

**ZONIFICACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS
EN BUCARAMANGA, SANTANDER. ÁREA JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN
AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA
(CDBM)**

Andrés Leonardo Rivera Valderrama

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL
PAMPLONA
2019**

**ZONIFICACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS
EN BUCARAMANGA, SANTANDER. ÁREA JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN
AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA
(CDMB)**

Andrés Leonardo Rivera Valderrama

Tesis presentada como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

**Director
M.Sc, Fidel Antonio Carvajal Suarez**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL
PAMPLONA
2019**

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado 1

Jurado 2

Pamplona 18 diciembre 2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a todas las personas que de una u otra manera estuvieron ahí apoyándome, creyeron en mi capacidad, guiado de la mano de Dios en todo momento de mi proceso en la universidad y en la culminación de este proyecto.

A mis padres Andrés Rivera y Yaneth Valderrama; a ellos que inagotablemente siempre han estado ahí para brindarme lo que necesito, y suplirme en las necesidades que he tenido, siempre dándome las fuerzas de seguir adelante, y consejos de motivación para culminar este proyecto de grado; mis hermanos quienes siempre han estado cuando los he necesitado.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia gracias a Dios porque cada día bendice mi vida con la hermosa oportunidad de estar y disfrutar al lado de las personas que sé que más me aman, y a las que yo sé que más amo en mi vida, gracias Dios por mi hermosa familia.

Gracias a mis padres que me guiaron y me dieron fuerzas para salir adelante, con su amor, comprensión y apoyo en los momentos difíciles. Han hecho de mí una persona con grandes valores y sueños, siempre orgulloso de ustedes.

Le agradezco a la Universidad de Pamplona por haberme permitido formarme y en ella, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta, fueron ustedes los responsables de realizar su pequeño aporte, que se verá reflejado en la culminación de mi paso por la Universidad.

Gracias a todos los que fueron mis compañeros de clase durante todos los niveles en la Universidad, ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral han aportado en un alto porcentaje mis ganas de seguir adelante en mi carrera profesional.

Agradezco a mi director el M.Sc. Fidel Antonio Carvajal Suarez por la confianza depositada en mí y su continuo apoyo. Gracias por su compromiso, estímulos, y en especial, por sus comentarios que han permitido orientar esta investigación en el camino correcto en los momentos de mayor incertidumbre.

Y para finalizar, también agradezco a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), por haber realizado la gestión de la información estadística de los datos a tratar en la investigación.

CONTENIDO

	pág.
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo General.	23
1.3.2 Objetivos específicos.	23
2 MARCO REFERENCIA.....	24
2.1 ANTECEDENTES.....	24
2.2 MARCO GEOGRÁFICO	26
2.1.1 Límites	27
2.1.2 Posición geográfica.....	27
2.1.3 Características generales del territorio.....	28
2.1.4 Climatología y superficie	28
2.1.5 Orografía.....	28
2.3 MARCO CONCEPTUAL	28
2.3.1 Atmósfera terrestre.....	28
2.3.2 Calidad del aire.....	29
2.3.3 Contaminantes atmosféricos.	30
2.3.4 Clasificación de los contaminantes atmosféricos.	30
2.3.5 Contaminantes primarios y contaminantes secundarios	31
2.3.6 Contaminantes criterio.....	31
2.3.7 Dispersión de los contaminantes en la atmósfera.....	35

2.3 MARCO LEGAL.....	35
2.3.1 Normatividad de la calidad del aire.	36
2.3.2 Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.	37
3 METODOLOGIA.....	39
3.1 TECNOLOGIAS APLICADAS.....	41
3.2 TRATAMIENTO E INTERPOLACION DE DATOS DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS.....	41
3.3 PROCEDIMIENTO METODOLOGICO	43
3.3.1 Interpolación con IDW y kriging.....	43
3.3.2 Creación de mapas Isopletas agrupados en clases o intervalos.	44
3.3.3 Comparación de resultados entre ambos métodos de interpolación.	46
3.3.4 Visualización de capa de diferencias	48
4 ANALISIS DE RESULTADOS	50
4.1 RESULTADOS VARIABLES METEREOLÓGICAS.....	50
4.1.1 Estación Floridablanca.	50
4.1.2 Estación Universidad Santander.....	52
4.1.3 Estación Neomundo.....	54
4.1.4 Estación Chimita.....	56
4.1.5 Estación Palo Negro.....	58
4.1.6 Estación San Antonio.....	60
4.1.7 Estación Floresta.....	62
4.1.8 Estación Ceylan.....	64
4.1.9 Estación Bucaramanga Ideam.....	66
4.2 RESULTADOS ESTACIONES DE LA CALIDAD DEL AIRE	68

4.2.1 Estación la Joya.....	68
4.2.2 Estación la Concordia.....	69
4.2.3 Estación San Miguel.....	70
4.2.4 Estación Norte.....	71
4.2.5 Estación Florida.....	72
4.2.6 Estación Cabecera.....	73
4.2.7 Estación Centro.....	74
4.2.8 Estación Ciudadela.....	75
4.3 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	76
4.4 RESULTADOS DE COMPARACIÓN DE OZONO Y PM10 CON LAS VARIABLES METEOROLOGICAS DE LAS ESTACIONES CENTRO Y JOYA.....	78
4.4.1 Comparación de ozono y variables meteorológicas de la estación Centro..	78
4.4.2 Comparación de ozono y variables meteorológicas de la estación Joya.....	81
4.4.3 Comparación de PM10 y variables meteorológicas de la estación Centro..	84
4.4.4 Comparación de PM10 y variables meteorológicas de la estación Joya.....	87
4.5 RESULTADOS RELACIÓN ENTRE VARIABLES METEREOLOGICAS Y CONTAMINANTES ATMOSFERICOS.....	89
4.6 ANALISIS DE PM10.....	90
4.6.1 Exploración estadística de los datos muestrales PM10.....	90
4.6.2 Análisis estructural PM10.....	91
4.6.3 Validacion del modelo de PM10.....	92
4.6.4 Mapas de interpolacion con IDW y kriging de PM10.....	95
4.6.5 Mapas de zonificación con IDW y kriging de PM10.....	97

4.6.6 Comparación de resultados entre ambos métodos de interpolación de PM10.....	101
4.6.7 Valoración de la situación de PM10 en Bucaramanga según ambos métodos de interpolación.....	103
4.7 ANALISIS DE OZONO	103
4.7.1 Exploración estadística de los datos muestrales de ozono.....	103
4.7.2 Análisis estructural.	105
4.7.3 Validacion de los modelos de ozono.	106
4.7.4 Mapas de interpolacion con idw y kriging de ozono.....	109
4.7.5 Mapas de zonificación con IDW y kriging de ozono.	111
4.7.6 Comparación de resultados entre ambos métodos de interpolación	115
4.7.7 Valoración de la situación de ozono en Bucaramanga según ambos métodos de interpolación.....	117
CONCLUSIONES	118
RECOMENDACIONES.....	119
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	120
ANEXOS	123
A. BASE DE DATOS MUESTRALES DE PM10 OBTENIDOS DE LA CDMB	123
B. BASE DE DATOS MUESTRALES DE OZONO OBTENIDOS DE LA CDMB	124

LISTA DE TABLAS

Tabla y título	pág.
Tabla 1. Contaminantes criterio y convencionales.....	31
Tabla 2. Normatividad de la calidad del aire en Colombia	36
Tabla 3. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire.....	38
Tabla 4. Ubicación y parámetros medidos por cada estación	39
Tabla 5. Coeficiente de correlación entre variables meteorológicas y ozono	76
Tabla 6. Coeficiente de correlación entre variables meteorológicas y PM10	77
Tabla 7. Estadísticos de los datos muestrales de PM10	90
Tabla 8. Estadísticos descriptivos de PM10 en las capas exportadas a ráster de los modelos	96
Tabla 9. Superficie ocupada por cada intervalo en los dos métodos de interpolación.....	101
Tabla 10. Estadísticos de los datos muestrales de ozono.....	104
Tabla 11. Estadísticos descriptivos de ozono en las capas exportadas a ráster.....	110
Tabla 12. Superficie ocupada por cada intervalo en los dos métodos de interpolación.....	115

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración y título	pág.
Ilustración 1. Ubicación Geográfica Bucaramanga, Santander-Colombia	27
Ilustración 2. Distribución espacial de las estaciones de contaminación.....	40
Ilustración 3. Elección de parámetros con kriging	43
Ilustración 4. Elección de parámetros con IDW	43
Ilustración 5. Especificaciones para recortar la capa kriging.....	44
Ilustración 6. Especificaciones para recortar la capa IDW	44
Ilustración 7. Ventana para definir los puntos de corte de los intervalos.....	45
Ilustración 8. Ventanas para calcular el número de píxeles en cada intervalo	46
Ilustración 9. Ventana de visualización del número de píxeles en Kriging	47
Ilustración 10. Ventana de visualización del número de píxeles en IDW	47
Ilustración 11. Ventana donde se visualiza la resta de ambas capas	47
Ilustración 12. Propiedades de la capa de diferencias.....	48
Ilustración 13. Estadísticos descriptivos de la capa de las diferencias.....	49
Ilustración 14. Precipitación estación Floridablanca	50
Ilustración 15. Humedad relativa estación Floridablanca	50
Ilustración 16. Radiación solar máxima estación Floridablanca	51
Ilustración 17. Rosa de los vientos de la estación Floridablanca	51
Ilustración 18. Humedad relativa estación Univ. Santander	52
Ilustración 19. Precipitación estación Univ. Santander	52
Ilustración 20. Temperatura estación Univ. Santander	53
Ilustración 21. Radiación solar máxima estación Univ. Santander.....	53
Ilustración 22. Rosa de los vientos estación Univ. Santander	53
Ilustración 23. Precipitación estación Neomundo.....	54
Ilustración 24. Humedad relativa estación Neomundo.....	54
Ilustración 25. Radiación solar estación Neomundo.....	55

Ilustración 26. Temperatura estación Neomundo.....	55
Ilustración 27. Rosa de los vientos estación Neomundo	56
Ilustración 28. Precipitación estación Chimita.....	56
Ilustración 29. Humedad relativa estación chimita	56
Ilustración 30. Temperatura estación chimita	57
Ilustración 31. Radiación solar estación chimita.....	57
Ilustración 32. Rosa de los vientos estación chimita	58
Ilustración 33. Precipitación estación Aeropuerto Palo Negro	58
Ilustración 34. Humedad relativa estación Aeropuerto Palo Negro	58
Ilustración 35. Temperatura estación Aeropuerto Palo Negro	59
Ilustración 36. Radiación solar estación Aeropuerto Palo Negro	59
Ilustración 37. Rosa de los vientos estación Aeropuerto Palo Negro.....	60
Ilustración 38. Humedad relativa estación San Antonio	60
Ilustración 39. Precipitación estación San Antonio	60
Ilustración 40. Radiación solar estación San Antonio.....	61
Ilustración 41. Rosa de los vientos estación San Antonio	61
Ilustración 42. Humedad relativa estación Floresta.....	62
Ilustración 43. Precipitación estación Floresta.....	62
Ilustración 44. Radiación solar estación Floresta	63
Ilustración 45. Rosa de los vientos estación Floresta	63
Ilustración 46. Humedad relativa estación Ceylan	64
Ilustración 47. Precipitación estación Ceylan.....	64
Ilustración 48. Radiación solar estación Ceylan	65
Ilustración 49. Rosa de los vientos estación Ceylan.....	65
Ilustración 50. Precipitación estación Bucaramanga Ideam.....	66
Ilustración 51. Humedad relativa estación Bucaramanga Ideam.....	66
Ilustración 52. Radiación solar estación Bucaramanga Ideam.....	67
Ilustración 53. Rosa de los vientos estación Bucaramanga Ideam	67
Ilustración 54. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación la Joya	68

Ilustración 55. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación la Concordia.....	69
Ilustración 56. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación San Miguel	70
Ilustración 57. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación Norte	71
Ilustración 58. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación Florida	72
Ilustración 59. Comportamiento del ozono y PM10 en la estación Cabecera	73
Ilustración 60. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación Centro	74
Ilustración 61. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación Ciudadela	75
Ilustración 62. Comparación entre Humedad relativa y ozono.....	78
Ilustración 63. Comparación entre precipitación y ozono.....	78
Ilustración 64. Comparación entre radiación solar y ozono.....	79
Ilustración 65. Comparación entre temperatura y ozono.....	79
Ilustración 66. Comparación entre velocidad del viento y ozono	80
Ilustración 67. Comportamiento entre la dirección del viento y ozono.....	80
Ilustración 68. Comparación entre precipitación y ozono.....	81
Ilustración 69. Comparación entre Humedad relativa y ozono.....	81
Ilustración 70. Comparación entre temperatura y ozono.....	82
Ilustración 71. Comparación entre radiación solar y ozono.....	82
Ilustración 72. Comparación entre dirección del viento y ozono.....	83
Ilustración 73. Comparación entre velocidad del viento y ozono	83
Ilustración 74. Comparación entre precipitación y PM10	84
Ilustración 75. Comparación entre humedad relativa y PM10.....	84
Ilustración 76. Comparación entre temperatura y PM10	85
Ilustración 77. Comparación entre radiación solar y PM10	85
Ilustración 78. Comparación entre velocidad del viento y PM10.....	86
Ilustración 79. Comparación entre dirección del viento y PM10	86
Ilustración 80. Comparación entre precipitación y PM10	87
Ilustración 81. Comparación entre humedad relativa y PM10.....	87
Ilustración 82. Comparación entre radiación solar y PM10	88
Ilustración 83. Comparación entre temperatura y PM10	88

Ilustración 84. Comparación entre dirección del viento a 10m y PM10.....	89
Ilustración 85. Comparación entre velocidad del viento a 10m y PM10	89
Ilustración 86. Análisis exploratorio de datos muestrales de PM10	91
Ilustración 87. Superficie estimada con el GPI de segundo grado (A) y ajuste del semivariograma teórico (B) a los datos de PM10.....	92
Ilustración 88. Dispersión de los valores predichos frente a los valores muestrales de PM10 por cada punto.....	93
Ilustración 89. Errores de la validación	93
Ilustración 90. Análisis exploratorio de datos muestrales de ozono.....	105
Ilustración 91. Superficie estimada con el GPI de tercer grado (A) y ajuste del semivariograma teórico (B) a los datos de ozono	106
Ilustración 92. Dispersión de los valores predichos frente a los valores muestrales de ozono por cada punto.....	107
Ilustración 93. Errores de la validación	108

LISTA DE MAPAS

Mapa y título	pág.
Mapa 1. Interpolación IDW de PM10	95
Mapa 2. Interpolación kriging de PM10.....	96
Mapa 3. Zonificación de PM10 con IDW	97
Mapa 4. Zonificación de PM10 con kriging.....	98
Mapa 5. Diferencias entre kriging y IDW de PM10.....	102
Mapa 6. Interpolación IDW de ozono.....	109
Mapa 7. Interpolación kriging de ozono	110
Mapa 8. Zonificación de ozono con IDW.....	111
Mapa 9. Zonificación de ozono con kriging	112
Mapa 10. Diferencias entre kriging y IDW de ozono	116

RESUMEN

Las consecuencias del desarrollo industrial que experimenta a diario la humanidad traen consigo una serie de eventos que involucran de una u otra forma el medio ambiente, y con ello, la calidad del aire, entre otros aspectos. Por tal razón, cada vez es más frecuente el interés por conocer e identificar el estado actual del aire, con el fin de evaluar las causas y establecer medidas que minimicen y contribuyan a solucionar el problema.

