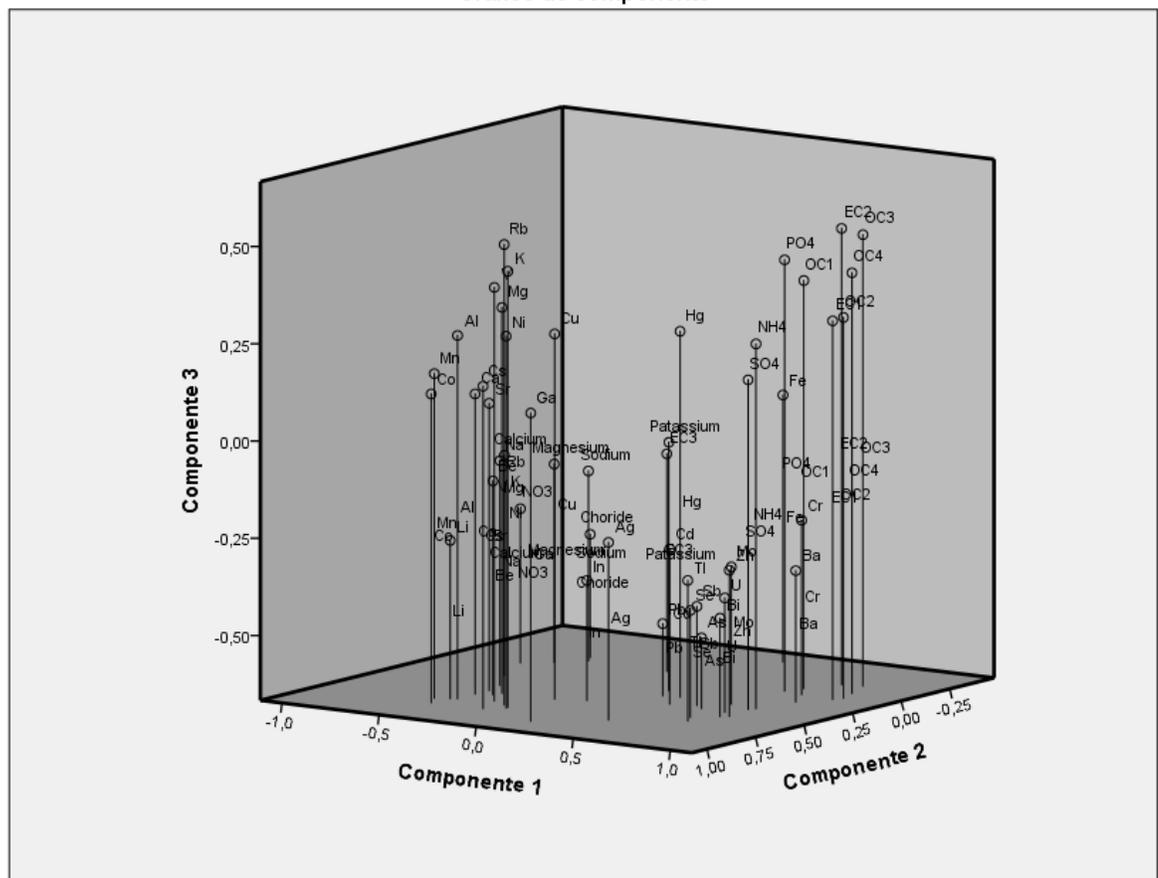


Figura 45. Gráfico de análisis de componente a nivel del suelo de Sol y Sombra.

6. CONCLUSIONES

Se pudo comprobar que los resultados en cada uno de los análisis desarrollados en este estudio son consistentes a las condiciones observadas en el área de estudio.

El análisis de la información producida en la Red de monitoreo de Calidad de Aire del cerrejón en cuanto a series de tiempo y captura de información por medio del software estadístico R y su herramienta Openair, muestran que en la Red tiene una buena fuente de datos meteorológico y de concentraciones atmosférica por contaminación de material particulado en diversos periodos de registro de información como lo es Ciclo diario, variación anual lo que deja ver la evolución de la contaminación del aire en la zona de explotación minera del departamento de La Guajira.

Las relaciones múltiples y los gráficos de condiciones por probabilidad condicionada permitieron apreciar un comportamiento coherente con las observaciones en campo; así mismo, se pudo evidenciar la eficiencia de la distribución espacial de la Red de monitoreo de calidad de aire por parte de la empresa Cerrejón en cuanto a representatividad local y registro de la información de las concentraciones de contaminantes y datos meteorológicos.

Así mismo, la distribución de la contaminación por material particulado en las estaciones de Barrancas, Las Casitas Y Provincial se concluye que la afectación por la explotación minera de Carbón se da en mayor proporción en la estación Provincial; la cual se ve afectada por las zonas de explotación del Tajo Patilla y Oreganal. Las tres estaciones comparten una posible fuente de contaminación que es el polvo de carbón. La estación de Barrancas se ve influenciada por las concentraciones generadas y registrada en la estación Provincial en una menor proporción, ya que en los modelos de regresión múltiple de las concentraciones de Barrancas se evidencia la relación de las concentraciones de Provincial, la cual forma tendencias de crecimiento de las concentraciones en la estación Barrancas, esto mismo se evidencia en los gráficos de probabilidad condicionada. En esta estación se hace evidente el impacto por fuente de camión pesado, pero es importante aclarar que esta fuente puede estar relacionada a la actividad generada en las inmediaciones de la estación, ya que utilizan este tipo de camiones en sus actividades. Por tal motivo no se diferencia con los camiones pesados mineros.

Dentro de las especies químicas del PM_{10} se encuentran más abundantes: Na, Mg, Al, K y Ca y en menor proporción el Fe, Zn y Cu los cuales están asociados a fuentes de suelo agrícola y actividades de transporte y emisiones en las vías; los elementos químicos como As, Se, Pb, Ag U, Rb son marcadores de actividades netamente industriales presentes en las muestras tomadas en las cuatro estaciones del estudio.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda en mediciones una caracterización fisicoquímica del material particulado futuras, realizar monitores específicos a las fuentes ya identificadas con el objetivo de obtener resultados específicos y perfiles de cada una de ellas.

Se debería caracterizar el material particulado $PM_{2.5}$ en las estaciones de estudio lo cual permitirán identificar con más detalle la clasificación de las fuentes de emisiones.

Hacer una evaluación de todas las estaciones de las redes de monitoreo de calidad de aire presente en el departamento de La Guajira teniendo en cuenta la representatividad de los datos capturados y ubicación de las estaciones.

Debido a las dificultades en cuanto al acceso de las bases de datos de las Red de monitoreos de calidad de aire completas se recomienda habilitar por pagina web la descargada de datos puros en formatos planos.

Para futuros trabajos de estudios se debe tener en cuenta modelaciones meteorológicas por medio de WRF que permitirán conocer un rango mayor de las distribución y transporte de la contaminación en la región.

Por otro lado, se recomienda validar los modelos de regresión lineales desarrollados para cada estación como estimación de la eficiencia de las proyecciones.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo L. C., Huertas J. I., & R. G. M. (2011). Caracterización de Partículas Suspendidas (PST) y Partículas Respirables (PM10) producidas en Áreas de Explotación Carbonífera a Cielo Abierto. *Informacion Tecnologica*, 22(4), 23–34. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000400004>
- Arregoces, H. A., Rojano, R. E., Ângulo, L. C., & Restrepo, G. M. (2016). Predicción y Análisis de la Contribución de PM10 desde Pilas de Carbón en una Mina a Cielo Abierto. *Informacion Tecnologica*, 27(4), 93–102. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000400010>
- Arregocés, H., Rojano, R., Restrepo, G., & Angulo, L. (2016). Using CALPUFF to determine the environmental impact of a coal mine open pit. *Transactions on Ecology and The Environment*, 207(Air), 55–66. <https://doi.org/10.2495/AIR160061>
- Ashbaugh, L. L., Malm, W. C., & Sadeh, W. Z. (1985). A residence time probability analysis of sulfur concentrations at Grand Canyon National Park. *Atmospheric Environment (1967)*, 19(8), 1263–1270.
- British Petroleum. (2017). BP Statistical Review of World Energy 2017. *British Petroleum*, (66), 1–52. <https://doi.org/http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
- Brunekreef, B., & Hoffmann, B. (2016). Air pollution and heart disease. *The Lancet*, 388(10045), 640–642. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)30375-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)30375-0)
- Carslaw, D. (2015). The openair manual open-source tools for analysing air pollution data. *King's College London*, (January), 287.

- Carslaw, D. C., Beevers, S. D., Ropkins, K., & Bell, M. C. (2006). Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport. *Atmospheric Environment*, *40*(28), 5424–5434. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.062>
- Carslaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). Openair - An r package for air quality data analysis. *Environmental Modelling and Software*, *27–28*, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Cerrejón. (2006). Sostenibilidad: comprometidos on el futuro, 187.
- Cerrejón. (2007). Informe de sostenibilidad ambiental, 91.
- Cerrejón. (2011). Resumen del Proyecto de Expansión liwo'uyaa para Grupos de Interés, 72.
- Chakraborty, M. K., Ahmad, M., Singh, R. S., Pal, D., Bandopadhyay, C., & Chauhya, S. K. (2002). Determination of the emission rate from various opencast mining operations. *Environmental Modelling and Software*, *17*(5), 467–480. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(02\)00010-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(02)00010-5)
- Chow, J. C., & Watson, J. G. (1992). Fugitive Emissions Add to Air Pollution. *Environmental Protection*, *3*(June), 26–31.
- Daniel A, V. (2008). *Fundamentals od air pollution*. (Elsevier Inc., Ed.). Retrieved from www.books.elsevier.com
- Delany, A. C., Parkin, D. W., Griffin, J. J., Goldberg, E. D., & Reimann, B. E. F. (1967). Airborne dust collected at Barbados. *Geochimica et Cosmochinica Acta*, *31*(1965), 885–909. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(67\)80037-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(67)80037-1)
- EPA. (1981). Overview of Receptor Model Application to Particulate Source Apportionment.
- EPA. (2001). Air Quality Criteria for Particulate Matter Air Quality Criteria for Particulate Matter. *Environmental Protection*, *1*, 632.
- EPA. (2017). LIST OF DESIGNATED REFERENCE AND EQUIVALENT METHODS. *United States Environmental Protection Agency*, 69. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(99\)80035-4](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(99)80035-4)
- Fang, G. C., Wu, Y. S., Chang, S. Y., Rau, J. Y., Huang, S. H., & Lin, C. K. (2006). Characteristic study of ionic species in nano, ultrafine, fine and coarse particle size mode at a traffic sampling site. *Toxicology and Industrial Health*, *22*(1), 27–

37. <https://doi.org/10.1191/0748233706th241oa>

García, D. (2012). *CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LA MATERIA PARTICULADA ATMOSFÉRICA (PM10 Y PM2,5) EN ENTORNOS URBANO, INDUSTRIAL Y SUBURBANO*. *Animal Genetics*.

García Guadalupe, M., Ramírez Sánchez, H. U., Ulloa Godínez, H., Arias, S., & Pérez, A. (2012). Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de Guadalajara (México). *Investigaciones Geográficas*, (58), 9–29. <https://doi.org/10.14198/INGEO2012.58.01>

Garrido Galindo, A., & Camargo Caicedo, Y. (2012). Partículas respirables en el aire : generalidades y monitoreo en Latinoamérica. *Inge Cuc*, 8(1), 293–312. Retrieved from <http://revistascientificas.cuc.edu.co/index.php/ingecuc/article/view/268>

Gavriil, I., Grivas, G., Kassomenos, P., Chaloulakou, a, & Spyrellis, N. (2006). an Application of Theoretical Probability Distributions , To the Study of Pm 10 and Pm 2 . 5 Time Series in Athens , Greece, 8(3), 241–251.

Ghose, Mrinal K, B. S. . (2008). Analyzing Sources of Air Pollution with Factal Analysis: Case Study from a Coal Washery in India. *Environmental Quality Management*, 75–88. <https://doi.org/10.1002/tqem>

Ghose, M. K., & Majee, S. R. (2007). Characteristics of hazardous airborne dust around an Indian surface coal mining area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 130(1–3), 17–25. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9448-6>

Gramsch, E., Cereceda-Balic, F., Oyola, P., & von Baer, D. (2006). Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM10and Ozone data. *Atmospheric Environment*, 40(28), 5464–5475. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.062>

Grange, S. K., Lewis, A. C., & Carslaw, D. C. (2016). Source apportionment advances using polar plots of bivariate correlation and regression statistics. *Atmospheric Environment*, 145, 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.016>

Hadley, M. B., Baumgartner, J., & Vedanthan, R. (2018). Developing a clinical approach to air pollution and cardiovascular health. *Circulation*, 137(7), 725–742. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.117.030377>

Ho, B. Q., & Clappier, A. (2011). Road traffic emission inventory for air quality modelling and to evaluate the abatement strategies: A case of Ho Chi Minh City, Vietnam. *Atmospheric Environment*, 45(21), 3584–3593.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.073>

- Hopke, P. K. (2003). Recent developments in receptor modeling. *Journal of Chemometrics*, 17(5), 255–265. <https://doi.org/10.1002/cem.796>
- Houck, J. E. (1991). Chapter 3 Source Sampling for Receptor Modeling. *OMNI Environmental Services*, 45–82. [https://doi.org/10.1016/S0922-3487\(08\)70126-6](https://doi.org/10.1016/S0922-3487(08)70126-6)
- IDEAM. (2017). *Informe del estado de la calidad de aire en Colombia 2016*. Bogotá.
- John H, S. (1983). *ATMOSPHERIC DIFFUSION THEORY. Advances*.
- Lazaridis, M. (2011). *First Principles of Meteorology and Air Pollution. Technical University of Crete. Department of Environmental Engineering. Greece*.
- Leelőssy, Á., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, Á., Lagzi, I., & Mészáros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Central European Journal of Geosciences*, 6(3), 257–278. <https://doi.org/10.2478/s13533-012-0188-6>
- Lippmann, M. (2009). *Environmental Toxicants: Human Exposures and Their Health Effects*. (L. Morton, Ed.), *John Wiley & Sons, Inc* (Third Edit). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9780470442890>
- MADS. (2010). Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 50.
- Ministerio de Minas y Energía. (2017). *Análisis y Consolidación de cifras*. Retrieved from <http://www.simco.gov.co/simco/Estadísticas/Producción/tabid/121/Default.aspx>
- Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible. (2010). Resolución 650 del 29 de marzo de 2010, (650), 650.
- Monin, A. S. (1959). GENERAL SURVEY OF ATMOSPHERIC DIFFUSION. *Advances in Geophysics*, 29–40. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60091-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60091-6)
- Organización Mundial de la Salud. (2015). Salud y medio ambiente: Impacto sanitario de la contaminación del aire, 1, 1–8.
- Organization World Health. (2001). *HUMAN EXPOSURE ASSESSMENT An Introduction. World Health Organization*. World Health Organization.

- Pandey, B., Agrawal, M., & Singh, S. (2014). Assessment of air pollution around coal mining area: Emphasizing on spatial distributions, seasonal variations and heavy metals, using cluster and principal component analysis. *Atmospheric Pollution Research*, 5(1), 79–86. <https://doi.org/10.5094/APR.2014.010>
- Patil, R. S., Kumar, R., Menon, R., Shah, M. K., & Sethi, V. (2013). Development of particulate matter speciation profiles for major sources in six cities in India. *Atmospheric Research*, 132–133, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.04.012>
- Pey, J., Querol, X., Alastuey, A., Forastiere, F., & Stafoggia, M. (2013). African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001-2011: PM10 concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale meteorology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1395–1410. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1395-2013>
- PHILIP K, H. (1991). *Receptor modeling for air quality management*. Elsevier Science Publishers B.V (Vol. 7). Potsdam, New York. [https://doi.org/10.1016/S0922-3487\(08\)70131-X](https://doi.org/10.1016/S0922-3487(08)70131-X)
- Placeres, M. R., Olite, F. D., & Toste, M. Á. (2006). La contaminación del aire: Su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2). <https://doi.org/10.1027/1015-5759/a000030>
- Ramírez, O., Sánchez de la Campa, A. M., Amato, F., Catacolí, R. A., Rojas, N. Y., & de la Rosa, J. (2018). Chemical composition and source apportionment of PM10 at an urban background site in a high–altitude Latin American megacity (Bogota, Colombia). *Environmental Pollution*, 233, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.045>
- Rogge, W. F., Hildemann, L. M., Marurek, M. A., & Cass, G. R. (2011). Sources of Fine Organic Aerosol. 1. Charbroilers and Meat Cooking Operations. *Environmental Science and Technology*, 22(4), 1112–1125. <https://doi.org/10.1021/es00018a015>
- Rojano, R., Angulo, L., & Restrepo, G. (2015). Concentración Y Relación De Pst , Pm 10 Y Pm 2 . 5 En Poblaciones Cercanas Concentration and Ratio Pst , Pm 10 and Pm 2 . 5 in Towns Near Open Pit Mining : Case Cerrejón Colombia. *Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V*, 30, 157–166.
- Soo, J. C., Monaghan, K., Lee, T., Kashon, M., & Harper, M. (2016). Air sampling filtration media: Collection efficiency for respirable size-selective sampling. *Aerosol Science and Technology*, 50(1), 76–87. <https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1128525>

- Sostenible, M. de A. y D. (2017). Informe del estado de la calidad del aire en Colombia, 47.
- Tomlin, A. S., Smalley, R. J., Tate, J. E., Barlow, J. F., Belcher, S. E., Arnold, S. J., ... Robins, A. (2009). A field study of factors influencing the concentrations of a traffic-related pollutant in the vicinity of a complex urban junction. *Atmospheric Environment*, 43(32), 5027–5037. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.047>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2009). Terms of Environment: glossary, abbreviations and acronyms. [https://iaspub.Epa.Gov/Sor_internet/Registry/Termreg/Searchandretrieve/Glossariesandkeywordlists/Search.Do?Details=&vocabName=Terms of Environment\(2009\)&filterTerm=Air Pollution&checkedAcronym=true&checkedTerm=true&hasDefinitions=false&filterTerm=Air Pollution](https://iaspub.Epa.Gov/Sor_internet/Registry/Termreg/Searchandretrieve/Glossariesandkeywordlists/Search.Do?Details=&vocabName=Terms of Environment(2009)&filterTerm=Air Pollution&checkedAcronym=true&checkedTerm=true&hasDefinitions=false&filterTerm=Air Pollution). Retrieved from [https://iaspub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do?details=&vocabName=Terms of Environment\(2009\)&filterTerm=Air pollution&checkedAcronym=true&checkedTerm=true&hasDefinitions=false&filterTerm=Air pollution&](https://iaspub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do?details=&vocabName=Terms of Environment(2009)&filterTerm=Air pollution&checkedAcronym=true&checkedTerm=true&hasDefinitions=false&filterTerm=Air pollution&)
- Uria-Tellaetxe, I., & Carslaw, D. C. (2014). Conditional bivariate probability function for source identification. *Environmental Modelling and Software*, 59, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.002>
- Vargas, F. A., Rojas, N. Y., Pachon, J. E., & Russell, A. G. (2012). PM10 characterization and source apportionment at two residential areas in Bogota. *Atmospheric Pollution Research*, 72–80. <https://doi.org/10.5094/APR.2012.006>
- Warneck, P. (1988). *Chemistry of the Natural Atmosphere* (Academic P). San Diego, California.
- Watson, J. G., & Chow, J. (1998). Guideline on speciated particulate monitoring. *U.S. Environmental Protection Agency*, (August), 3–2, 15–21. Retrieved from <https://www3.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/pm25/spec/drispec.pdf>
- Watson, J. G., & Chow, J. C. (2000). Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates: Summary of Current Knowledge and Needed Research. *Energy and Environmental Engineering Center*, (January 2000), 1–240. Retrieved from <http://www.epa.gov/ttn/chief/efdocs/fugitivedust.pdf>
- Watson, J. G., & Chow, J. C. (2015). *Receptor Models and Measurements for Identifying and Quantifying Air Pollution Sources. Introduction to Environmental*