Con base en esto, el presente estudio busca zonificar la concentración de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Bucaramanga, Santander-Colombia. Para ello se estudió el comportamiento de las variables meteorológicas precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar. Seguidamente, se identificaron las estaciones de monitoreo de la calidad del aire presentes en el área de estudio a través del Sistema de Vigilancia de la Calidad de Aire (SVCA) que opera la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB); entidad encargada de suministrar la información histórica de la base de datos de los contaminantes atmosféricos

Para el procesamiento de la información de los contaminantes se empleó el software ArcGIS con la aplicación de dos métodos de interpolación espacial diferentes, uno determinista, exacto y local, el IDW que está basado en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática, y otro un método geoestadístico y analítico, el kriging ordinario, que tiene en cuenta la correlación espacial de la variable a interpolar, por medio de estos métodos se realizó el análisis de dispersión de contaminantes atmosféricos y una estimación más detallada de la distribución espacial de dichos contaminantes en aquellas zonas carentes de datos.

A demás se logró una identificación de los puntos críticos de contaminación en la

ciudad de Bucaramanga, Santander. Se realiza la proyección de la dispersión de contaminantes atmosféricos junto con sus respectivas medidas de gestión, esto a partir de la normativa que realiza la verificación del cumplimiento de los niveles máximos permisibles dispuestos en la norma de la calidad del aire Resolución No. 2254 del 01 de noviembre de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

Palabras clave: Interpolación, contaminación atmosférica, material particulado, zonificar, ozono.

ABSTRACT

The consequences of the industrial development that humanity experiences daily bring with them a series of events that involve in one way or another the environment, and with it, air quality, among other aspects. For this reason, it is more and more frequent the interest to know and identify the current state of the air, in order to evaluate the causes and to establish measures that minimize and contribute to solve the problem.

Based on this, this study seeks to interpolate the dispersion of atmospheric pollutants in the city of Bucaramanga, Santander-Colombia. For this purpose, the behavior of the meteorological variables precipitation, temperature, wind speed, relative humidity and solar radiation were studied. Next, the air quality monitoring stations present in the study area were identified through the Air Quality Surveillance System (SVCA) operated by the Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB); entity in charge of providing the historical information of the database of atmospheric pollutants.

The ArcGIS software was used to process information on pollutants using two different spatial interpolation methods, one deterministic, exact and local, the IDW which is based on the inverse of the elevated distance to a mathematical power, and the other a geostatistical and analytical method, the ordinary kriging, which takes into account the spatial correlation of the variable to be interpolated, by means of these methods the dispersion analysis of atmospheric pollutants and a more detailed estimation of the spatial distribution of these pollutants in those areas lacking data was carried out.

In addition, an identification of the critical pollution points in the city of Bucaramanga, Santander was achieved. The projection of the dispersion of atmospheric

pollutants together with their respective management measures is carried out, starting from the regulations that carry out the verification of compliance with the maximum permissible levels set forth in the air quality standard Resolution No. 2254 of 01 November 2017 of the Ministry of Environment and Sustainable Development (MADS).

Keywords: Interpolation, air pollution, particulate matter, zoning, ozone.

INTRODUCCION

La presente investigación presenta la zonificación de la concentración de contaminantes atmosféricos en Bucaramanga, Santander. Área jurisdicción de la corporación Autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB). A medida que los procesos de industrialización y de urbanización territorial se han ido desarrollando han provocado una degradación de la calidad del aire, convirtiéndose la contaminación atmosférica de las ciudades en un problema de salud pública universal, y en una de las prioridades mundiales más importantes según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (1). En la ciudad de Bucaramanga la ciudad la CDMB entidad encargada del monitoreo de la calidad del aire, debido a que cada estación solo genera indicadores específicos de contaminación, es necesario la creación de mapas de zonificación de la concentración de contaminantes que contengan la suficiente validación para extrapolar espacialmente los datos en toda el área de estudio.

Inicialmente se desarrolló el estudio de la base de datos de las variables meteorológicas precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar en la zona de estudio para determinar su comportamiento y la relación que presentan con las concentraciones de los contaminantes atmosféricos. Para el procesamiento de la información de los datos de contaminantes suministrados por la CDMB se empleó el software ArcGIS ejecutando dos métodos de interpolación diferentes, uno determinista, exacto y local que es la media por el inverso de la distancia (IDW), y otro un método geoestadístico y analítico, el kriging ordinario, que tiene en cuenta la correlación espacial de la variable a interpolar; por medio de estos métodos se creó mapas de zonificación del territorio que determinaron las zonas de alta, mediana y baja concentración de contaminantes atmosféricos, identificadas las zonas críticas de contaminación se evaluaron a partir de la normativa que realiza la verificación del cumplimiento de los niveles máximos permisibles dispuestos en la norma de la calidad del aire Resolución No. 2254 del 01 de noviembre de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (2).

A partir de los resultados obtenidos por los métodos de IDW y kriging se evidencia una diferencia en la estimación de los mapas generados de la variable a interpolar, donde el modelado realizado con el kriging, devalúa valores extremos (altos y bajos), de cara a obtener un menor error en la estimación, lo que produce un suavizado generalizado. Por el contrario, el modelado con IDW, tiende a crear puntos de concentración o a formar islas en torno a los puntos muestrales.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Bucaramanga es una ciudad en crecimiento poblacional e industrial; este crecimiento trae consigo el aumento de emisiones contaminantes a la atmósfera. Es por ello que en la ciudad el SVCA que opera la CDMB entidad encargada del monitoreo de la calidad del aire, cuenta con 8 estaciones que realizan la medición de parámetros O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO_x y CO. Debido a que cada estación solo genera indicadores específicos de contaminación, en este proyecto solo estudio el ozono y el PM₁₀, en donde es necesario estudiar si el comportamiento de las variables meteorológicas intervienen en la circulación atmosférica, que ayuda a la dispersión de los contaminantes, además es de gran importancia la creación de un mapa zonificación que contenga la suficiente validación para extrapolar espacialmente los datos de toda la ciudad.

Es por eso que a nivel mundial se comenzó de manera creciente, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para representar de manera correcta la distribución espacial de determinado criterio, a nivel nacional como Torrecilla et al. (2010) (3) en su estudio de Interpolación espacial y visualización cartográfica para el análisis de la justicia ambiental y a nivel local como Londoño et al. (2015) (4) en su estudio de Caracterización espacial de PM₁₀ en la ciudad de Medellín mediante modelos geoestadísticos.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Empleando el software ArcGIS para el procesamiento de la base de datos de contaminantes suministrados por la CDMB, donde se ejecutó dos métodos de interpolación diferentes, uno determinista, exacto y local que es la media por el inverso de la distancia (IDW), y otro un método geoestadístico y analítico, el kriging ordinario, que tiene en cuenta la correlación espacial de la variable a interpolar. Por medio de estos métodos se realizará el análisis de concentración de contaminantes atmosféricos y una estimación más detallada de

los mismos en aquellas zonas carentes de datos, creando mapas de zonificación del territorio que determinan zonas de alta, mediana y baja concentración de contaminantes atmosféricos generando sus respectivas medidas de gestión ambiental, esto a partir de la normativa que realiza la verificación del cumplimiento de los niveles máximos permisibles dispuestos en la norma de la calidad del aire Resolución No. 2254 del 01 de noviembre de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General.

Zonificar la concentración de contaminantes atmosféricos de Bucaramanga, Santander. Área jurisdicción de la corporación Autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB)

1.3.2 Objetivos específicos.

- Estudiar el comportamiento de las variables meteorológicas precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar en la zona de estudio.
- Analizar la información estadística de la concentración de los contaminantes atmosféricos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire de la CDMB del área de Bucaramanga, Santander.
- Elaborar mapas de concentración de contaminantes utilizando las metodologías de IDW-PID (Media ponderada por el inverso de la distancia) y Kriging en el software ArcGIS para la zona de estudio.
- Evaluar mediante la norma de la calidad del aire para identificar puntos críticos de contaminación atmosférica.

2 MARCO REFERENCIA

2.1 ANTECEDENTES

La contaminación del aire comienza cuando el hombre aparece en la Tierra y empieza a utilizar el fuego. En aquella época el hombre vivía en armonía con su entorno, pero hace aproximadamente diez mil años, el hombre se vuelve sedentario e inicia la manipulación de los elementos de su entorno lo que ocasiona que un gran número de personas empiecen a vivir juntas y a utilizar carbón en lugar de leña, en donde percibieron como el humo y los gases contaminaban gran parte del aire que los rodeaba (López, 2011) (5).

En el estudio realizado del 2012 por Franco menciona que, para alcanzar un escenario de sostenibilidad urbana, una de las problemáticas ambientales de mayor impacto es la contaminación atmosférica (6). El diagnóstico de la condición de calidad del aire en la ciudad es contundente en describir la gravedad del problema y sus implicaciones en la competitividad de la ciudad. Para lograr contrarrestar estas consecuencias, se debe contar con personal calificado para generar medidas de control y mitigación en la política ambiental de esta problemática.

Según Tyler et al. (2013) Colombia todavía cuenta con retos importantes en temas ambientales; si bien se han implementado medidas para tener un control y un seguimiento más efectivo, las autoridades ambientales y los entes de control tienen falencias frenan las medidas ambientales (7). El tema económico es un punto clave en los países en desarrollo por lo que es necesario tomar medidas acordes con las necesidades prioritarias de la sociedad. Dentro de los retos que se tienen en Colombia en calidad del aire está el mejorar las condiciones del combustible, buscar nuevas alternativas de energía acordes con las necesidades de la ciudad, implementar un sistema de mantenimiento y control estandarizado de calidad del aire en todas las ciudades del país, mejorar los sistemas de transporte, entre otros. En su estudio Cañada (2012) generó estimaciones espaciales de contaminantes como el dióxido de azufre y las partículas en suspensión respectivamente

Este describe y valora la situación y los cambios producidos en los niveles de NO₂ en Madrid, en el periodo comprendido entre 2001-2011, contemplando si el cambio en la ubicación y en la reducción del número de estaciones que se produce durante ese periodo afecta decisivamente a los resultados de los valores estimados de NO₂ mediante interpolación.

Mesnard (2013) reseña abundantes estudios metodológicos sobre el problema de la interpolación espacial con la técnica IDW, recogiendo la diversidad de radios de distancia que se han adoptado para generar estimaciones en puntos nuevos a partir de los datos de las estaciones de medición, desde unas decenas de metros hasta más de 100 km, así como la variable número de estaciones incluidas en la fórmula de cálculo (desde tres o cuatro hasta diez) (8). Adicionalmente, y más en concreto, ha examinado las cuestiones relacionadas con el exponente afectando a la distancia (y por ende a los pesos usados en la fórmula) para estimar niveles de contaminación de diversos tipos tales como las radiaciones electromagnéticas, polución en ríos, penachos derivados de focos puntuales, nubes explosivas, etc.

Babak y Deutsch (2009) realizan una nueva aportación al método IDW para encontrar el óptimo valor de p y el óptimo número de vecinos usados en la estimación. Consiste en tener en cuenta una serie temporal estacionaria de la media y de la varianza, así como también en aplicar un modelo de variograma. Luego realizan un estudio comparativo del Kriging frente al IDW y concluyen con la preferencia del segundo. Una diferencia crucial en los métodos de interpolación es el modo de determinar los pesos para los puntos muestrales. Si se utilizan métodos deterministas, como la media ponderada por el inverso de la distancia (IDW), los pesos dependen de la distancia entre las estaciones, elevándose esa distancia a un exponente arbitrario e independiente con respecto a los datos, aunque en la realidad no hay tal indefinición, pues su valor depende de factores como la orografía, los vientos dominantes, etc. que condicionan la concentración del contaminante. Por el contrario, Mesnard, (2013) dice que el Kriging, denominado interpolador óptimo, utiliza el semivariograma para determinar los pesos, que dependen de la autocorrelación espacial de los datos medidos en las estaciones utilizadas, por lo tanto, los pesos son dependientes del valor de los propios datos.

Son muchos los autores que comparan los diferentes métodos de interpolación o estimación espacial (Hengl, 2009; Babak y Deutsch, 2009; Mueller et al., 2004; Wong et al., 2004; Diem y Comrie, 2002). Li y Heap (2008, 2011) realizan una revisión de estos métodos y señalan los factores que más les afectan: la densidad del muestreo, la distribución espacial de la muestra, el agrupamiento, el tipo de superficie, la varianza de los datos, la normalidad, la resolución espacial buscada, etc.

2.2 MARCO GEOGRÁFICO

La ciudad de Bucaramanga se encuentra ubicada al nororiente del país sobre la Cordillera Oriental, en el departamento de Santander. Cuenta con 528.575 habitantes (DANE, 2018) (9) y, junto con Floridablanca, Girón y Piedecuesta, conforman el área metropolitana de Bucaramanga con un total de 1 141 694 habitantes, siendo la quinta aglomeración urbana más poblada del país. Cuenta con un área de 165 km².

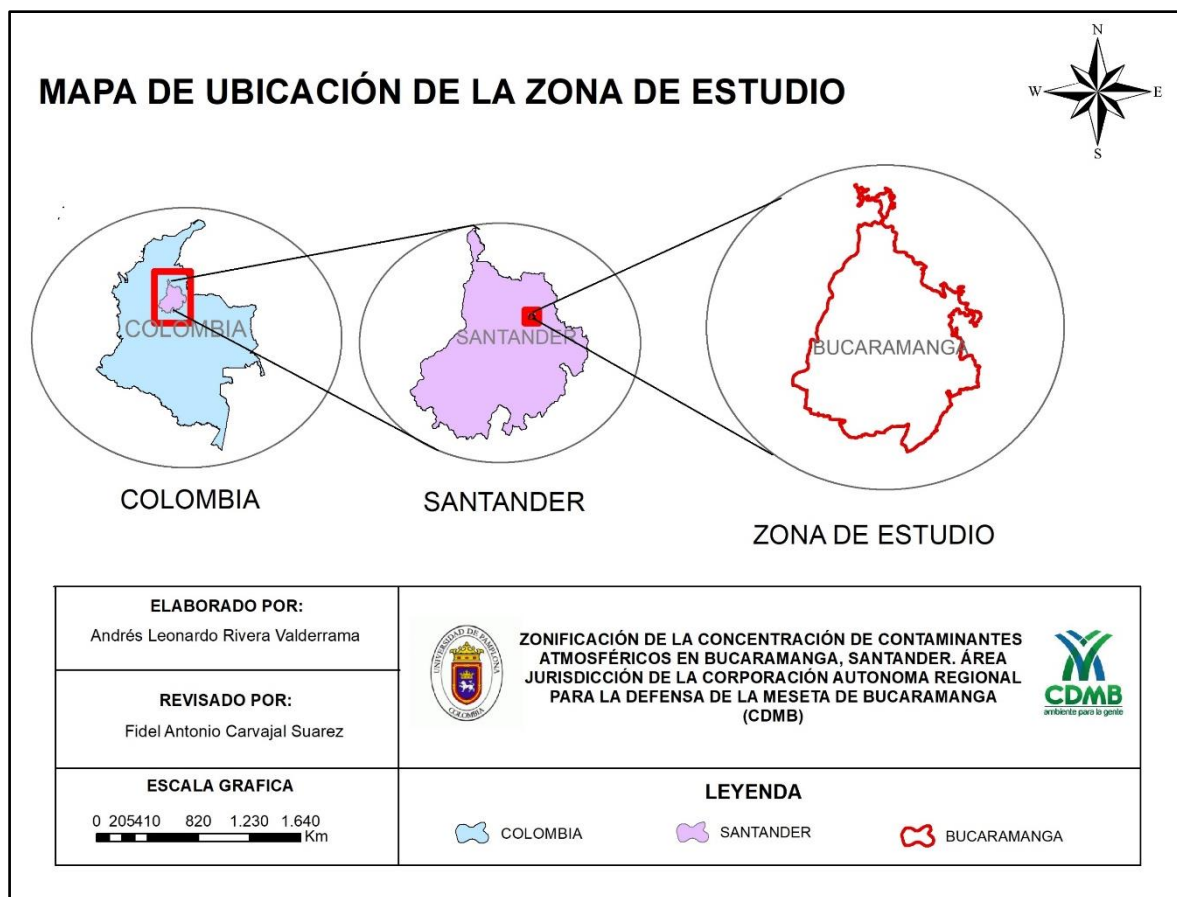


Ilustración 1. Ubicación Geográfica Bucaramanga, Santander-Colombia

Fuente: Rivera, 2019

2.1.1 Límites

Bucaramanga, capital del departamento de Santander limita por el Norte con el municipio de Rionegro; por el Oriente con los municipios de Matanza, Charta y Tona; por el Sur con el municipio de Floridablanca y; por el Occidente con el municipio de Girón.

2.1.2 Posición geográfica

Bucaramanga se encuentra en una terraza inclinada de la Cordillera Oriental a los 7° 08' de latitud norte con respecto al Meridiano de Bogotá y 73° 08' de longitud al Oeste de Greenwich.

2.1.3 Características generales del territorio

Bucaramanga cuenta con 528.575 habitantes (DANE, 2017) y, junto con Floridablanca, Girón y Piedecuesta, conforman el área metropolitana de Bucaramanga con un total de 1 141 694 habitantes, siendo la quinta aglomeración urbana más poblada del país.

2.1.4 Climatología y superficie

El área municipal es de 165 kilómetros cuadrados, su altura sobre el nivel del mar es de 959m y sus pisos térmicos se distribuyen en: cálido 55 kilómetros cuadrados: medio 100 kilómetros cuadrados y frío 10 kilómetros cuadrados. Su temperatura media es 23°C y su precipitación media anual es de 1.041mm.

2.1.5 Orografía

La topografía de Bucaramanga es en promedio un 15% plana, 30% ondulada y el restante 55% es quebrada. Tres grandes cerros se destacan a lo largo del territorio: Morro Rico, Alto de San José y El Cacique

2.3 MARCO CONCEPTUAL

2.3.1 Atmósfera terrestre.

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que rodea el planeta, contiene las sustancias necesarias para la vida y el desarrollo del medio ambiente. Su composición se divide en los gases constantes de oxígeno (20.9%), el nitrógeno (78.1%) y el argón (0.9%) y los gases variables en menor proporción; como el vapor de agua, el óxido nitroso, el metano, el ozono y el dióxido de carbono. Otro compuesto que se encuentra en un pequeño porcentaje es el material particulado como partículas de humo, residuos de humo, sal del océano, bacterias,

esporas, semillas, cenizas volcánicas y partículas meteóricas. La atmósfera protege la superficie terrestre de las radiaciones solares y del cosmos, que absorbe total o parcialmente (Pabón et al. 1998) (10).

2.3.2 Calidad del aire.

La calidad del aire hace referencia al estado en que se encuentra la atmósfera al nivel de la troposfera para poder garantizar la salud pública y una buena calidad de vida, este estado depende de la composición del aire y de la presencia o ausencia de sustancias y de su nivel de concentración al cual se manifiestan como tóxicas o nocivas para la salud humana y el medio ambiente, así como de los factores climáticos y físicos de las regiones específicas (Alemany, 2014) (11).

Cuando se habla de la calidad de aire se hace referencia al concepto de inmisión el cual es definido según la Resolución No. 2254 del 01 de noviembre de 2017 del MAVDT (quien es la entidad encargada en Colombia de establecer, regular y controlar los niveles de concentración máximos permitidos de cada contaminante) como; la transferencia de contaminantes de la atmósfera a un “receptor” de tal manera que el aire inmiscible es aquel que es respirable a nivel de la troposfera y que debe estar “constituido por una mezcla gaseosa cuya composición normal es de por lo menos 20% de oxígeno, 77% de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua en relación volumétrica” de acuerdo a la misma resolución.

2.3.3 Contaminantes atmosféricos.

De acuerdo con la Resolución No. 2254 del 01 de noviembre de 2017 del MAVDT los contaminantes atmosféricos son; “fenómenos físicos o sustancias, en estado sólido, líquido o gaseoso, que por efectos de acumulación o concentración en el aire son causantes o generadores de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana, que solos o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de las mismas.

2.3.4 Clasificación de los contaminantes atmosféricos.

Los contaminantes atmosféricos pueden ser clasificados en principio por cómo se generan y esto es como contaminantes atmosféricos naturales, producidos por fuentes como volcanes, incendios forestales, partículas ultrafinas creadas por la erosión del suelo y el metano formado por los procesos orgánicos. La otra forma de generar contaminación atmosférica es de origen antropogénico, los cuales son producidos partir de actividades ligadas al desarrollo socioeconómico de una población, y en estos últimos se destaca el aporte desde fuentes fijas o puntuales; tales como fábricas, centrales termoeléctricas, refinerías y establecimientos industriales en los que principalmente se desarrollan procesos de combustión y que están situadas en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa, y también se destaca el aporte de contaminantes desde fuentes móviles tales como automotores o vehículos que involucran quema de combustibles fósiles y por razón de su uso o propósito son susceptibles de desplazamiento contribuyendo de esta manera a la dispersión de contaminantes en la atmosfera (Marcano, 2014) (12).

2.3.5 Contaminantes primarios y contaminantes secundarios

Los contaminantes atmosféricos también se pueden clasificar como contaminantes primarios o contaminantes secundarios y esta clasificación esta específicamente relacionada con la generación directa o indirecta de estos, así con los contaminantes primarios se hace referencia a aquellos productos que son generados directamente en los procesos naturales o antropogénicos mientras que con los contaminantes secundarios se hace referencia a compuestos generados producto de la reacción de los contaminantes primarios entre ellos mismos o con componentes de la atmosfera y en la mayoría de los casos inducidos por fenómenos de radiación solar.

2.3.6 Contaminantes criterio

Varios países han adoptado otro tipo de clasificación de los contaminantes atmosféricos, entre ellos Colombia, como lo demuestran los resultados de toxicidad en los estudios realizados por la protección ambiental de Estados Unidos (EPA: por sus siglas en ingles), de las sustancias normalmente encontradas en el aire, se identificaron algunas con mayor efecto perjudicial para la salud y el bienestar de los seres humanos y basados en sus concentraciones en el ambiente se pudo establecer un criterio de calidad del aire y permitió demostrar en estos resultados los niveles permisibles que protegen la salud y el medio ambiente (ver tabla 1). Los otros componentes del aire que en las evaluaciones exhibían bajos niveles de toxicidad se denominaron entonces contaminantes no criterio o contaminantes convencionales.

Tabla 1. Contaminantes criterio y convencionales

Contaminantes	
Criterio	Convencionales
PST (Partículas Suspendedas Totales)	SO ₃
PM ₁₀ (Material Particulado Menor a 10 Micras)	H ₂ S
PM 2.5 (Material Particulado Menor a 2,5 Micras)	MSO ₄ /MNO ₃ (formula general de los sulfatos y nitratos)

SO ₂ (dióxido de azufre)	NO
NO ₂ (dióxido de nitrógeno)	Compuestos orgánicos
O ₃ (Ozono)	HCl
CO (monóxido de carbono)	HF
Pb (plomo)	Formados en reacciones fotoquímicas

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

2.3.6.1 Material particulado

Es aquella fracción sólida que provee al aire características de masa y densidad, son de tamaño menor o igual a 500 μm de radio aerodinámico y que, en sus fracciones más diminutas, 10 angstrom a 10000 angstrom, se encuentra en forma de aerosol (13). Según la Agencia de Protección del Medio Ambiente (en inglés, Environmental Protection Agency; más conocida por las siglas EPA) (14) la presencia del material particulado en el aire esta demarcada por procesos naturales, como incendios forestales, ciclones, polinización de las plantas, pero también por procesos de tipo antropogénico que involucran principalmente la quema de combustibles o la incineración de cualquier otro tipo de sustancia, se incluye además las aspersiones y fertilización en el ámbito agrícola.

Las partículas pueden ser directamente emitidas de la fuente, como partículas primarias o formarse como contaminantes secundarios cuando reaccionan algunos gases en la atmósfera tales como los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, el amoníaco, los compuestos orgánicos. El material particulado en aire se puede determinar como partículas suspendidas totales (PST) y en este se establece la concentración de partículas de hasta 100 μm de radio aerodinámico por metro cubico de aire. Sin embargo, en la actualidad la regulación ambiental ha prestado mayor atención a las partículas menores que poseen la característica de que no se sedimentan en periodos cortos, sino que permanecen suspendidas en el aire debido a su tamaño y densidad, y además son más fácilmente respirables, es así que a nivel ambiental se determinan en estudios de calidad la concentración de material particulado de 31 radio menor a 10 μm (PM10). De la misma

manera, pero sin exigencias legales aun en Colombia se ha empezado prestar atención a las partículas finas (< a 2.5 μm de radio) y ultrafinas (< 1.0 μm de radio) (15).

2.3.6.2 Ozono (O₃).

El O₃ es un compuesto gaseoso, incoloro a bajas concentraciones y altamente oxidante, es un contaminante secundario de origen fotoquímico en la troposfera; por lo que su formación depende de la radiación solar, así como de sus precursores NO_x y compuestos orgánicos volátiles (COVs). El O₃ es un gas protector en la estratosfera porque absorbe las fracciones B y C de la radiación ultravioleta pero en la troposfera es considerado destructor debido a su alto nivel de oxidación (E₀ = 2,08 V., el mayor después del flúor E₀ = 2,87 V.), este contaminante es el principal responsable de la oxidación de compuestos que contribuyen con la formación del smog fotoquímico, lluvia ácida y otros procesos químicos en la atmósfera, que causan deterioro a los ecosistemas acuáticos y terrestres. El ozono troposférico puede empeorar las enfermedades pulmonares crónicas tales como el enfisema y la bronquitis y reducir la capacidad del sistema inmunológico para defenderse de las infecciones bacterianas (16).

2.3.6.3 Dióxido de azufre (SO₂)

El SO₂ hace referencia a la mezcla de compuestos gaseosos de óxido de azufre (SO_x), estos son gases incoloros que se producen por la oxidación del azufre en presencia de oxígeno, por lo que la fuente primaria de este tipo de contaminante es la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre como el carbón y el combustóleo. Los compuestos de óxidos de azufre se producen de forma antropogénica, así como también a partir de erupciones volcánicas (17).

La exposición a SO₂ produce irritación e inflamación aguda o crónica de las mucosas conjuntival y respiratoria, además estos óxidos pueden transformarse en otros productos, tales como partículas finas de sulfato y niebla de ácido sulfúrico (H₂SO₄), dando como resultado la generación de lluvia ácida (pH < 5.0), lo cual aumenta los riesgos en la salud del

ser humano y los daños ambientales 32 (afectación agua, suelo, fauna y vegetación). Además, frente a la salud humana se ha establecido que bajo la combinación de partículas (MP) y SO₄, suele aumentar el riesgo en la salud ya que actúan de manera sinérgica produciendo un efecto combinado mucho más nocivo que el efecto individual al incrementar la morbilidad y mortalidad de enfermos crónicos del corazón y vías respiratorias, en individuos asmáticos puede producir bronco-constricción.

2.3.6.4 Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El NO₂ hace referencia a la mezcla de compuestos gaseosos de óxido de nitrógeno (NO_x), en general son contaminantes primarios generados en la combustión de combustibles minerales. De esta manera las principales fuentes antropogénicas de NO_x, son los vehículos automotores, procesos de generación de carbón, petróleo o gas natural, plantas de generación de electricidad, comercialmente al hacer reaccionar el ácido nítrico 33 con metales o con celulosa y toda fuente industrial y residencial en la que haya quema de combustibles. Los NO_x pueden formarse también naturalmente, a causa de incendios forestales, por la descomposición bacteriana de nitratos orgánicos u oxidación del amonio (18).

La Consejería de Sanidad y Política Social de la Región de Murcia describe al NO₂ como un indicador de la calidad de aire y un factor de riesgo en enfermedades respiratorias porque su exposición a largo plazo ha mostrado asociaciones importantes con problemas de percepción olfativa, molestias respiratorias, dolores respiratorios agudos y edema pulmonar, establece la inhibición de la depuración mucociliar, la fagocitosis, así como una disminución de la función pulmonar e inmunológica produciendo una disminución de la resistencia del pulmón ante las infecciones, afectando, por lo tanto, especialmente a las personas asmáticas, Se ha demostrado también que cuando se supera una concentración media de NO₂ de 190 µg/m³ (0,1 ppm) en el 40% de los días de exposición, aumenta la frecuencia de las infecciones de las vías respiratorias, se provocan daños al parénquima pulmonar, e incluso ante exposiciones crónicas a concentraciones bajas el resultado es la

aparición de cambios patológicos semejantes a los del enfisema pulmonar. En un artículo sobre el dióxido de nitrógeno realiza

2.3.7 Dispersión de los contaminantes en la atmósfera.

La dispersión de contaminantes atmosféricos es la forma como se mezclan los gases generados por las fuentes móviles o fijas con los gases que se encuentran en la atmosfera y de acuerdo con los cambios meteorológicos del lugar se esparcen en una dirección o se concentran en el lugar de origen. La dispersión de la contaminación atmosférica también puede ser dada por variaciones globales o locales según sea la topografía del lugar de incidencia. El viento puede desplazar los contaminantes atmosféricos haciendo que su concentración sea menor en un área determinado.