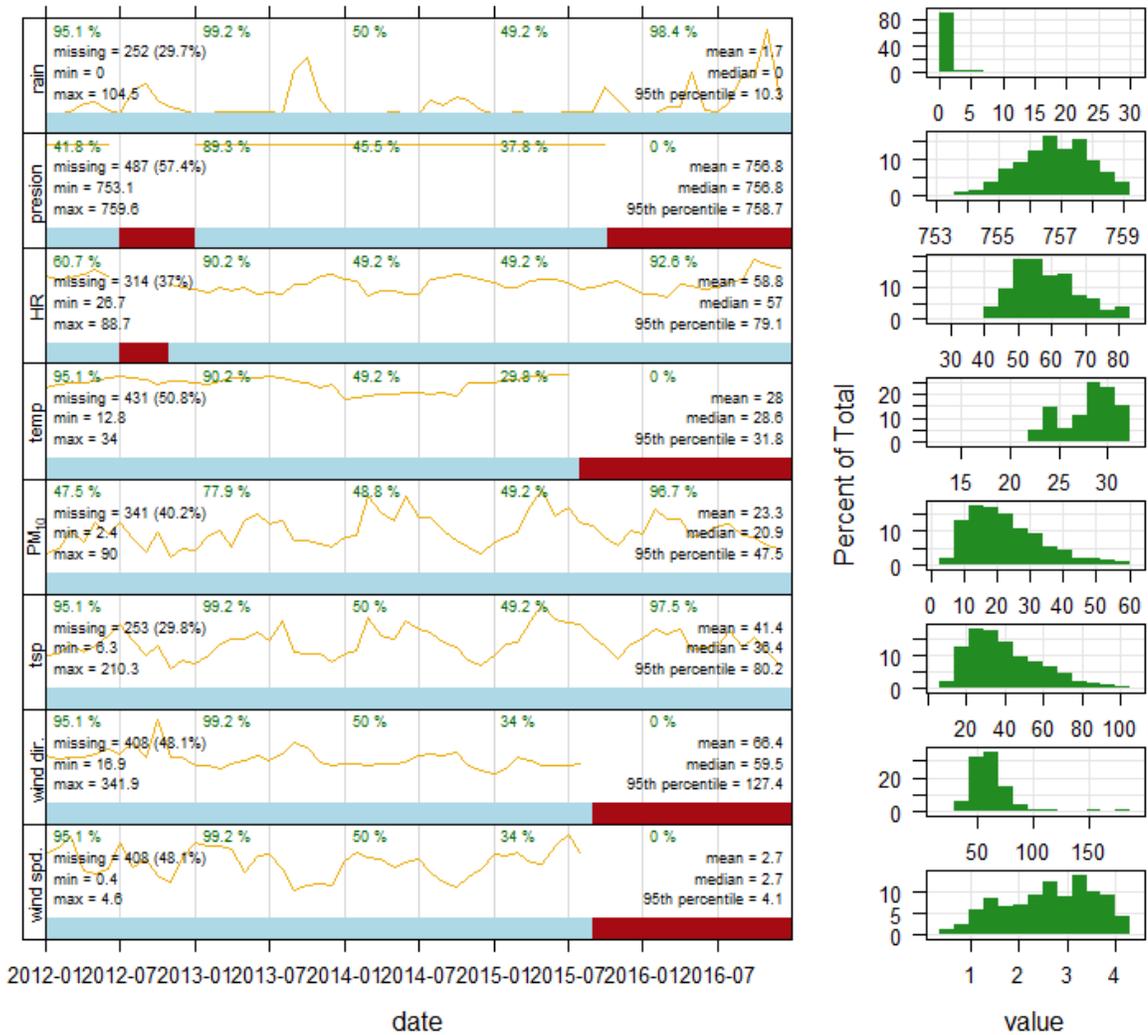
Forensics: Third Edition (Third Edit). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404696-2.00020-5>

William Malm, N. P. S. and C. S. I. for R. on the A. (2000). Introduction to Visibility, 1–79. Retrieved from <http://www.epa.gov/visibility/what.html%5Cnpapers2://publication/uuid/C229704B-B8D1-4E4E-87D8-E6FBF22E9BF7>