La estabilidad atmosférica es cuando el aire más cálido que se encuentra a nivel de la superficie sube, se mezcla con el aire más frío y genera dispersión de contaminantes atmosféricos. La inversión térmica hace lo contrario a la estabilidad atmosférica debido a que una fuente de aire caliente se encuentra por encima de una fría lo que bloquea la salida de la contaminación atmosférica en la superficie terrestre. La precipitación genera un efecto beneficioso porque se mezcla con el aire y disuelve los gases contaminantes. La concentración de contaminación atmosférica es más mayor en ciudades con edificios altos o con áreas montañosas ya que su dispersión es bloqueada y los volúmenes tienden a hacerse mayores (19).

2.3 MARCO LEGAL

El consejo Nacional de Política Económica y Social aprobó el documento CONPES 3943 (Consejo Nacional de Política Económica y Social) en el año 2018, este documento crea una política para el mejoramiento de la calidad del aire a nivel nacional donde abordó temas estratégicos como la modernización del transporte, la gestión del riesgo por contaminación del aire, la investigación, la participación ciudadana, entre otros. A demás propone acciones definidas con base en las necesidades de fortalecimiento en los temas mencionados

anteriormente con el objetivo de reducir las concentraciones de contaminantes en el aire para proteger la salud y el ambiente, en línea con las directrices de la OMS,

2.3.1 Normatividad de la calidad del aire.

La normatividad de la calidad del aire a nivel nacional se rige bajo las siguientes leyes y resoluciones descritas en la tabla 2.

Tabla 2. Normatividad de la calidad del aire en Colombia

AÑO	TIPO DE REGULACIÓN	ENTIDAD	RESUMEN
1993	Ley 99 creación del MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) y del SINA. (Sistema Nacional de Ambiente)	Creación de lo que es hoy el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Se crea el MADS, se reordena el sector público encargado del medio ambiente y se organiza el SINA
1995	Decreto 948	MADS	Se crea las normas y principios generales para la protección y control atmosférico. Mecanismos para la prevención de episodios por contaminación del aire
1995	Decreto	MADS	Se Modifica parcialmente el decreto 948 que contiene los principios generales para la protección del aire.
1996	Resolución 005	MADS	Se Retribuye por baja emisión de gases contaminantes a la atmosfera para los entes contaminantes.
2003	Resolución 1208	MAVDT	Se dictaminan los Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio a Nivel Nacional

2006	Resolución 601	MAVDT	Se establece la norma de calidad del aire a nivel de inmisión
2010	Resolución 610	MAVDT	Se Modifica la resolución 601 sobre los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio a nivel nacional
2010	Resolución 2154	MAVDT	Ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones
2010	Resolución 651	MAVDT	Se crea el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE
2017	Resolución 2254	MAVDT	Por la cual se adopta la norma de la calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones

Fuente: Rivera 2019, tomando artículos de la constitución política de Colombia y reglamentación Nacional relacionada con el medio ambiente y desarrollo sostenible dictadas a través de leyes, resoluciones y decretos

2.3.2 Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.

El MAVDT adelanto en el año 2017 el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en Colombia. Este protocolo está compuesto por dos manuales; manual de diseño de sistemas de vigilancia de calidad del aire y manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire. El protocolo ofrece a las autoridades ambientales, personas o entidades interesadas una guía de lineamientos básicos para el monitoreo y seguimiento de la calidad, los elementos básicos de un sistema de vigilancia de calidad del aire y el sistema de gestión de calidad del aire, la salud pública y otros aspectos ambientales (MAVT, 2018). En la tabla número 3 se presentan los actuales valores límites máximos permisibles de

concentración para los contaminantes criterio material particulado NO₂, CO, SO₂ y O₃ fijados en la resolución 2254 de 2017 expedida por El MADS de Colombia.

Tabla 3. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire

Contaminante	Nivel Máximo Permissible [µg/m³]	Tiempo de Exposición
PM10 (Material particulado menor a 10 micras)	50	Anual
	100	24 horas
PM2,5 (Material particulado menor a 2,5 micras)	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂ (Dióxido de Azufre)	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂ (Dióxido de Nitrógeno)	60	Anual
	200	1 hora
O ₃ (Ozono)	100	8 horas
CO (Monóxido de Carbono)	5000	8 horas
	35000	1 hora

Fuente. Rivera 2019, según la Resolución 2254 de 2017 MAVDT

3 METODOLOGIA

La información de los contaminantes atmosféricos a utilizar en el proyecto, proviene del Sistema de Vigilancia de la Calidad de Aire (SVCA) que opera la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), la cual cuenta con 8 estaciones de monitoreo de la calidad del aire desplegadas por diversas zonas del área metropolitana de la ciudad (ver ilustración 3). De estas 8 estaciones 3 monitorean algunos parámetros meteorológicos (precipitación, dirección del viento, velocidad del viento, y temperatura superficial). El periodo seleccionado ha sido 2009-2018, esto a partir de la información suministrada y el indicador elegido para los procedimientos ha sido el nivel máximo permisible de los contaminantes en estudio. Debido al reducido número de estaciones que realizan la medición de parámetros como óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y partículas menores a 2,5 um, solo se analizaran los parámetros de partículas menores a 10um y ozono (O₃). La variable utilizada será la concentración media anual de PM₁₀ y O₃.

La ciudad cuenta con un sistema de vigilancia de la calidad de aire en el cual existen en la actualidad 8 estaciones distribuidas específicamente en el área de estudio (ver tabla 4).

Tabla 4. Ubicación y parámetros medidos por cada estación

No	NOMBRE	LOCALIZACIÓN	PARÁMETRO
1	Centro	CARRERA 15 CON CALLE 34 Terraza Cafetería El Faro	NOX, SO ₂ , CO, O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , Meteorología
2	Ciudadela	CALLE DE LOS ESTUDIANTES, Terraza Colegio Aurelio Martínez Mutis	NOX, CO, O ₃ , PM ₁₀ , Meteorología
3	Cabecera	Carrera 36 con Calle 45. Parque San Pio	NOX, SO ₂ , CO, O ₃ , PM ₁₀
4	Florida	Terraza edificio Telebucaramanga Sede Sur de Cañaveral (frente al Éxito)	PM ₁₀ y O ₃

5	Norte	Terraza del HOSPITAL LOCAL DEL NORTE	PM10 y O3, Meteorología
6	San Miguel	Oficinas de la DTB: Diagonal 15 con Carrera 17	PM10
7	La Concordia	Carrera 21 # 51-20	PM10
8	La Joya	Carrera 11 occ No 36-04	PM10

Fuente. Rivera 2019, tomando información de la CDMB

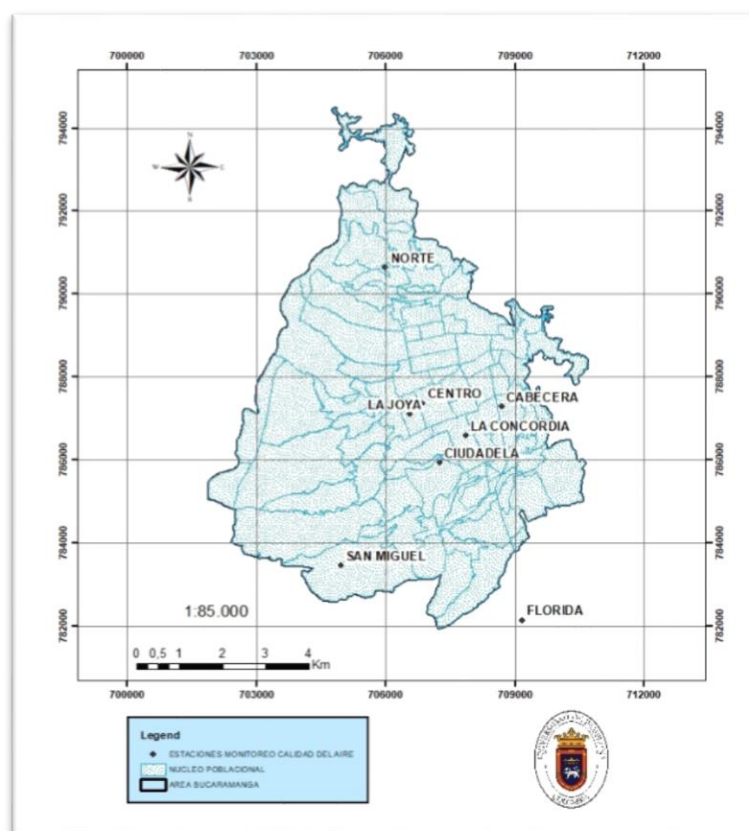


Ilustración 2. Distribución espacial de las estaciones de contaminación

Fuente: Rivera 2019, tomando información de la CDMB

3.1 TECNOLOGIAS APLICADAS

El software utilizado para realizar el procesamiento de la información es el programa ArcGIS y en concreto dos extensiones, la *Geostatistical Analyst* para explorar la estructura de los datos, analizar la autocorrelación espacial y realizar la interpolación, y la extensión *Spatial Analyst* con la que se analizan las diferencias en los resultados generados por los dos métodos de interpolación. Para ello habrá que exportar las capas generadas en *Geostatistical Analyst*. Además, se utilizará la hoja de cálculo Excel para el cálculo de los porcentajes de píxeles y realización de los respectivos cuadros.

3.2 TRATAMIENTO E INTERPOLACION DE DATOS DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Ya que los datos de contaminación atmosférica se recogen en un corto número de observatorios, lo que representa un problema en la correcta representación espacial del lugar, es por ello que a partir de dichos datos se procederá a realizar una interpolación espacial para generar un patrón o cobertura completa del territorio espacial de Bucaramanga, Santander. Al respecto se emplearán dos métodos de interpolación seleccionados, uno, determinista, exacto y local, la media ponderada por el inverso de la distancia (IDW), y otro, un método geoestadístico y analítico, el Kriging ordinario, que tiene en cuenta la autocorrelación espacial de la variable a interpolar. Ambos métodos utilizan la misma fórmula de cálculo:

Ecuación 1. *Estimación espacial del valor a predecir*

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i),$$

donde $Z(S_0)$ es el valor que se intenta predecir para el lugar (S_0) , N es el número de puntos muestrales alrededor del lugar que se va a predecir y que serán tenidos en cuenta en el cálculo, λ_i es el peso asignado a cada punto muestral y $Z(S_i)$ es el valor observado en el

lugar S_i . Lo que diferencia a ambos métodos es el procedimiento de cálculo de los pesos asignados a los valores muestrales. En el caso del IDW los pesos se determinan mediante la fórmula:

Ecuación 2. *Peso asignado a cada punto muestral con el IDW*

$$\lambda_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}$$

donde d_{i0} es la distancia entre el lugar de predicción S_0 y cada lugar muestral S_i , a medida que la distancia se hace más grande, el peso es reducido por un factor p (Cañada, 2007: 793; Wong et al., 2004: 406).

En el Kriging ordinario los pesos se calculan mediante la función del semivariograma, cuyo ajuste más frecuente se realiza mediante el modelo esférico, que adopta la siguiente expresión:

Ecuación 3. *Peso asignado a cada punto muestral con el KRIGING*

$$\gamma(h) = \left\{ \theta_s \left[\frac{3}{2} \frac{\|h\|}{\theta_r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\|h\|}{\theta_r} \right)^3 \right] \right\} \text{ Si } 0 \leq \|h\| \leq \theta_r,$$

$$\gamma(h) = \theta_s \text{ Si } \theta_r < \|h\|$$

donde $\theta_s \geq 0$ es el partial sill (meseta parcial) y $\theta_r \geq 0$ es el range (alcance) (Cañada, 2007,840).

En ambos casos, el análisis se ha iniciado con los parámetros por defecto que presentaba el programa, para variarlos en repetidas iteraciones hasta alcanzar los menores errores en la predicción: mean error (ME), media de los errores próxima a 0 y root mean square error (RMSE), error cuadrático medio más bajo.

3.3 PROCEDIMIENTO METODOLOGICO

3.3.1 Interpolación con IDW y kriging.

Ya activadas las extensiones Geostatistical Analyst y Spatial Analyst. Se añaden las capas:

- Capa en formato shapefile de las estaciones de contaminación con sus coordenadas UTM y con la variable a interpolar.
- Capa de los distritos de Bucaramanga.

Se realiza la elección de los parámetros para a interpolar (ilustraciones 3 y 4). Después de varios ensayos se han propuesto los parámetros que han producido los menores errores en la predicción. En ambos casos la forma de búsqueda de vecindad ha sido un círculo dividido en octantes, por ser esta la fórmula que menos errores producía en los ensayos previos. Se han utilizado los menores vecinos posibles (7). Con el método de la media ponderada se utiliza el óptimo valor de p (2) para calcular los pesos, sin embargo, con el kriging ordinario el proceso es mucho más complejo, ya que calcula la función del semivariograma, siguiendo el modelo esférico, donde además se han cambiado los parámetros por defecto para ajustar mejor los resultados.

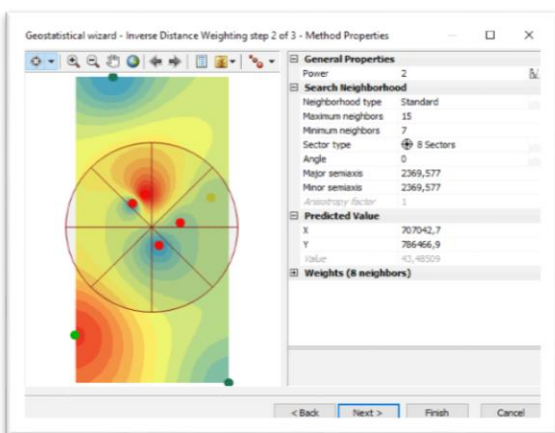


Ilustración 3. Elección de parámetros con IDW

Fuente: Rivera, 2019

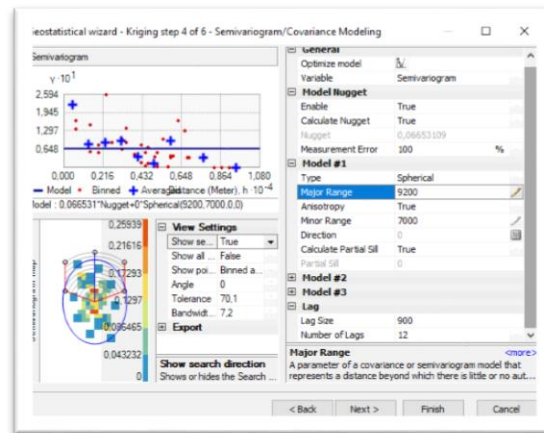


Ilustración 4. Elección de parámetros con kriging

Fuente: Rivera, 2019

Con ambas técnicas la búsqueda de vecindad comenzó con una elipse (modelo anisotrópico), porque reflejaba mejor el reparto espacial del contaminante al ajustarse más a la orografía de los municipios y a los vientos dominantes. Se ha explorado sistemáticamente la dirección de máxima y mínima continuidad espacial de la variable, la orientación del eje principal de anisotropía, el número de cuadrantes en que se divide la elipse, la rotación u orientación de dichos cuadrantes, el número de vecinos a incluir y el valor de p en el caso específico del IDW.