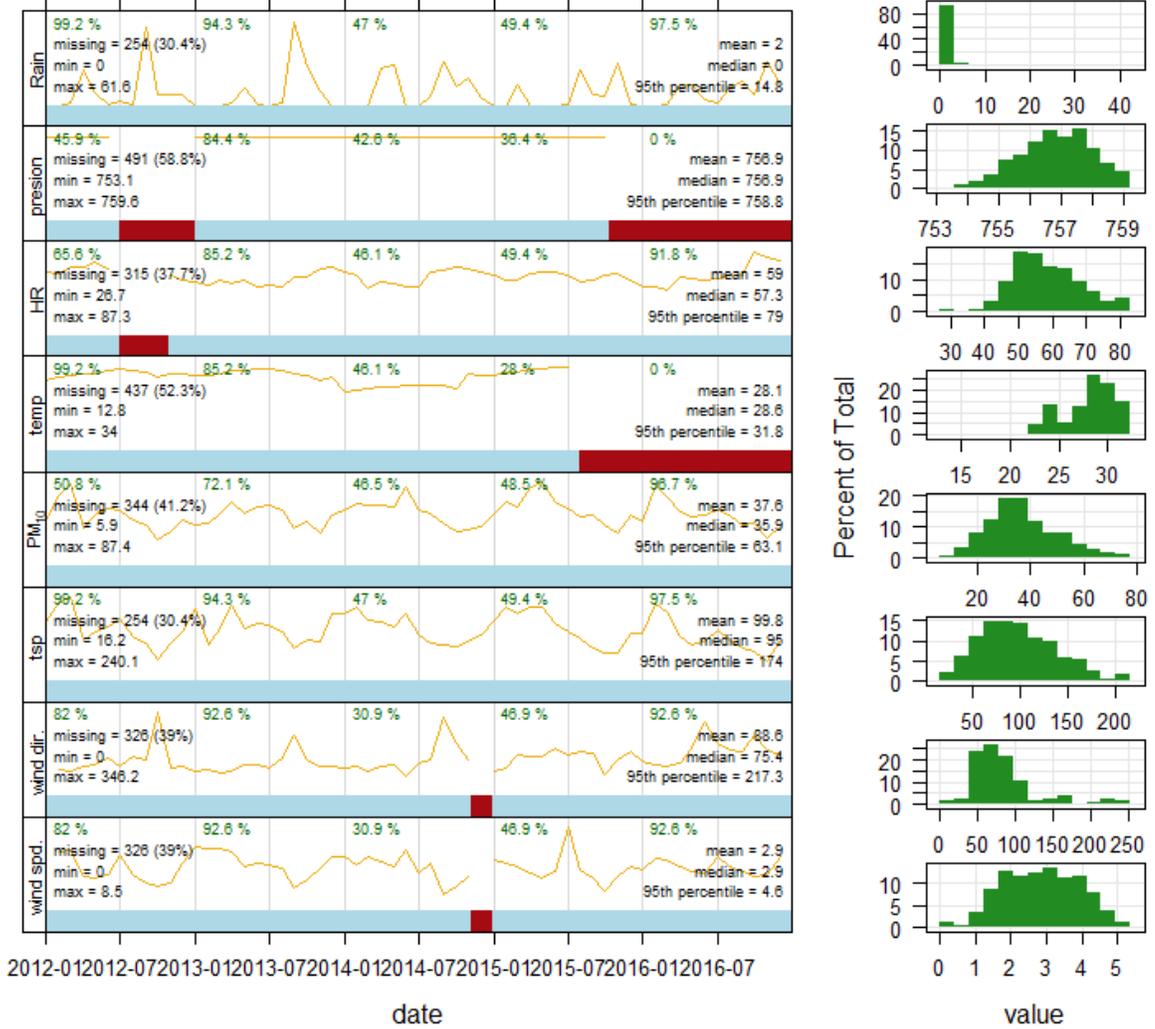
9. ANEXOS

ANEXO 1: GRAFICAS RESUMEN DE LOS DATOS DE LAS ESTACIONES DE LAS ESTACIONES SELECCIONAS EN EL ESTUDIO

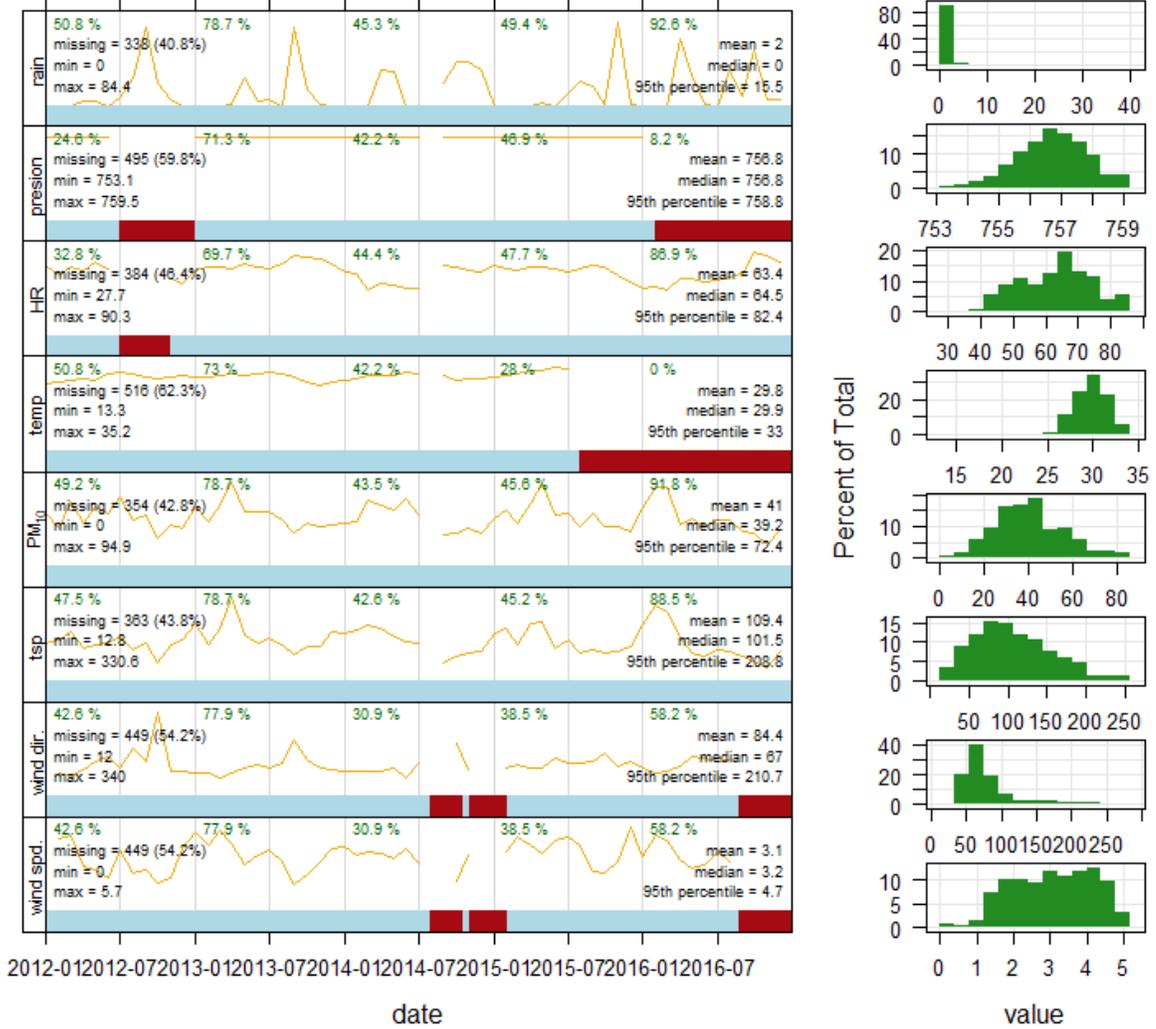
Sol y sombra



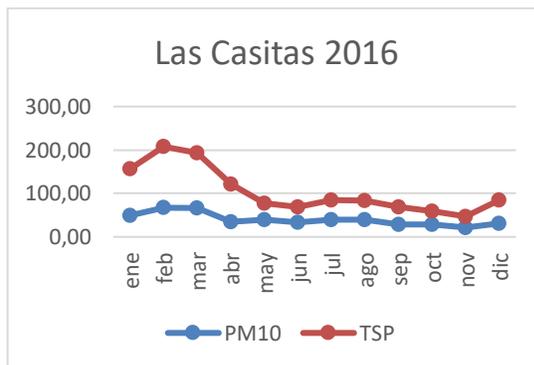
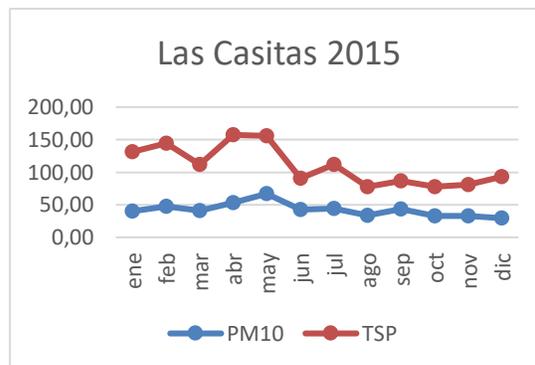
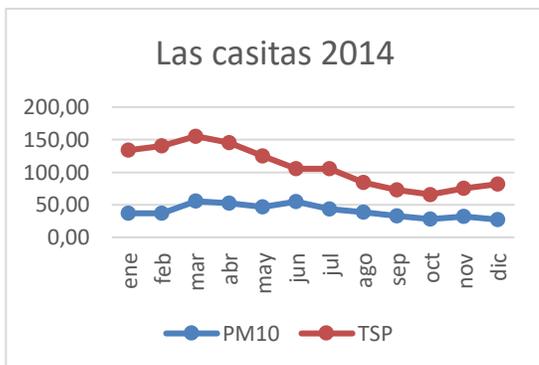
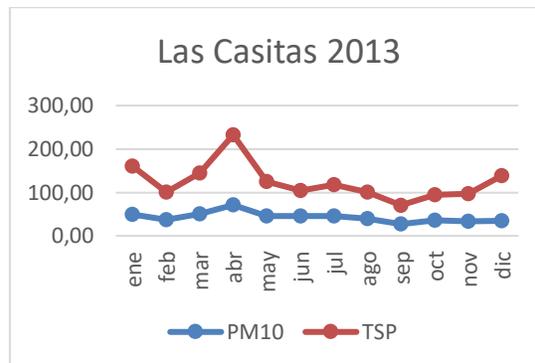
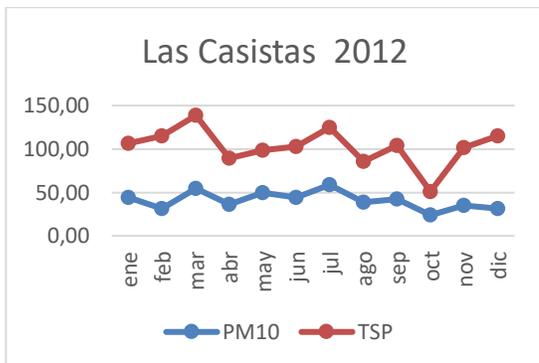
Provincial

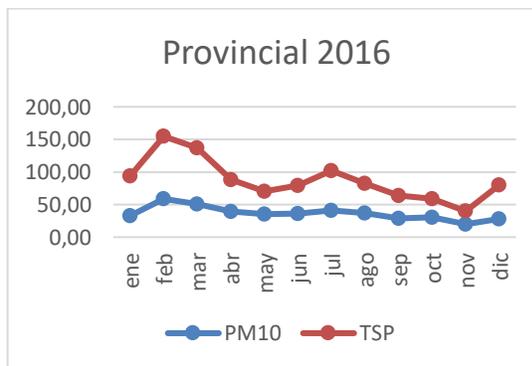
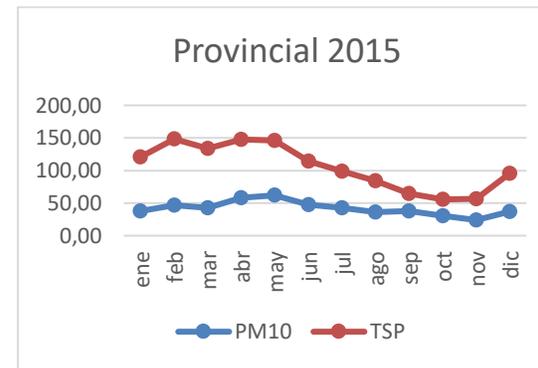
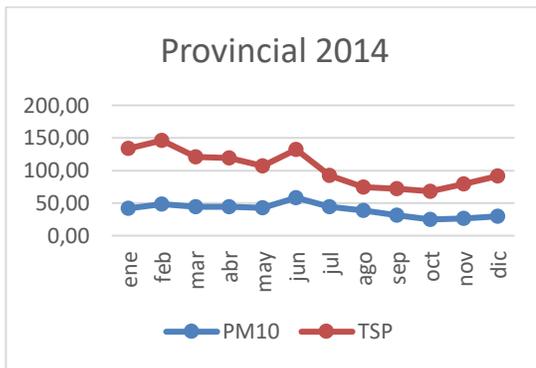
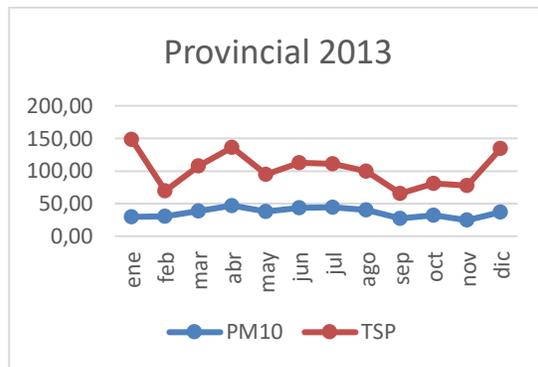
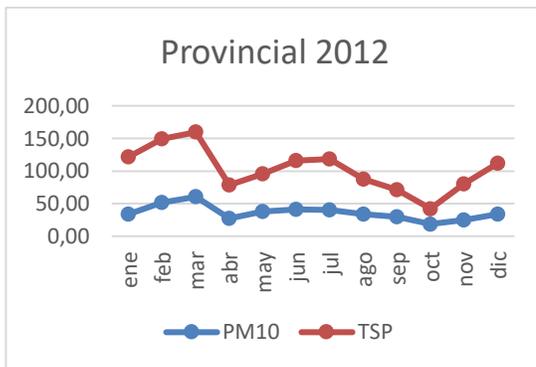


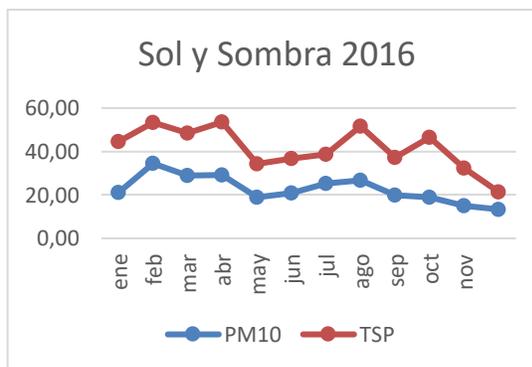
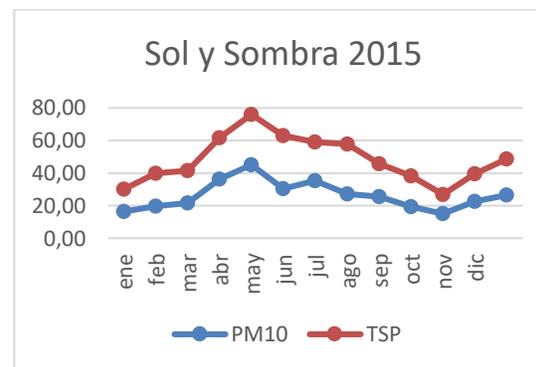
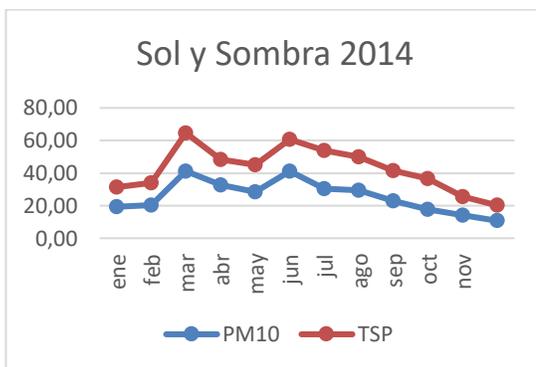
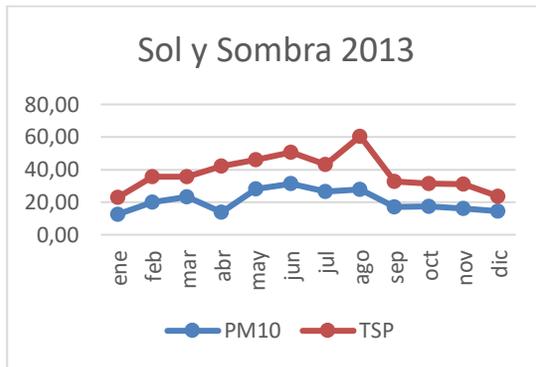
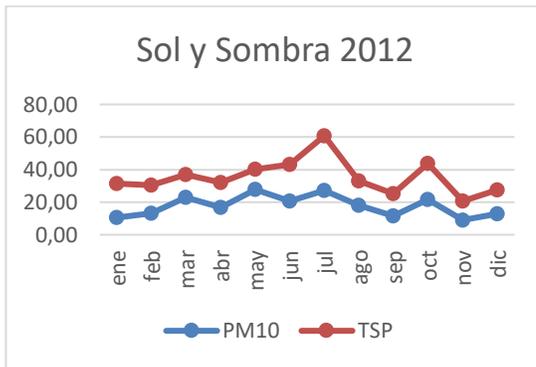
Las Casitas



ANEXO 2: COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM10 Y PST DE LAS ESTACIONES DE CERREJÓN

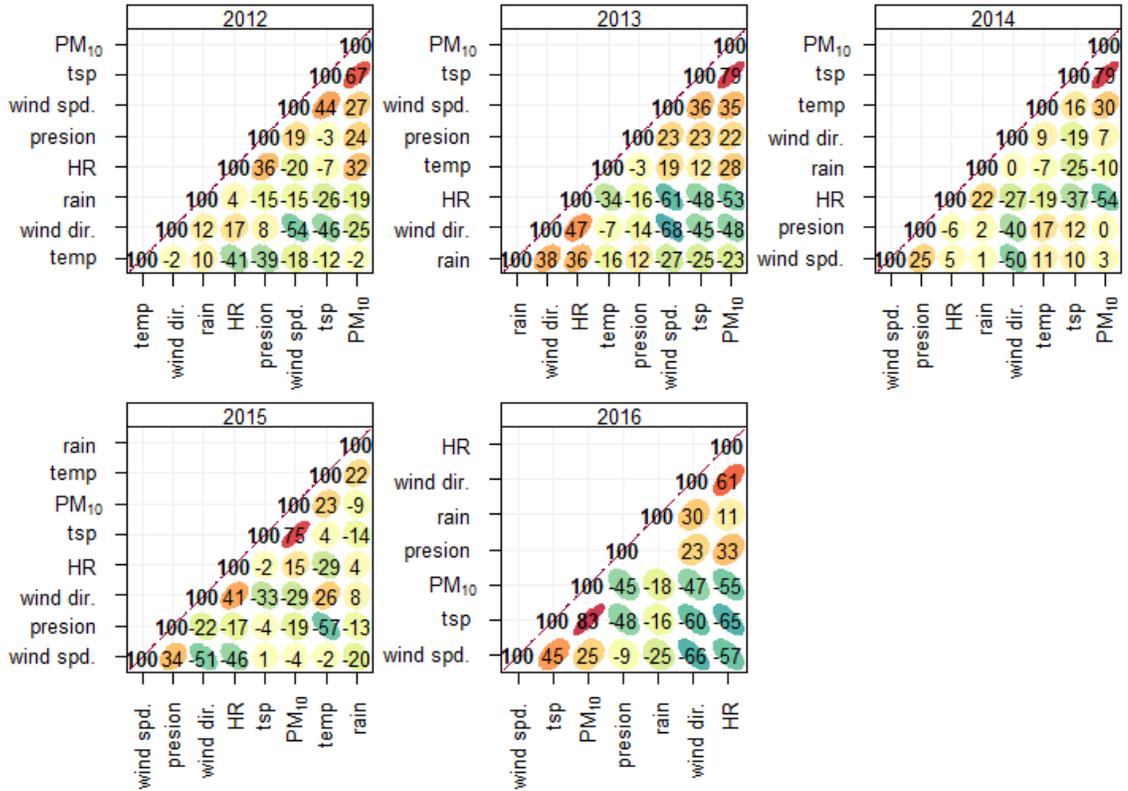




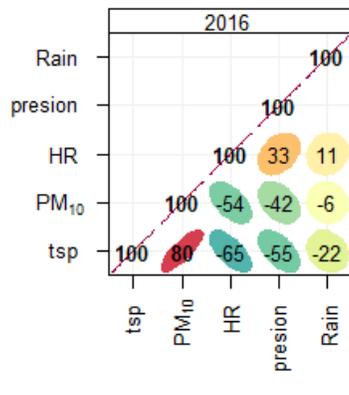
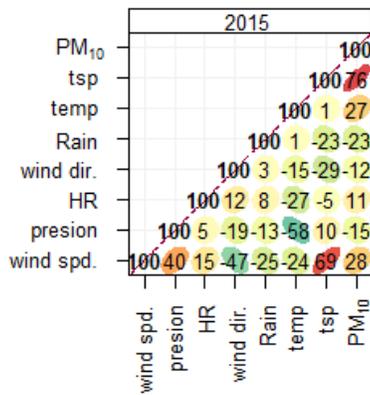
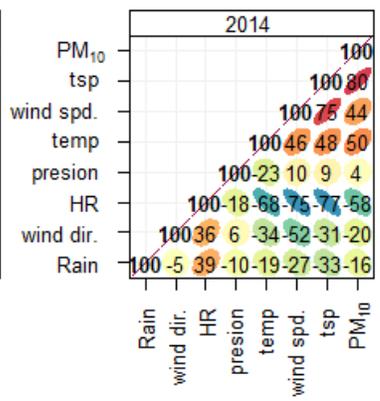
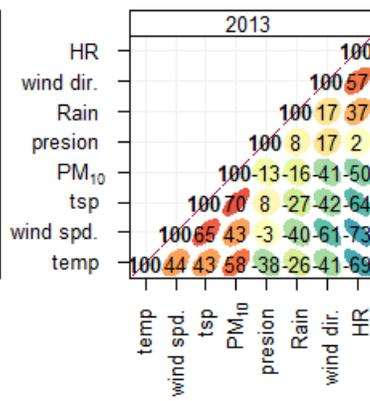
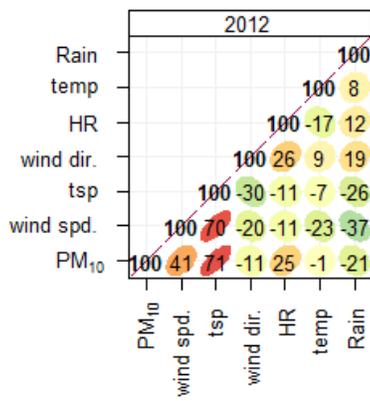


ANEXO 3: MATRICES DE CORRELACIONES POR ESTACIONES DE LA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE DEL CERREJÓN.