El resultado de la interpolación es una superficie geoestadística que hay que convertir a capa ráster, habiéndose seleccionado una resolución de 50 metros. Con posterioridad, y mediante álgebra de mapas, la capa ráster se ha recortado con la capa que representa la zona urbana poblada. Los estadísticos descriptivos de esta última capa recortada son los que se utilizarán en el próximo apartado para comprobar y valorar en qué medida los valores pronosticados se aproximan a los observados.

3.3.2 Creación de mapas Isopletas agrupados en clases o intervalos.

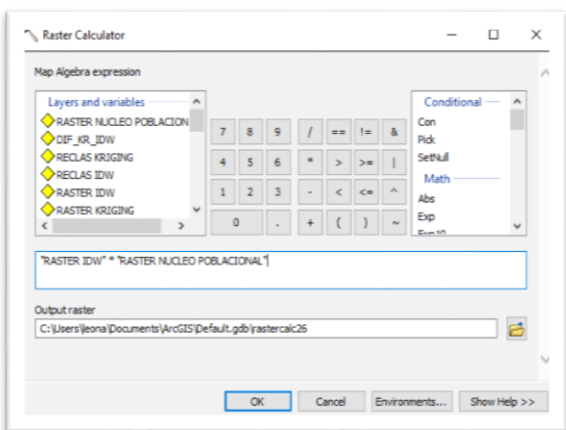


Ilustración 5. Especificaciones para recortar la capa IDW

Fuente: Rivera, 2019

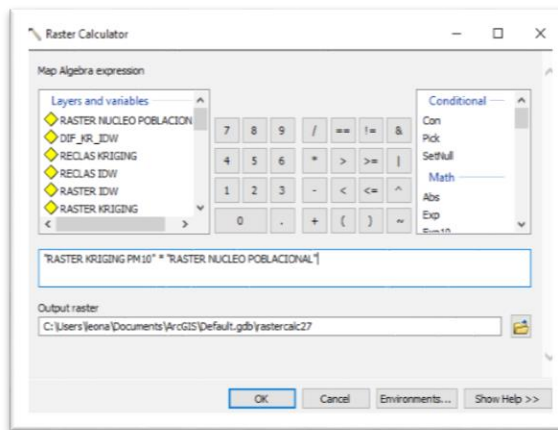


Ilustración 6. Especificaciones para recortar la capa kriging

Fuente: Rivera, 2019

Cargadas las capas raster resultado de la interpolación y la capa del núcleo de población de Bucaramanga, en la herramienta Spatial Analyst/Raster Calculator para proceder a recortar las capas. Se abre un cuadro de dialogo donde se selecciona la capa raster que se quiere recortar, se multiplica por la del núcleo de población de Bucaramanga (ilustraciones 5 y 6). El resultado es la creación de capa recortada que se genera de modo automático en ArcMap donde la variable de contaminación por partículas se expresa sin intervalos, en color monocromático de forma graduada.

A partir de las capas interpoladas con IDW y KRIGING transformadas a ráster, se establece el número de clases o intervalos más aconsejable, en este caso cinco. Seleccionada la capa ráster se ingresa a *Properties/Symbology/Classified*, se da la opción en *Classify* para establecer el método de realizar los intervalos, el cual va ser Method Manual y en Break Values se definen los puntos de corte de los intervalos: se dejan abiertos el intervalo (<40) y el superior (>60) y para los restantes se elige una amplitud de 5 (véase ilustración 7).

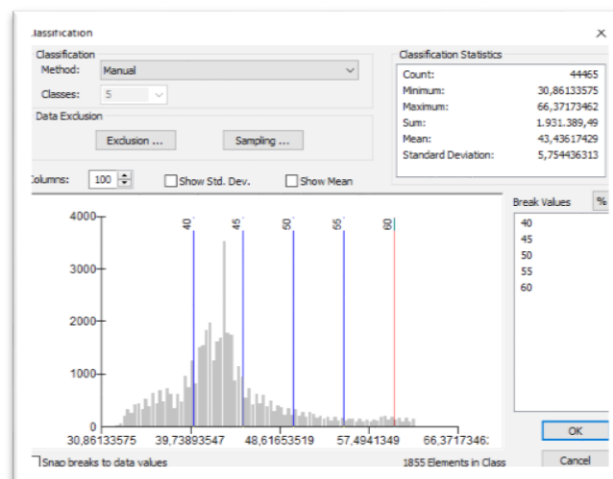


Ilustración 7. Ventana para definir los puntos de corte de los intervalos

Fuente: Rivera, 2019

3.3.3 Comparación de resultados entre ambos métodos de interpolación.

La comparación de resultados se llevó a cabo mediante la ejecución de dos procedimientos en primer lugar el cálculo del número de píxeles de cada intervalo y su porcentaje respecto al total.

3.3.3.1 Calcular el número de píxeles de cada intervalo y su porcentaje respecto al total.

A partir de las capas ráster de contaminación de la variable generadas por los métodos de interpolación IDW y Kriging. Con la herramienta *Spatial Analyst/Reclassify/*, se genera una nueva ventana Input ráster se escoge la capa que se va a reclasificar, se visualizan los antiguos valores de la variable y los nuevos valores que el programa les da por defecto. Se hace clic en *Classify* para acceder al método de clasificación y al número de clases en que se quiere dividir la variable. Para finalizar se hace clic en OK. En la opción *Precision* se selecciona el número de decimales, por defecto aparecen seis, los reducimos a uno (ilustración 8). Para continuar se acepta en OK y en *Output Raster* se indica donde guardar la capa generada.

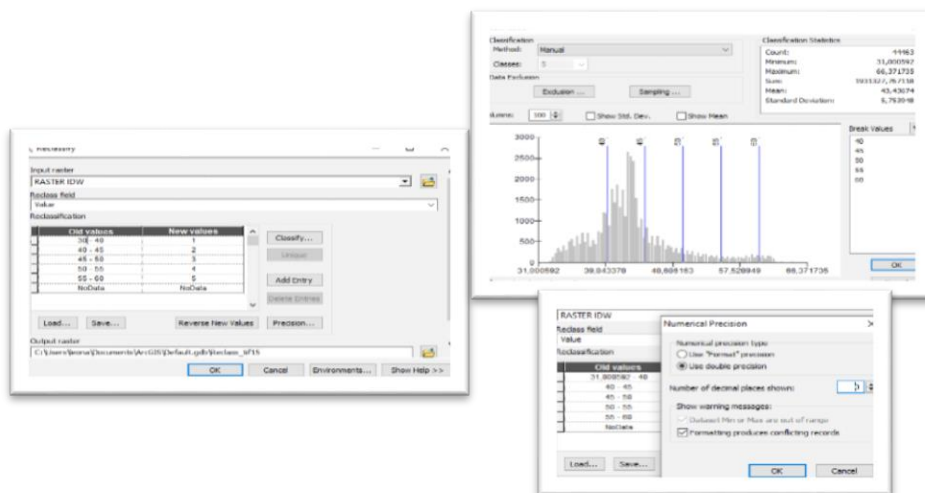


Ilustración 8. Ventanas para calcular el número de píxeles en cada intervalo

Fuente: Rivera, 2019

Con las capas interpoladas se selecciona *Properties*, seguidamente en *Layer/Properties/Symbolgy*, se elige la opción *Unique Values*, de este modo se calcula el número de píxeles para cada intervalo. Después en *Label* se asigna a cada clase los valores reales del número de días en que se superan los 50 ug/m3 (véanse ilustraciones 9 y 10)

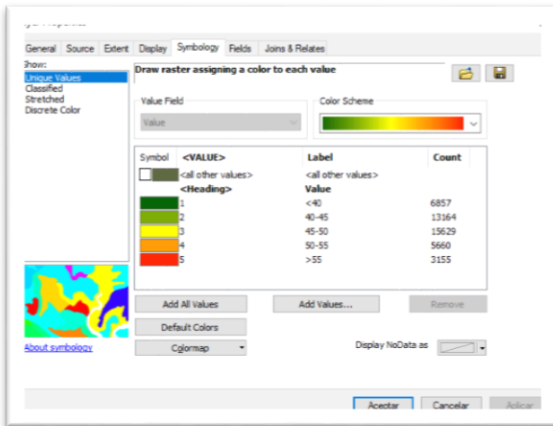


Ilustración 9. Ventana de visualización del número de píxeles en IDW

Fuente: Rivera, 2019

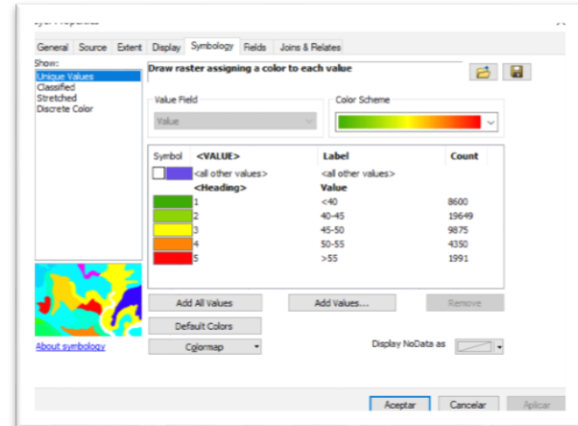


Ilustración 10. Ventana de visualización del número de píxeles en Kriging

Fuente: Rivera, 2019

3.3.3.2 Determinar de diferencias entre ambas capas interpoladas

Mediante el uso de la herramienta *Spatial Analyst/Raster Calculator*, a la capa interpolada con kriging se le resta la capa IDW. Se ejecuta la acción evaluar (ilustración11).

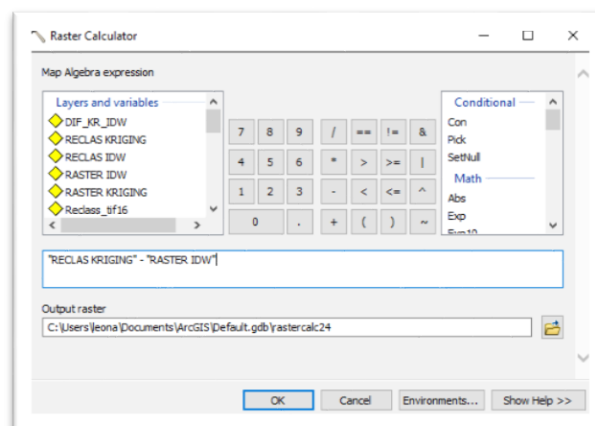


Ilustración 11. Ventana donde se visualiza la resta de ambas capas

Fuente: Rivera, 2019

3.3.4 Visualización de capa de diferencias

Por defecto, la capa de las diferencias se denomina *Calculation*. Para ver sus propiedades accedemos a *Layer Properties*, donde se muestra el método de representación (*Stretched/Estandar Deviations*), una escala gradual de color en blanco y negro (*Color Ramp*) así cuando los valores más altos 2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] al negro y los (-3) al blanco (ilustración 12). En la ilustración 25 se puede visualizar el mapa resultante que, al parecer en un color monocromático negro, no permite diferenciar bien la distribución espacial de los diferentes valores de la variable. Se guarda esta capa con el nombre *dif_kr_idw* (diferencia entre la interpolación de kriging con la IDW).

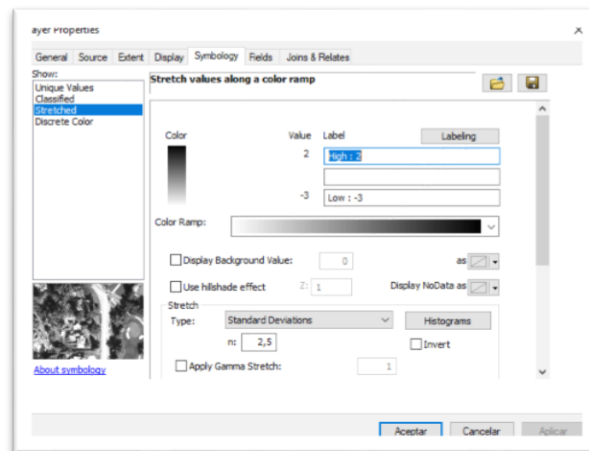


Ilustración 12. Propiedades de la capa de diferencias

Fuente: Rivera, 2019

Seguidamente se simboliza la capa de diferencias como mapa con intervalos cambiando la rampa de color para mejorar el examen de la distribución espacial de la variable. A partir de la capa *dif_kr_idw*, se selecciona *Properties*. A continuación, en *Layer Properties/Color ramp* y elegir una gama dicromática que vaya del rojo al verde, de tal manera que el color rojo se asocie al valor más alto y el verde al más bajo; de este modo se percibe con mayor nitidez el reparto espacial de los diferentes valores de contaminación.

Se elige la opción datos clasificados (*Classified*) para agrupar los valores de la variable en intervalos. En Clases se introduce el número de intervalos, en nuestro caso, 4. La elección del número de intervalos y de sus límites se tiene que realizar teniendo en cuenta la distribución y variabilidad de los valores de la variable, visualizando el patrón espacial resultante. A continuación, se hace clic en *classify*. En la nueva ventana (ilustración 13) se pueden apreciar los estadísticos univariados de la capa, la opción de cambiar a manual el método de agrupar los valores de la variable y los límites de los intervalos.

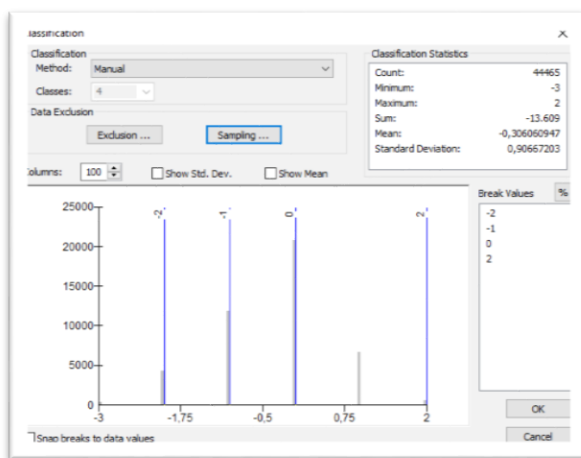


Ilustración 13. Estadísticos descriptivos de la capa de las diferencias

Fuente: Rivera, 2019

4 ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS VARIABLES METEREOLÓGICAS

4.1.1 Estación Floridablanca.

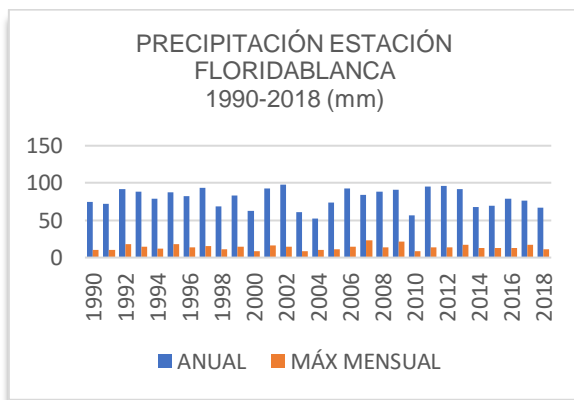


Ilustración 14. Precipitación estación Floridablanca

Fuente: Rivera, 2019

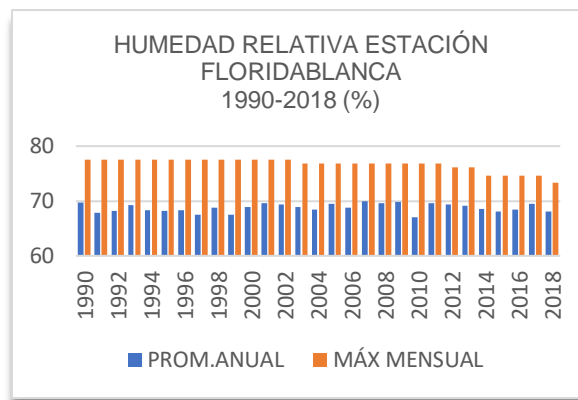


Ilustración 15. Humedad relativa estación Floridablanca

Fuente: Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 14, representa una distribución variada, donde comportamiento de la precipitación en la estación Floridablanca presenta su nivel máximo anual en el año 2002 con 97,97 mm, y el nivel mínimo de precipitación en el 2004 con 52,34 mm. La precipitación máxima mensual alcanzada durante el periodo de estudio de 1990-2018 es en el 2007 con 23,98 mm y respectivamente su valor mínimo en 2010 con 8,9 mm.