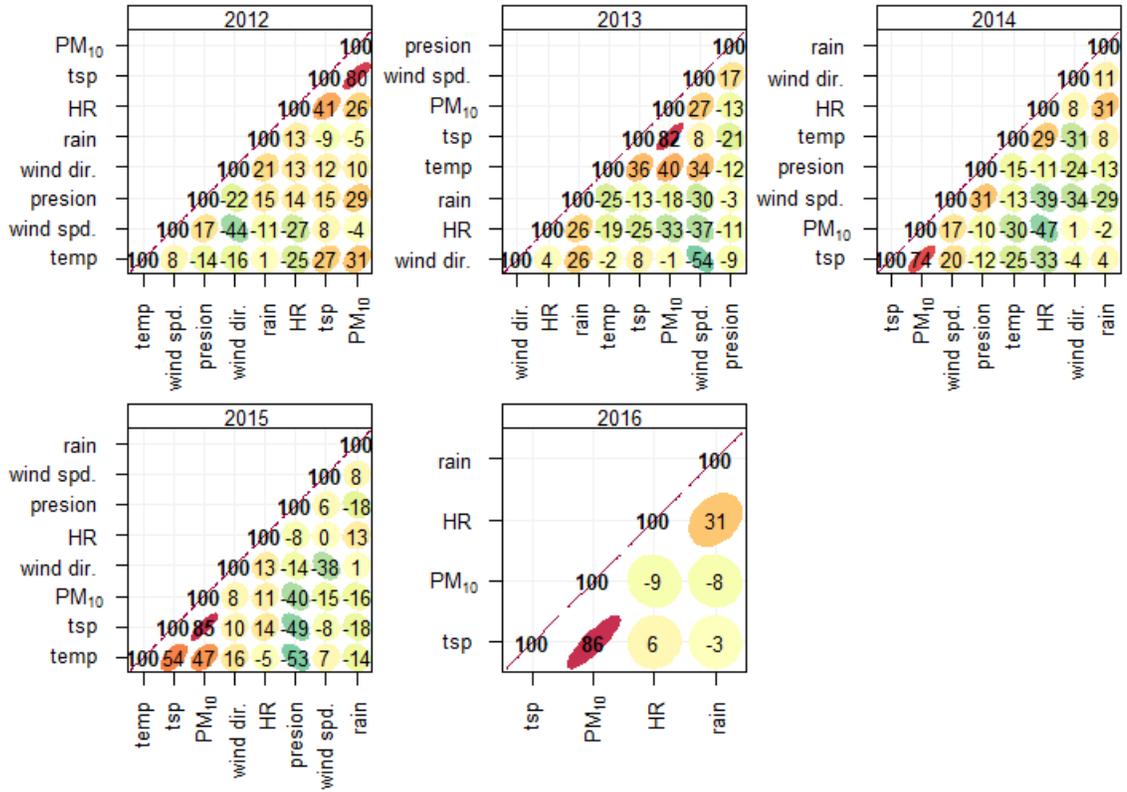
Las casitas



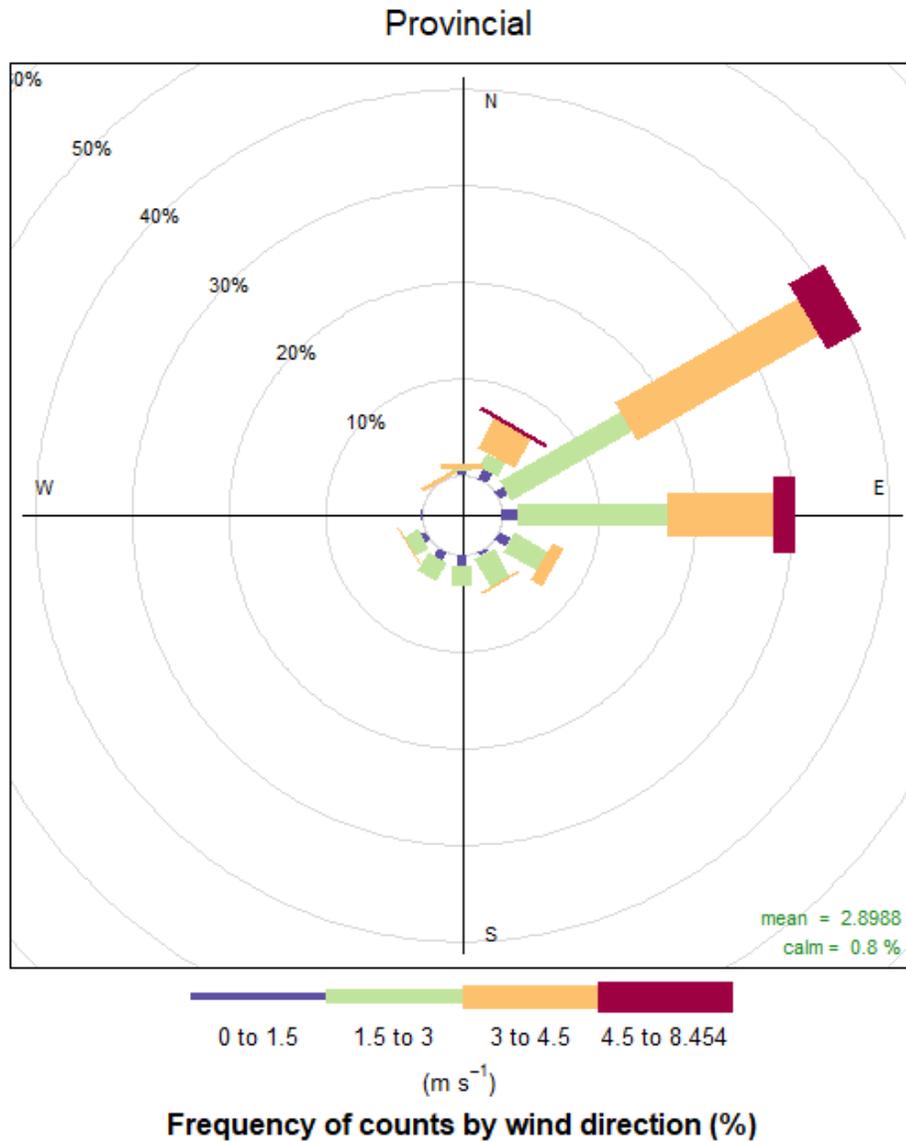
Barrancas



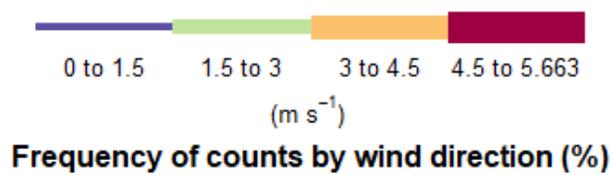
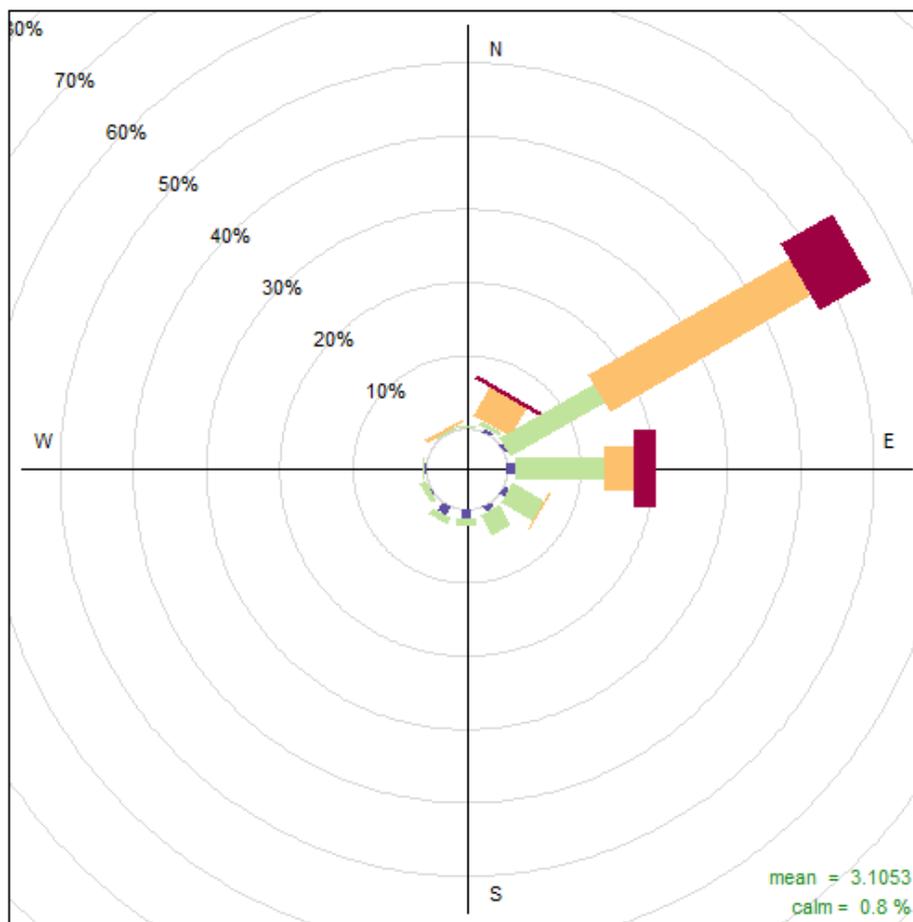
Sol y Sombra



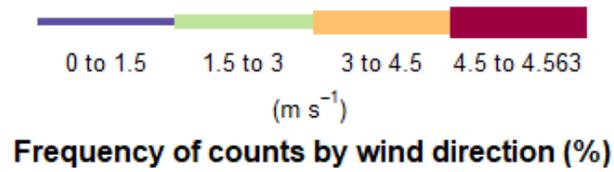
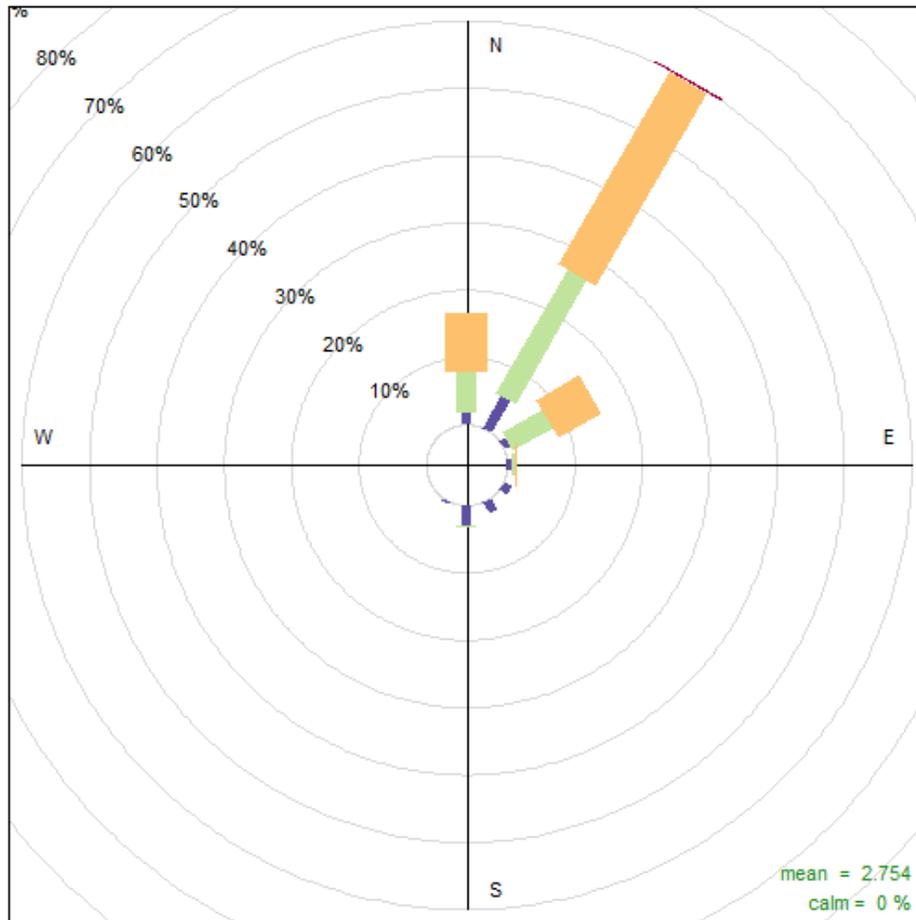
ANEXO 4: Rosas de vientos para los periodos 2012 – 2016 de las estaciones de la red de calidad de aire del cerrejón.



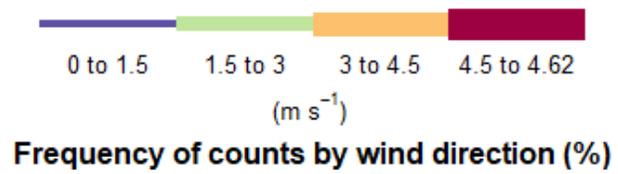
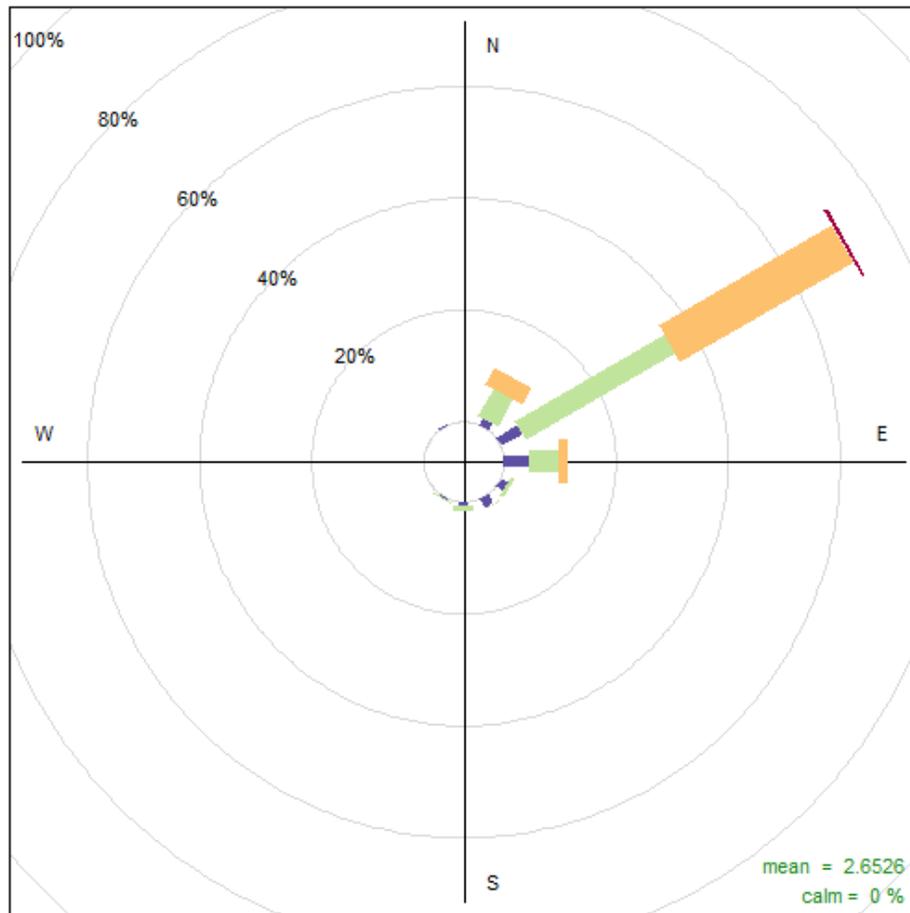
Las Casitas



Barrancas

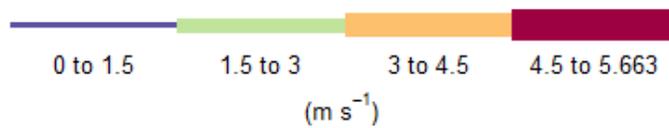
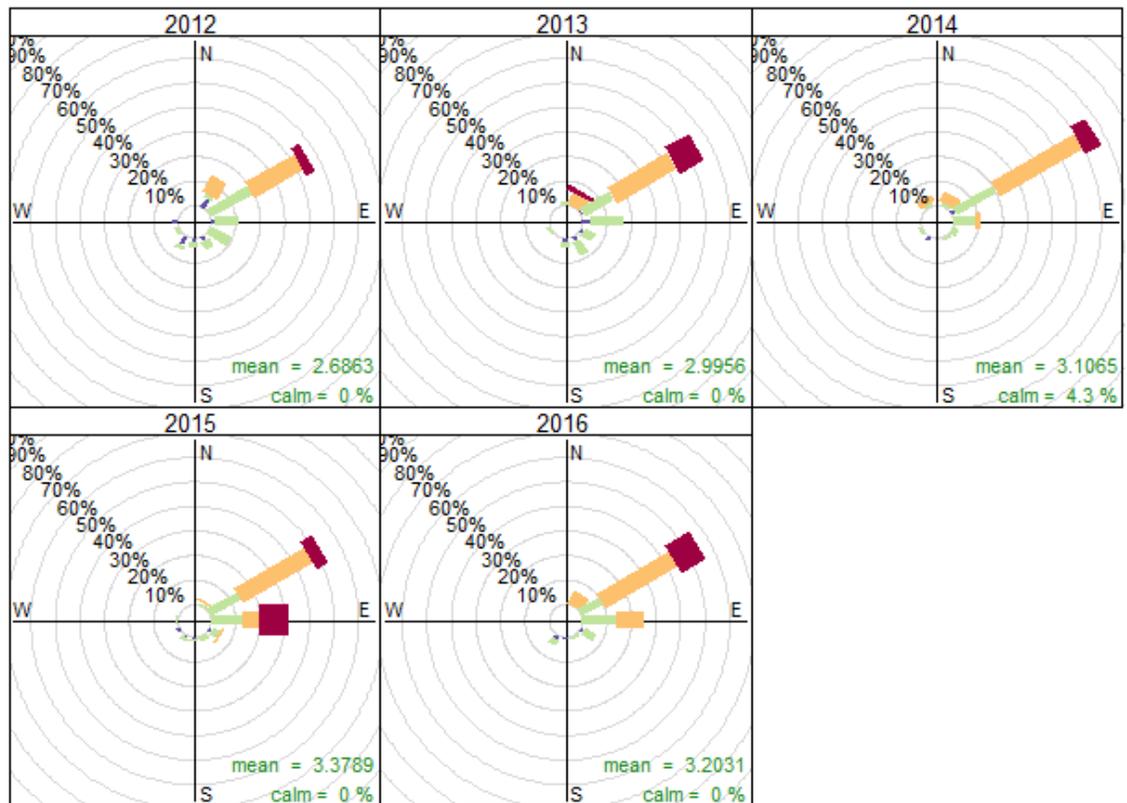


Sol y Sombra



Rosa de los vientos para periodos anuales entre 2012 al 2016 en la estación Las Casitas

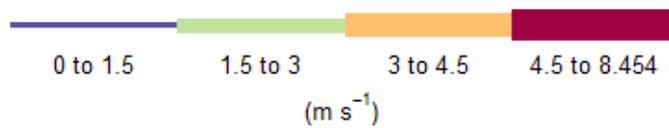
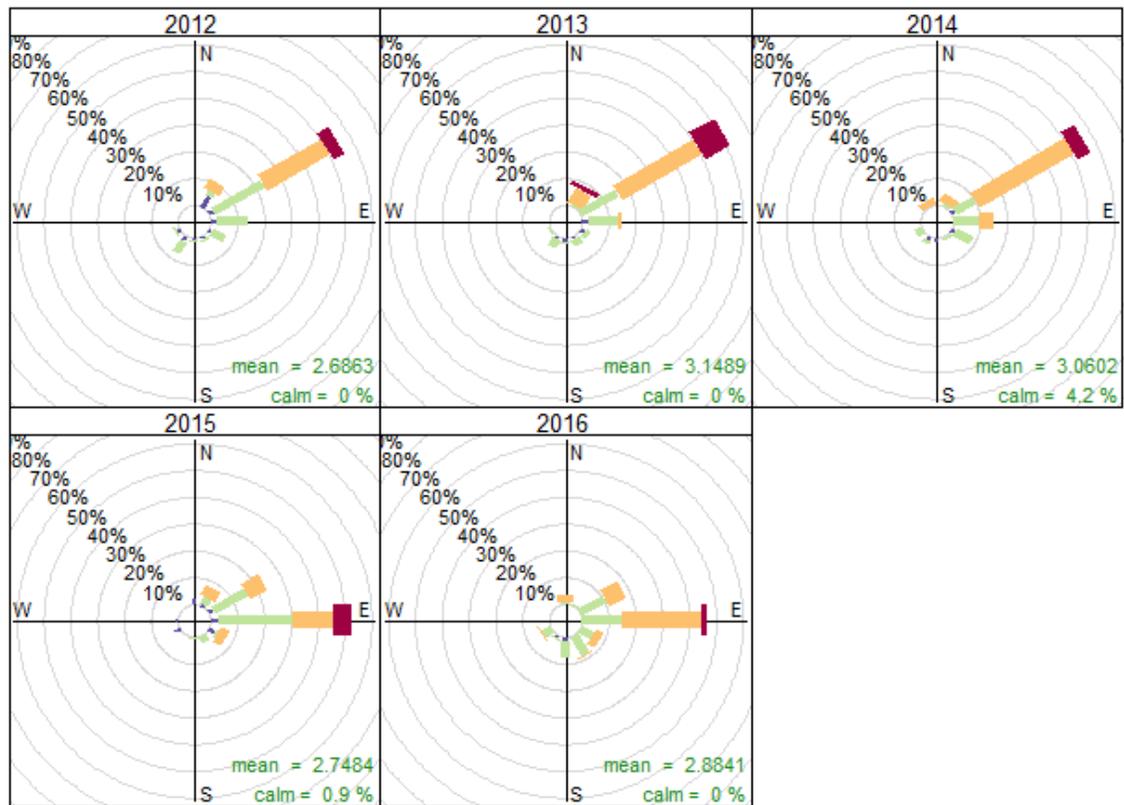
Las Casitas



Frequency of counts by wind direction (%)

Rosa de los vientos para periodos anuales entre 2012 al 2016 en la estación Provincial

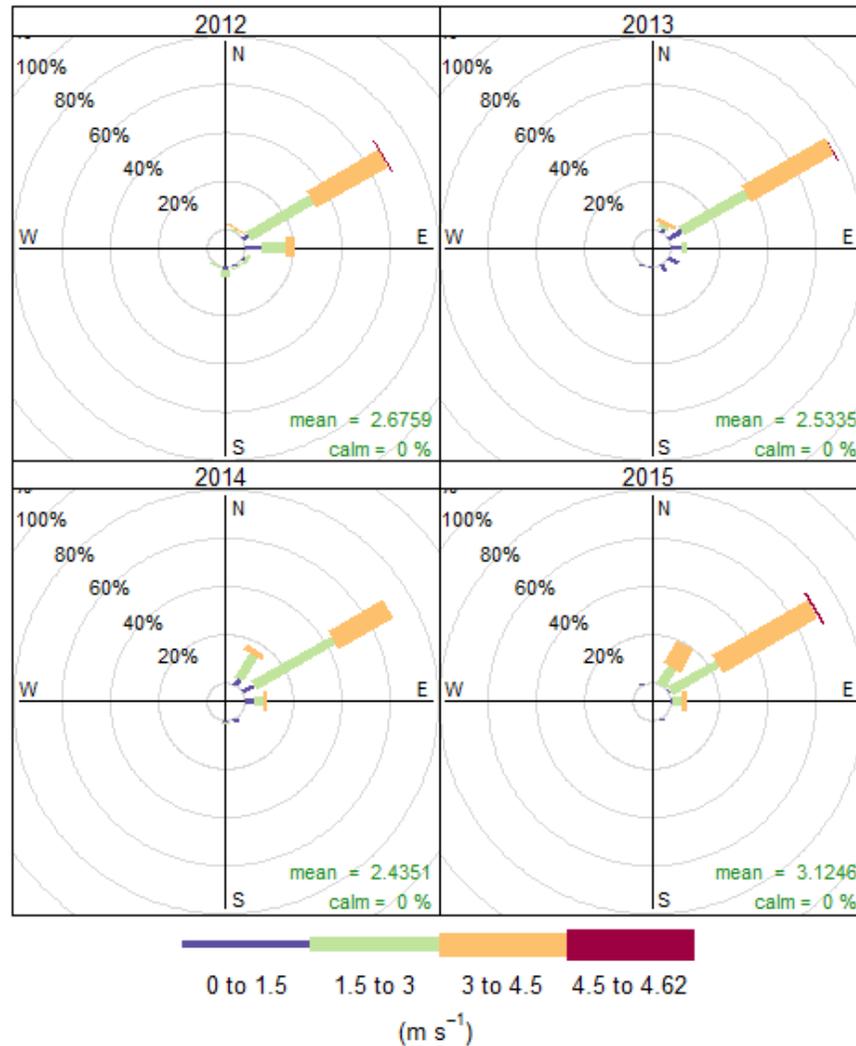
Provincial



Frequency of counts by wind direction (%)

Rosa de los vientos para periodos anuales entre 2012 al 2016 en la estación Sol y Sombra

Sol y Sombra

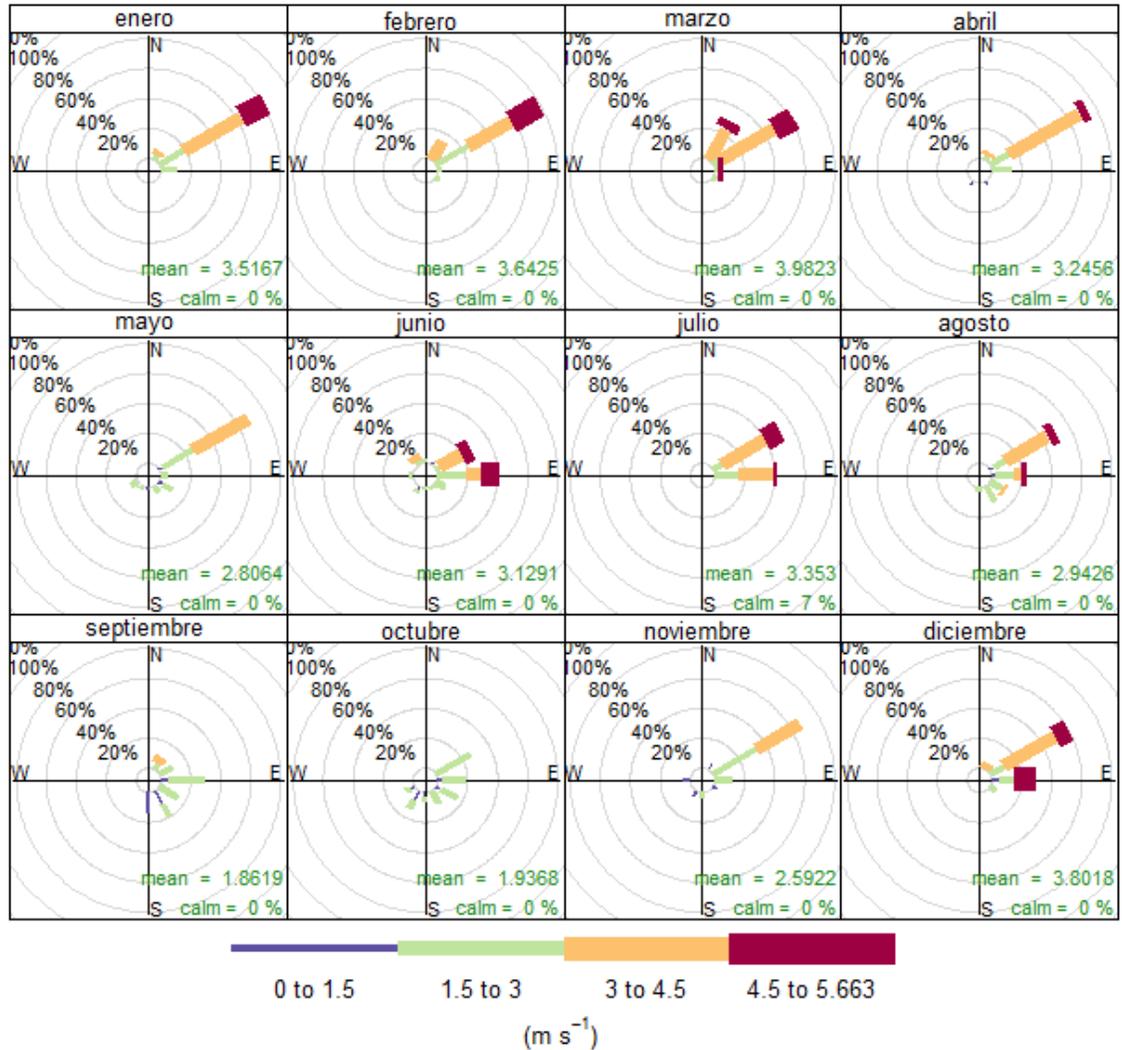


Frequency of counts by wind direction (%)

Nota: no se registro velocidad ni dirección de viento por daño en el sensor.