El comportamiento de la humedad relativa en la estación Floridablanca se evidencia en la ilustración 15, durante el periodo de 1990 a 2011 se evidencia una pequeña variabilidad de los datos registrados promedios anuales en una amplitud no mayor a 6% de humedad. La humedad máxima anual se encuentra en el año 2002 con 77,53% y la mínima con 73,28% durante el 2009. El nivel máximo mensual se registra en el 2007 con 69,44% y respectivamente su valor mínimo con 76,86 en el 2010.

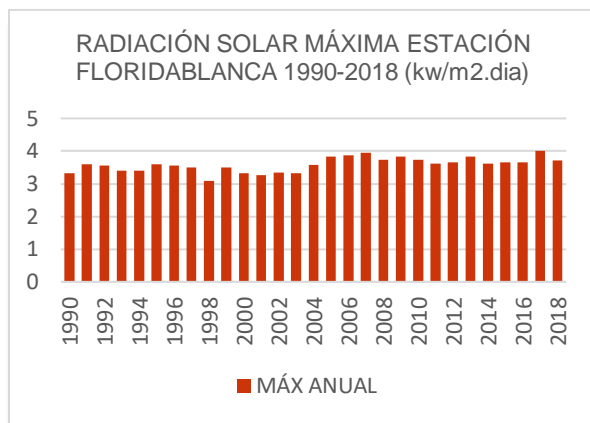


Ilustración 16. Radiación solar máxima estación Floridablanca

Fuente: Rivera, 2019

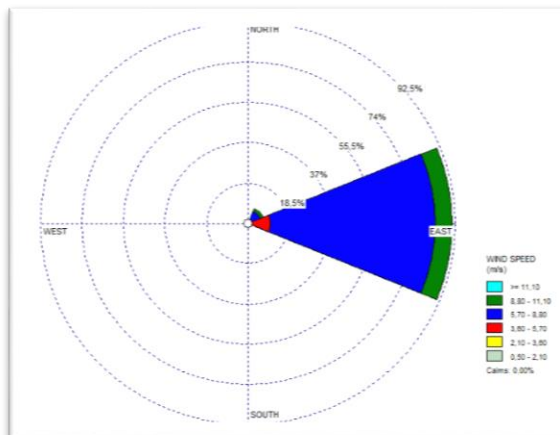


Ilustración 17. Rosa de los vientos de la estación Floridablanca

Fuente: Rivera, 2019

La radiación solar máxima registrada del promedio anual de la estación Floridablanca se encuentra en el 2007 con 4,01 kw/m2.dia (ver ilustración 16). En el año 1998 se presentó la mínima con 3,09 kw/m2.dia. El rango de variación de la radiación solar no supera el 1 kw/m2.dia en el periodo de 1990-2018.

En la ilustración 17 se obtiene el resultado de la rosa de los vientos de la estación Floridablanca indica que la dirección del viento se realiza en sentido oeste a este, con una velocidad promedio que varía de 5,7 m/s a 8,8 m/s y alcanzando velocidades máximas de hasta 11m/s a una altura de 2 metros de la superficie.

4.1.2 Estación Universidad Santander.

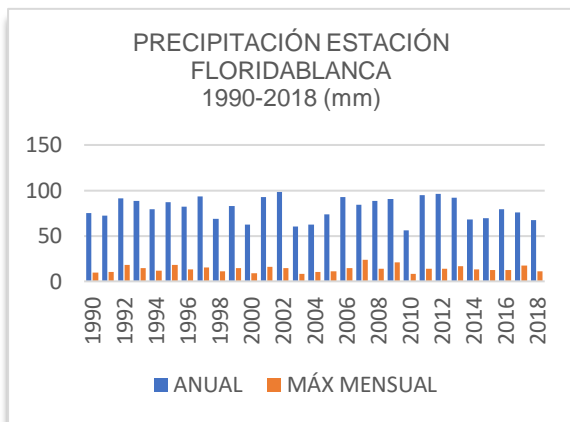


Ilustración 18. Precipitación estación Univ. Santander

Fuente: Rivera, 2019

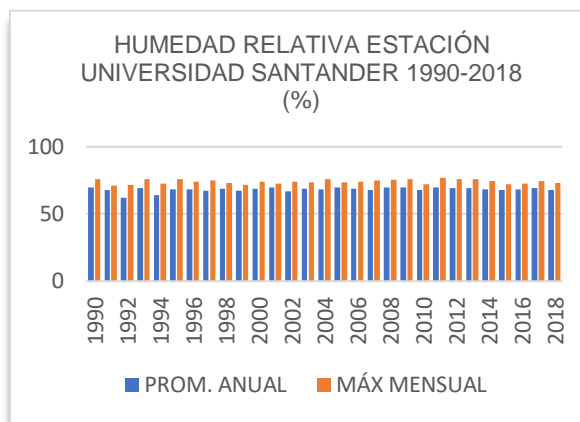


Ilustración 19. Humedad relativa estación Univ. Santander

Fuente: Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 18, representa una distribución variada, donde comportamiento de la precipitación en la estación Universidad Santander presenta su nivel máximo anual en el año 2012 con 96,39 mm, y el nivel mínimo de precipitación en el 2010 con 56,27 mm. La precipitación máxima mensual alcanzada durante el periodo de estudio de 1990-2018 es en el 2000 con 21,19 mm y respectivamente su valor mínimo en 2010 con 8,65 mm.

El comportamiento de la humedad relativa en la estación Universidad Santander se evidencia en la ilustración 19, durante el periodo de 1990 a 2018 se evidencia una pequeña variabilidad de los datos registrados promedios anuales con una amplitud no mayor a 8% de humedad. La humedad máxima anual se encuentra en el año 1993 con 75,9% y la mínima con 62,13% durante el 1992. El nivel máximo mensual se registra en el 2007 con 76,86% y respectivamente su valor mínimo con 72,05 en el 2010.

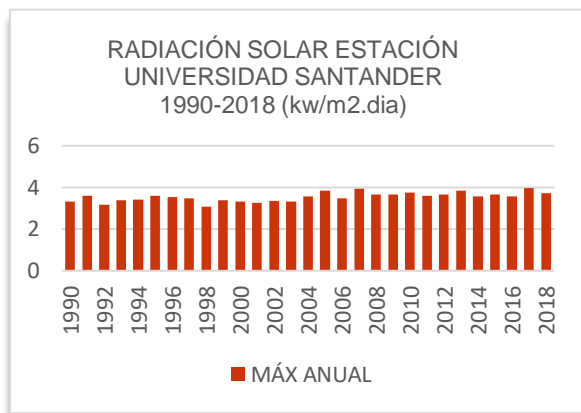


Ilustración 20. Radiación solar máxima estación Univ. Santander

Fuente: Rivera, 2019

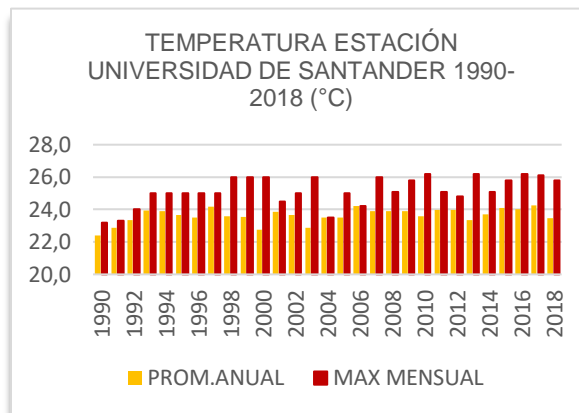


Ilustración 21. Temperatura estación Univ. Santander

Fuente: Rivera, 2019

La radiación solar máxima registrada del promedio anual de la estación Universidad Santander se encuentra en el 2017 con 3,97 kw/m2.dia (ver ilustración 20). En el año 1998 se presentó la mínima con 3,19 kw/m2.dia. El rango de variación de la radiación solar no supera el 1 kw/m2.dia en el periodo de 1990-2018.

La ilustración 21 se observa el comportamiento de la temperatura en la estación Universidad de Santander donde se evidencia un leve incremento en los últimos 10 años de 0,2 °C, donde la temperatura máxima registrada del promedio anual se encuentra en el año 2017 con 24,3 °C y la mínima en el 2000 con 22,7. La temperatura máxima anual se registra con 26,2°C en el 2016 y la mínima con 23,2°C en 1990.

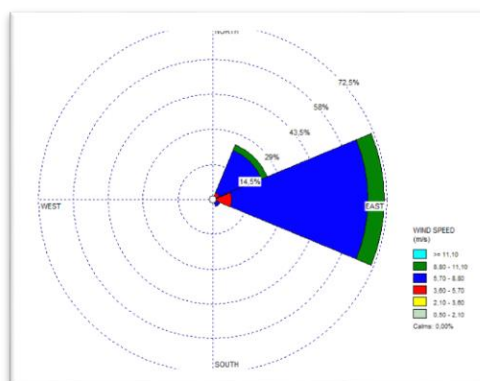


Ilustración 22. Rosa de los vientos estación Univ. Santander

Fuente: Rivera, 2019

En la ilustración 22 se obtiene el resultado de la rosa de los vientos de la estación Universidad Santander donde indica que la dirección del viento se realiza en sentido oeste a este, con una velocidad promedio que varía de 5,5 m/s a 8,8 m/s y en menor magnitud desde el suroeste al noreste. Las velocidades máximas registradas son de hasta 11m/s a una altura de 2 metros de la superficie.

4.1.3 Estación Neomundo.

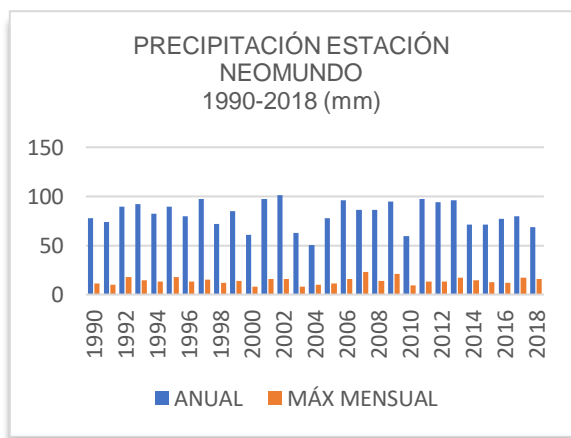


Ilustración 23. Precipitación estación Neomundo

Fuente: Rivera, 2019

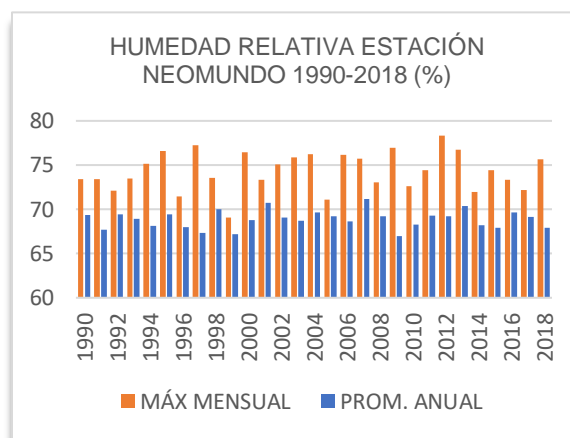


Ilustración 24. Humedad relativa estación Neomundo

Fuente: Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 23, representa una distribución variada, donde comportamiento de la precipitación en la estación Neomundo presenta su nivel máximo anual en el año 2011 con 97,05 mm, y el nivel mínimo de precipitación en el 2004 con 55,34 mm. La precipitación máxima mensual alcanzada durante el periodo de estudio de 1990-2018 es en el 2007 con 22,98 mm y respectivamente su valor mínimo en 2003 con 8,63 mm.

El comportamiento de la humedad relativa en la estación Neomundo se evidencia en la ilustración 24, durante el periodo de estudio se evidencia una variabilidad de los datos registrados promedios anuales en una amplitud no mayor a 9% de humedad. La humedad máxima anual se encuentra en el año 2007 con 71,15% y la mínima con 78,33% durante el

2012. El nivel máximo mensual se registra en el 2007 con 69,44% y respectivamente su valor mínimo con 69,05 en el 1999.

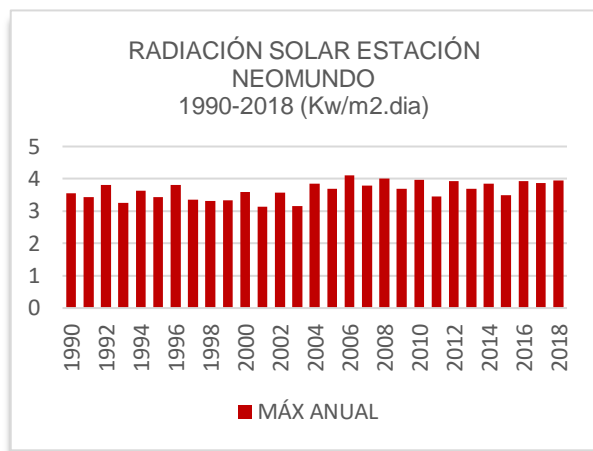


Ilustración 23. Radiación solar estación Neomundo
Fuente. Rivera, 2019

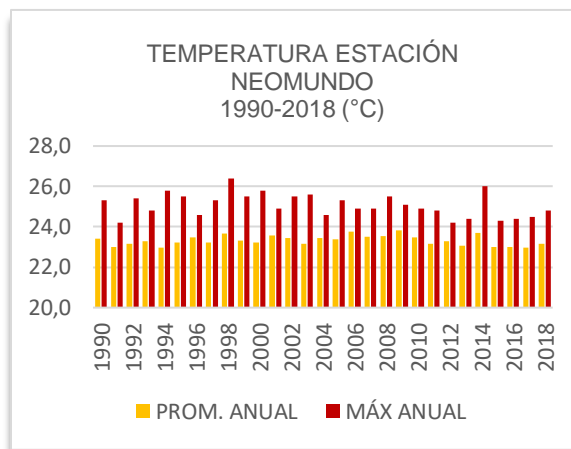


Ilustración 26. Temperatura estación Neomundo
Fuente. Rivera, 2019

La radiación solar máxima registrada del promedio anual de la estación Neomundo se encuentra en el 2006 con 4,1 kw/m2.dia (ver ilustración 25). En el año 2001 se presentó la mínima con 3,13 kw/m2.dia. El rango de variación de la radiación solar no supera el 1 kw/m2.dia en el periodo de 1990-2018.

La ilustración 26 se observa el comportamiento de la temperatura en la Neomundo donde se evidencia una variabilidad de los datos, donde la temperatura máxima registrada del promedio anual se encuentra en el año 2014 con 23,9 °C y la mínima en el 2015 con 22,7. La temperatura máxima anual se registra con 25,8°C en el 2014 y la mínima con 24,3°C en 2017.

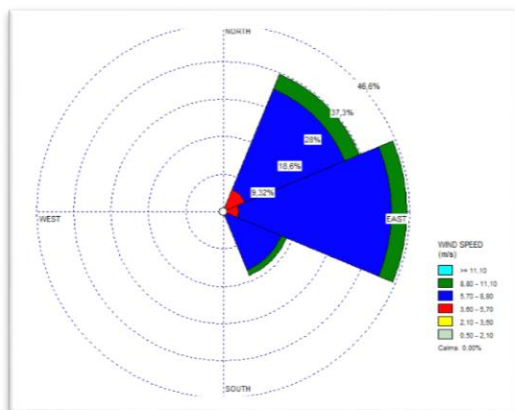


Ilustración 27. Rosa de los vientos estación Neomundo

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 27 se obtiene el resultado de la rosa de los vientos de la estación Universidad Santander donde indica que la dirección del viento se presenta en sentido oeste a este de mayor magnitud hacia el noreste, con una velocidad promedio que varía de 5,7 m/s a 8,9 m/s y en menor magnitud desde el noroeste al sureste. Las velocidades máximas registradas son de hasta 11m/s a una altura de 2 metros de la superficie.

4.1.4 Estación Chimita.

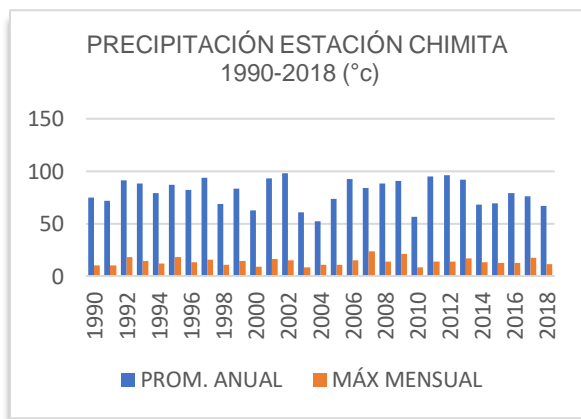


Ilustración 28. Precipitación estación Chimita

Fuente. Rivera, 2019

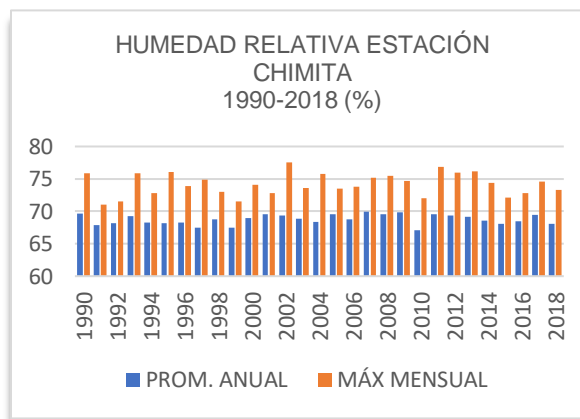


Ilustración 29. Humedad relativa estación Chimita

Fuente. Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 28, representa una distribución variada, donde comportamiento de la precipitación en la estación Chimita presenta su nivel máximo anual en el año 2002 con 97,97 mm, y el nivel mínimo de precipitación en el 2004 con 52,34 mm. La precipitación máxima mensual alcanzada durante el periodo de estudio de 1990-2018 es en el 2007 con 23,98 mm y respectivamente su valor mínimo en 2010 con 8,9 mm.

El comportamiento de la humedad relativa en la estación Chimita se evidencia en la ilustración 29, durante el periodo de 1990 a 2011 se evidencia una pequeña variabilidad de los datos registrados promedios anuales en una amplitud no mayor a 6% de humedad. La humedad máxima anual se encuentra en el año 2002 con 77,53% y la mínima con 73,28% durante el 2009. El nivel máximo mensual se registra en el 2007 con 69,44% y respectivamente su valor mínimo con 76,86 en el 2010.

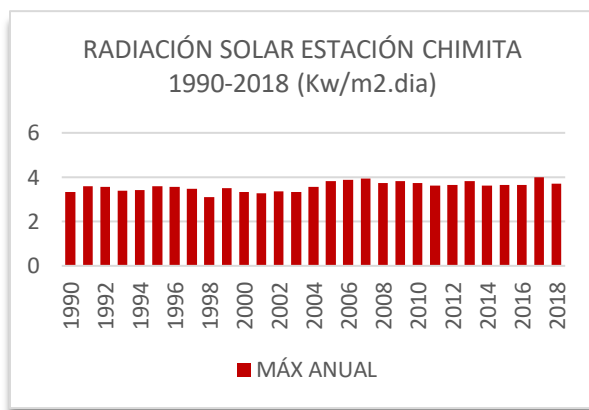


Ilustración 30. Radiación solar estación chimita

Fuente. Rivera, 2019

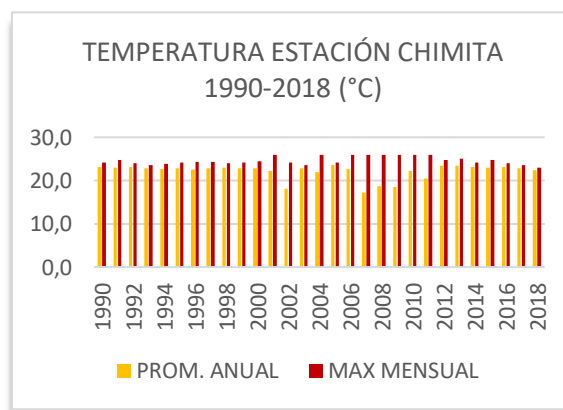


Ilustración 31. Temperatura estación chimita

Fuente. Rivera, 2019

La radiación solar máxima registrada del promedio anual de la estación Chimita se encuentra en el 2007 con 4,01 kw/m2.dia (ver ilustración 30). En el año 1998 se presentó la mínima con 3,09 kw/m2.dia. El rango de variación de la radiación solar no supera el 1 kw/m2.dia en el periodo de 1990-2018.

La ilustración 31 se observa el comportamiento de la temperatura en la estación Chimita, donde la temperatura máxima registrada del promedio anual se encuentra en el año 2017

con 24,3 °C y la mínima en el 2000 con 22,7. Las temperaturas máximas anuales se registraron en un rango de 25°C a 26°C desde 2006 a 2011 y la mínima con 23,5°C en 2003.

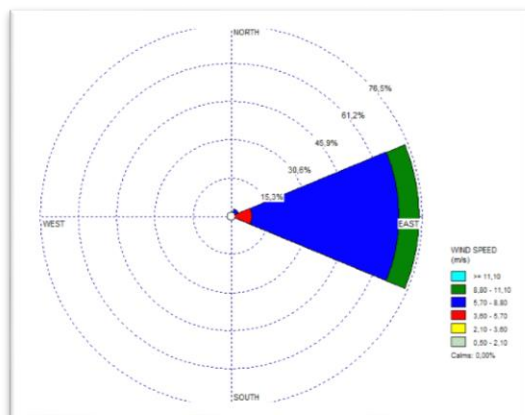


Ilustración 32. Rosa de los vientos estación chimita

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 32 se obtiene el resultado de la rosa de los vientos de la estación Chimita indica donde la dirección del viento se realiza en sentido oeste a este, con una velocidad promedio que varía de 5,7 m/s a 8,8 m/s y alcanzando velocidades máximas de hasta 11m/s a una altura de 2 metros de la superficie.

4.1.5 Estación Palo Negro.

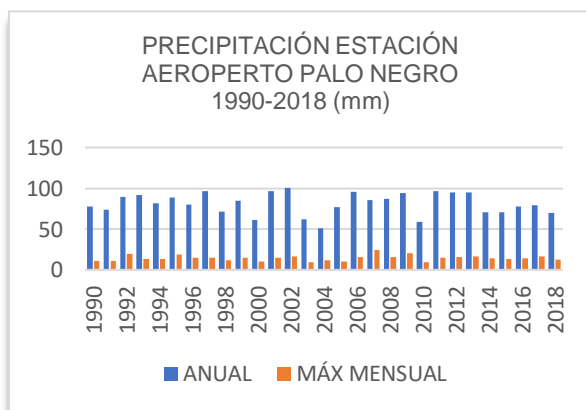


Ilustración 33. Precipitación estación Aeropuerto Palo Negro

Fuente. Rivera, 2019

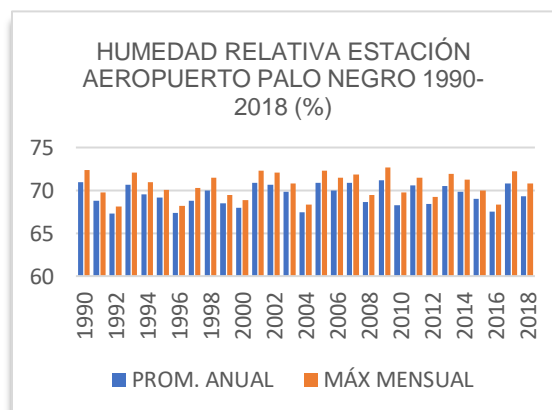


Ilustración 34. Humedad relativa estación Aeropuerto Palo Negro

Fuente. Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 33, representa una distribución variada, donde comportamiento de la precipitación en la estación Aeropuerto Palo Negro presenta su nivel máximo anual en el año 2002 con 100,51 mm, y el nivel mínimo de precipitación en el 2004 con 50,67 mm. La precipitación máxima mensual alcanzada durante el periodo de estudio de 1990-2018 es en el 2007 con 24,24 mm y respectivamente su valor mínimo en 2005 con 10,19 mm.

El comportamiento de la humedad relativa en la estación Aeropuerto Palo Negro se evidencia en la ilustración 34, durante el periodo de 1990 a 2011 se evidencia una pequeña variabilidad de los datos registrados promedios anuales en una amplitud no mayor a 5% de humedad. La humedad máxima anual se encuentra en el año 2009 con 72,64% y la mínima con 67,28% durante el 1992. El nivel máximo mensual se registra en el 2007 con 69,44% y respectivamente su valor mínimo con 6 en el 2010.

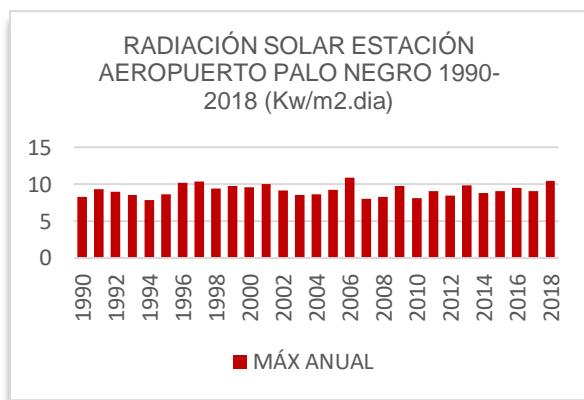


Ilustración 35. Radiación solar estación Aeropuerto Palo Negro

Fuente. Rivera, 2019

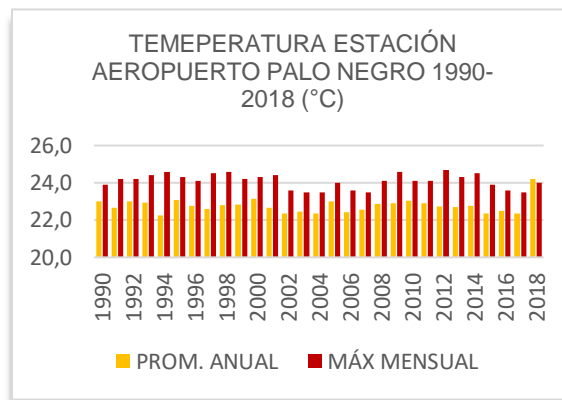


Ilustración 36. Temperatura estación Aeropuerto Palo Negro

Fuente. Rivera, 2019

La radiación solar máxima registrada del promedio anual de la estación Aeropuerto Palo Negro se encuentra en el 2007 con 4,01 kw/m2.dia (ver ilustración 35). En el año 1998 se presentó la mínima con 3,09 kw/m2.dia. El rango de variación de la radiación solar no supera el 1 kw/m2.dia en el periodo de 1990-2018.

La ilustración 36 se observa el comportamiento de la temperatura en la estación Aeropuerto Palo Negro, donde la temperatura máxima registrada del promedio anual se encuentra en el año 2018 con 23,2 °C y la mínima en el 1994 con 22,2. La temperatura máxima mensual se registró de 24,7°C en el 2012 y la mínima con 23,5°C en 2007.

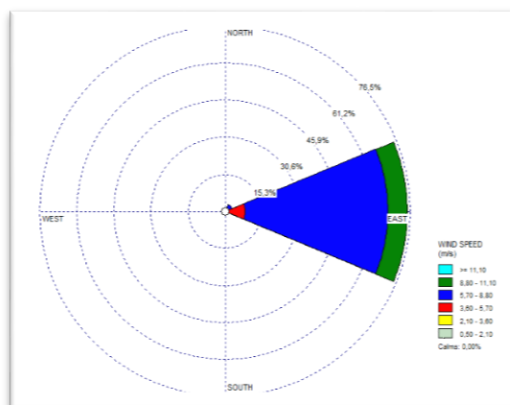


Ilustración 37. Rosa de los vientos estación Aeropuerto Palo Negro

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 37 se obtiene el resultado de la rosa de los vientos de la estación Aeropuerto Palo Negro indica donde la dirección del viento se realiza en sentido oeste a este, con una velocidad promedio que varía de 5,7 m/s a 8,8 m/s y alcanzando velocidades máximas de hasta 11m/s a una altura de 2 metros de la superficie.