Rosa de los vientos para periodos mensuales entre 2012 al 2016 en la estación Las Casitas.

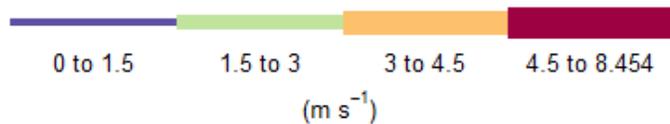
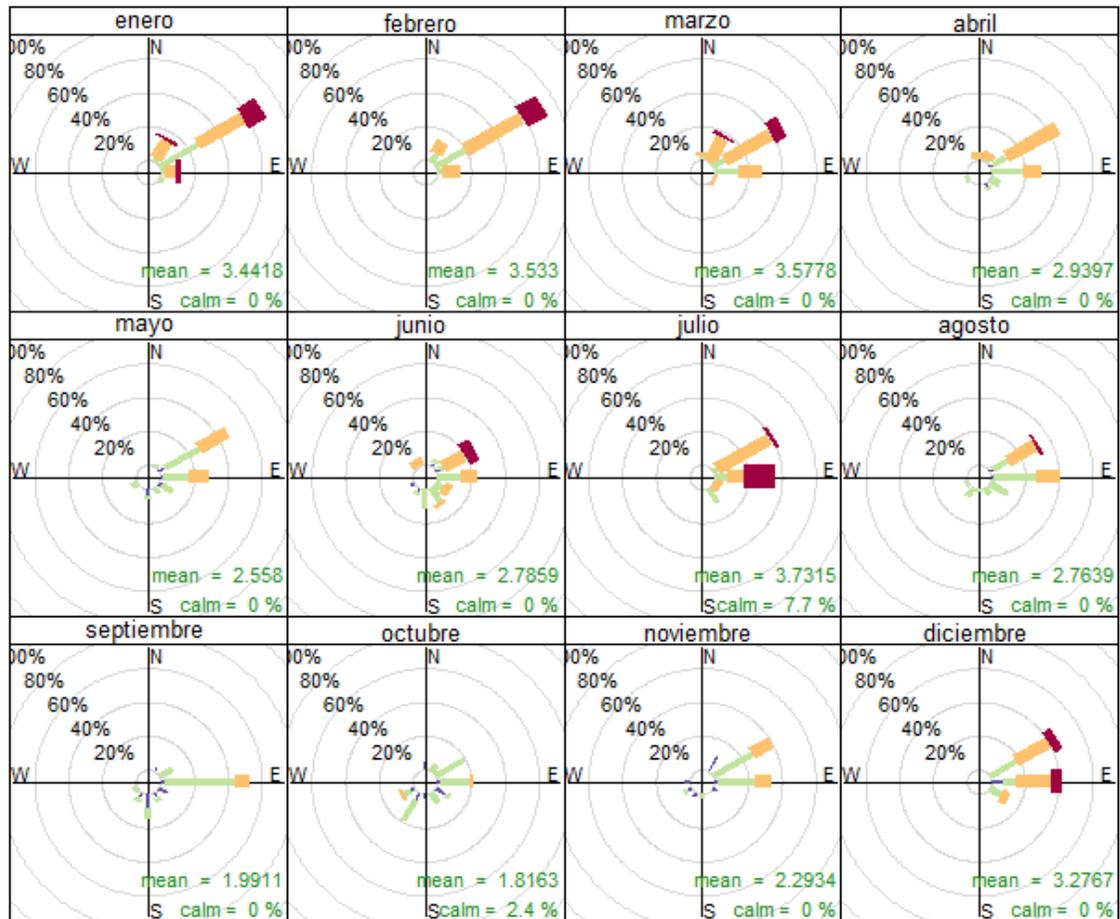
Las Casitas



Frequency of counts by wind direction (%)

Rosa de los vientos para periodos mensuales entre 2012 al 2016 en la estación Provincial.

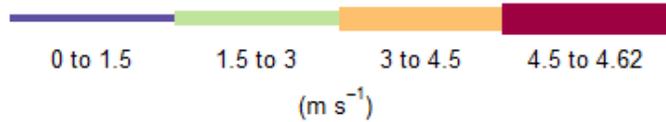
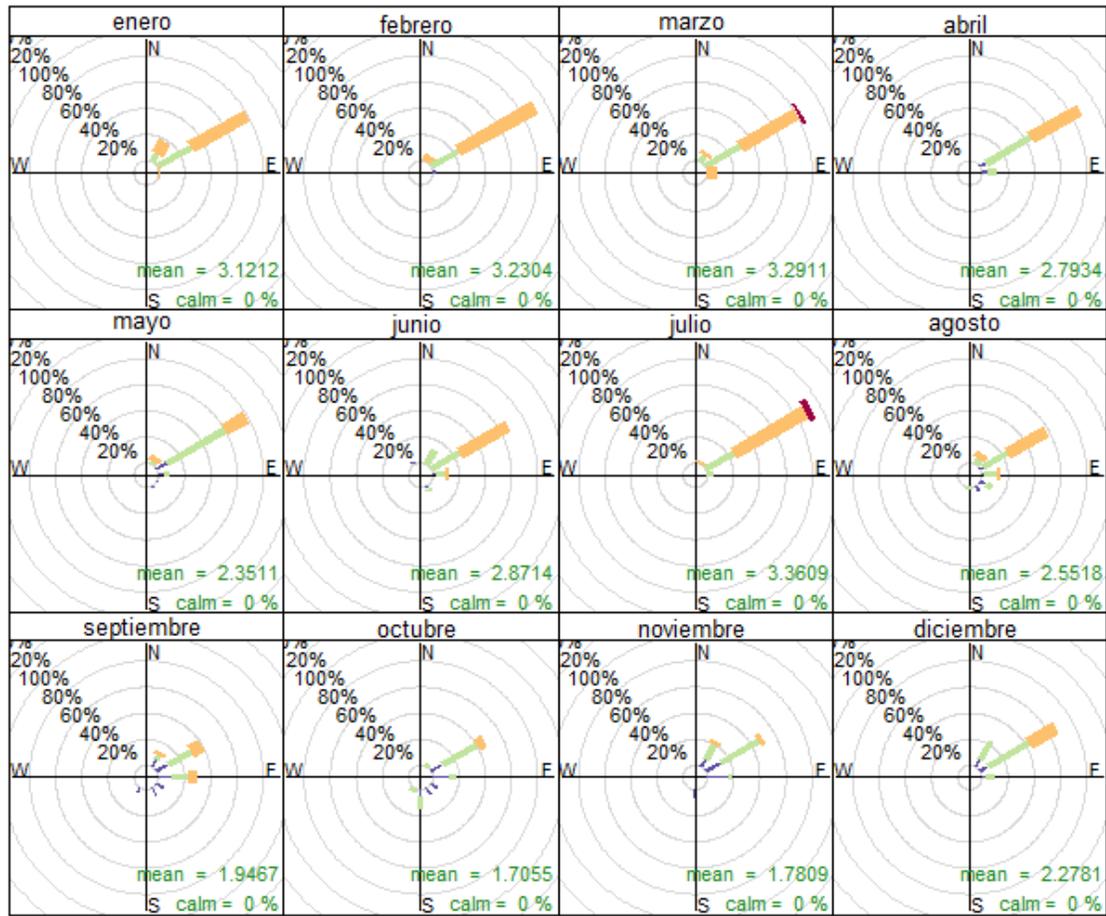
Provincial



Frequency of counts by wind direction (%)

Rosa de los vientos para periodos mensuales entre 2012 al 2016 en la estación Sol y Sombra.

Sol y Sombra



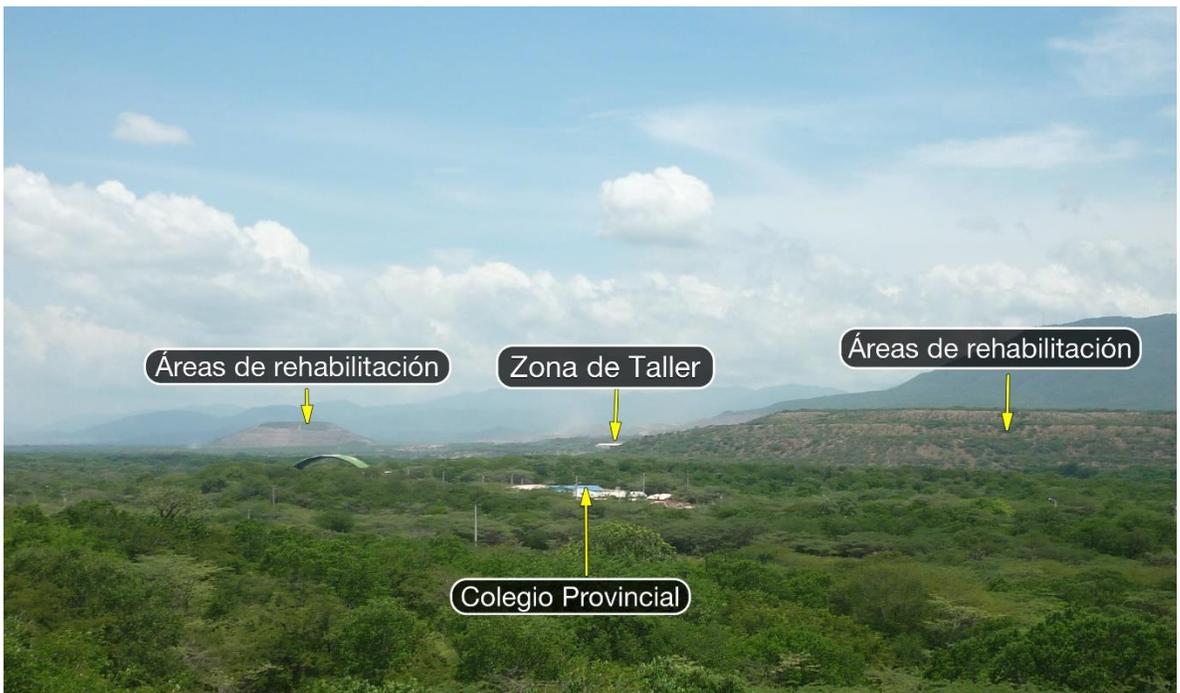
Frequency of counts by wind direction (%)

Anexo 5: Evidencia de actividades cerca de las estaciones de monitoreo de calidad de aire del cerrejón

- Barrancas



Provincial





Las casitas



Sol y Sombra