4.1.6 Estación San Antonio.

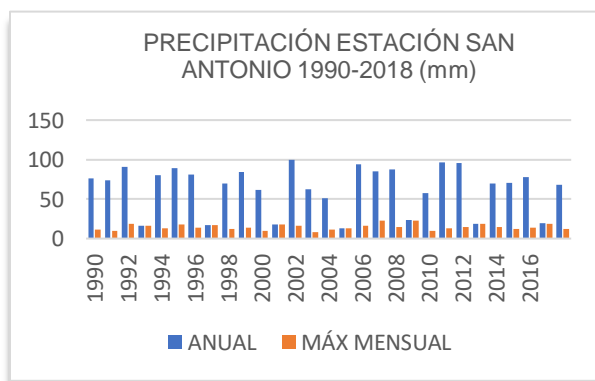


Ilustración 38. Precipitación estación San Antonio

Fuente. Rivera, 2019

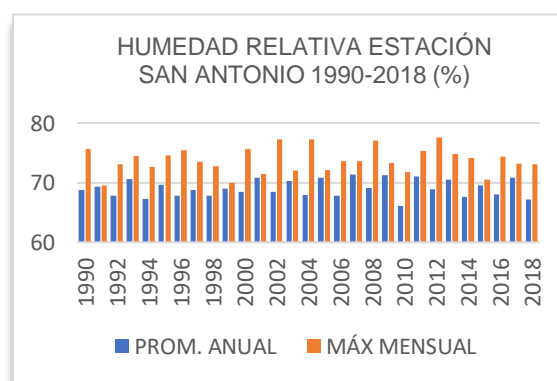


Ilustración 39. Humedad relativa estación San Antonio

Fuente. Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 38, representa una distribución variada, donde comportamiento de la precipitación en la estación San Antonio presenta su nivel máximo anual en el año 2002 con 99,31 mm, y el nivel mínimo de precipitación en el 2005 con 12,71 mm. La precipitación máxima mensual alcanzada durante el periodo de estudio de 1990-2018 es en el 2009 con 22,87 mm y respectivamente su valor mínimo en 2003 con 8,19 mm.

El comportamiento de la humedad relativa en la estación San Antonio se evidencia en la ilustración 39. La humedad máxima anual se encuentra en el año 2007 con 71,37% y la mínima con 66,11% durante el 2010. El nivel máximo mensual se registra en el 2012 con 77,56% y respectivamente su valor mínimo con 69,5% en el 1991.

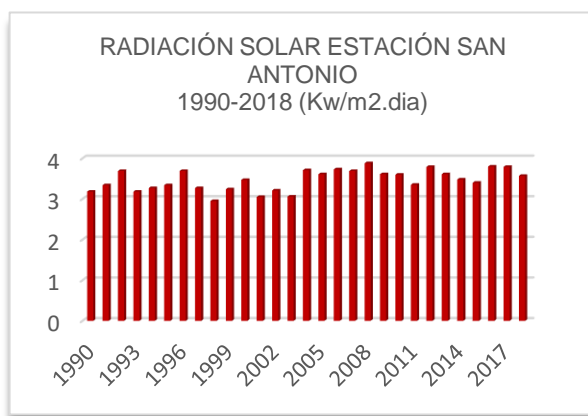


Ilustración 40. Radiación solar estación San Antonio

Fuente. Rivera, 2019

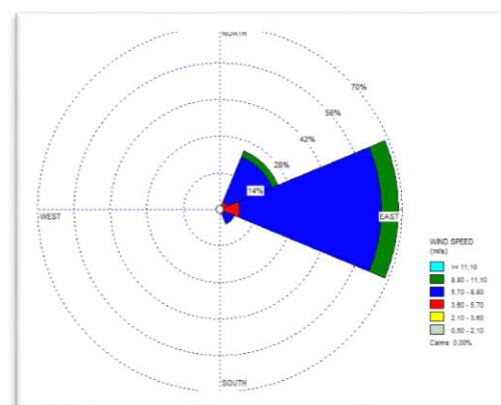


Ilustración 41. Rosa de los vientos estación San Antonio

Fuente. Rivera, 2019

La radiación solar máxima registrada del promedio anual de la estación San Antonio se encuentra en el 2008 con 3,88 kw/m2.dia (ver ilustración 40). En el año 1998 se presentó la mínima con 2,95 kw/m2.dia. El rango de variación de la radiación solar no supera el 1 kw/m2.dia en el periodo de 1990-2018.

En la ilustración 41 se obtiene el resultado de la rosa de los vientos de la estación San Antonio donde indica que la dirección del viento se presenta en sentido oeste a este de mayor magnitud hacia el noreste, con una velocidad promedio que varía de 5,7 m/s a 8,9 m/s y en

menor magnitud desde el noroeste al sureste. Las velocidades máximas registradas son de hasta 11m/s a una altura de 2 metros de la superficie.

4.1.7 Estación Floresta.

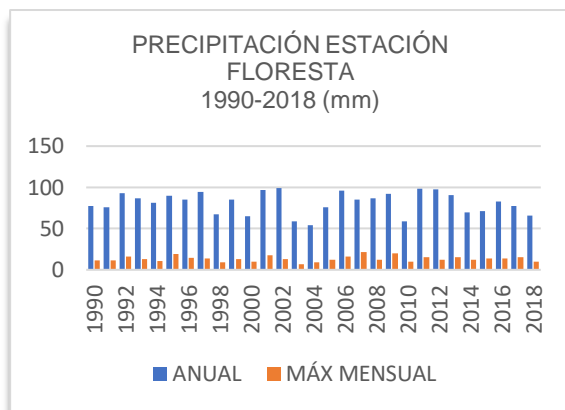


Ilustración 42. Precipitación estación Floresta
Fuente. Rivera, 2019

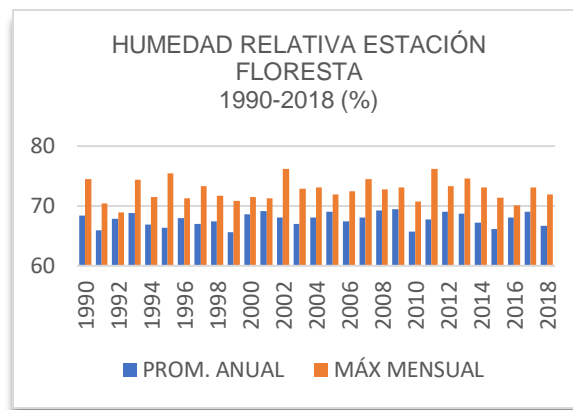


Ilustración 43. Humedad relativa estación Floresta
Fuente. Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 42, representa una distribución variada, donde el comportamiento de la precipitación en la estación la Floresta presenta su nivel máximo anual en el año 2002 con 99,2 mm, y el nivel mínimo de precipitación en el 2004 con 52,34 mm. La precipitación máxima mensual alcanzada durante el periodo de estudio de 1990-2018 es en el 2007 con 21,87 mm y respectivamente su valor mínimo en 2003 con 6,97 mm.

El comportamiento de la humedad relativa en la estación la Floresta se evidencia en la ilustración 43. La humedad máxima anual se encuentra en el año 2005 con 69,08% y la mínima con 65,65% durante el 1999. El nivel máximo mensual se registra en el 2002 con 76,19% y respectivamente su valor mínimo con 62,88% en el 1992.

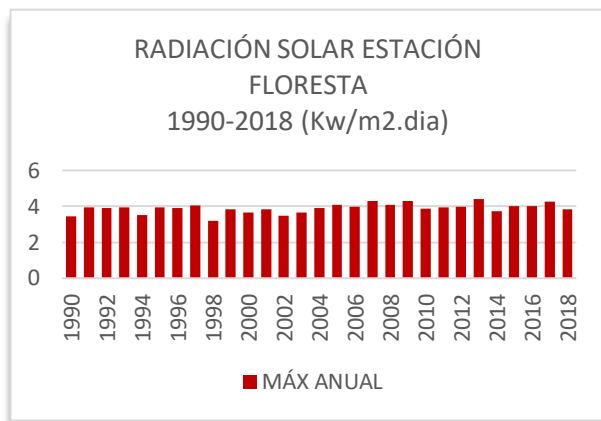


Ilustración 44. Radiación solar estación Floresta

Fuente. Rivera, 2019

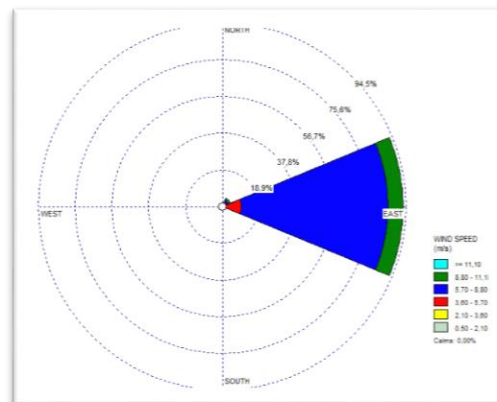


Ilustración 45. Rosa de los vientos estación Floresta

Fuente. Rivera, 2019

La radiación solar máxima registrada del promedio anual de la estación la Floresta se encuentra en el 2013 con 4,39 kw/m2.dia (ver ilustración 44). En el año 1998 se presentó la mínima con 3,21 kw/m2.dia. El rango de variación de la radiación solar no supera el 1,2 kw/m2 en el periodo de 1990-2018.

En la ilustración 45 se obtiene el resultado de la rosa de los vientos de la estación la Floresta donde indica que la dirección del viento se presenta en sentido oeste a este de mayor magnitud hacia el noreste, con una velocidad promedio que varía de 5,7 m/s a 8,8 m/s. Las velocidades máximas registradas son de hasta 11m/s a una altura de 2 metros de la superficie.

4.1.8 Estación Ceylan.

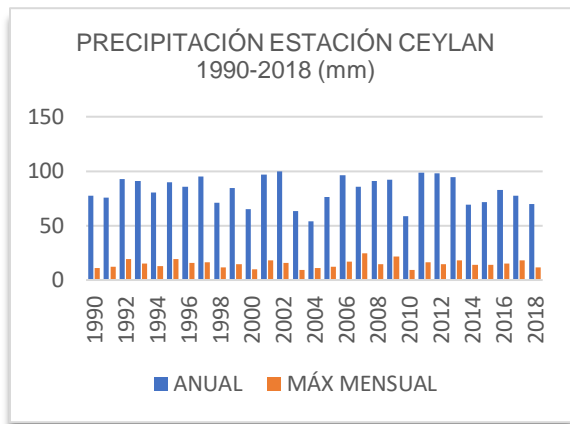


Ilustración 46. Precipitación estación Ceylan

Fuente. Rivera, 2019

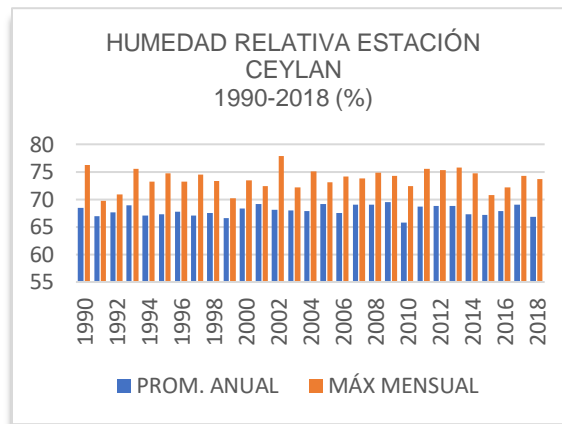


Ilustración 47. Humedad relativa estación Ceylan

Fuente. Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 46, representa una distribución variada, donde el comportamiento de la precipitación en la estación Ceylan presenta su nivel máximo anual en el año 2011 con 98,61 mm, y el nivel mínimo de precipitación en el 2004 con 53,68 mm. La precipitación máxima mensual alcanzada durante el periodo de estudio de 1990-2018 es en el 2007 con 24,5 mm y respectivamente su valor mínimo en 2003 con 9,29 mm.

El comportamiento de la humedad relativa en la estación Ceylan se evidencia en la ilustración 47. La humedad máxima anual se encuentra en el año 2009 con 69,51% y la mínima con 65,82% durante el 2010. El nivel máximo mensual se registra en el 2002 con 77,87% y respectivamente su valor mínimo con 69,72% en el 1991.

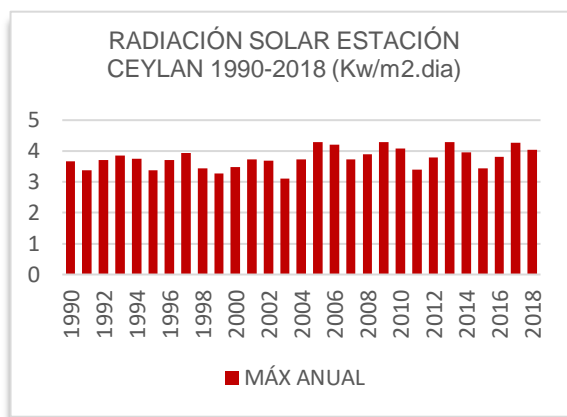


Ilustración 48. Radiación solar estación Ceylan

Fuente. Rivera, 2019

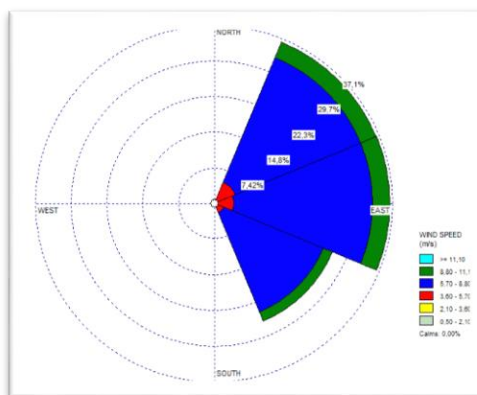


Ilustración 49. Rosa de los vientos estación Ceylan

Fuente. Rivera, 2019

La radiación solar máxima registrada del promedio anual de la estación Ceylan se encuentra en el 2013 con 4,28 kw/m2.dia (ver ilustración 48). En el año 2003 se presentó la mínima con 3,1 kw/m2.dia. El rango de variación de la radiación solar no supera el 1,2 kw/m2.dia en el periodo de 1990-2018.

En la ilustración 49 se obtiene el resultado de la rosa de los vientos de la estación Ceylan donde indica que la dirección del viento se presenta en sentido suroeste a noreste mayor magnitud, y de menor magnitud en dirección noroeste a sureste. Con una velocidad promedio que varía de 5,7 m/s a 8,9 m/s Las velocidades máximas registradas son de hasta 11m/s a una altura de 2 metros de la superficie.

4.1.9 Estación Bucaramanga Ideam.

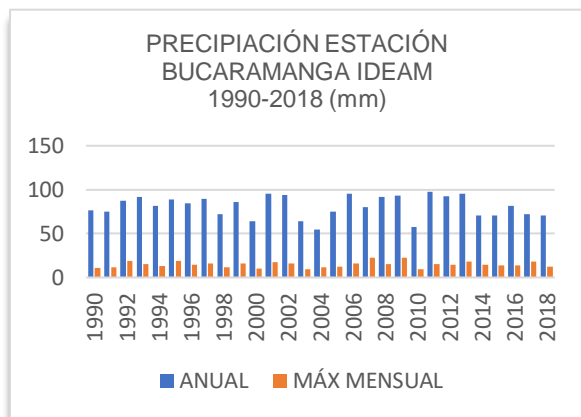


Ilustración 50. Precipitación estación Bucaramanga Ideam

Fuente. Rivera, 2019

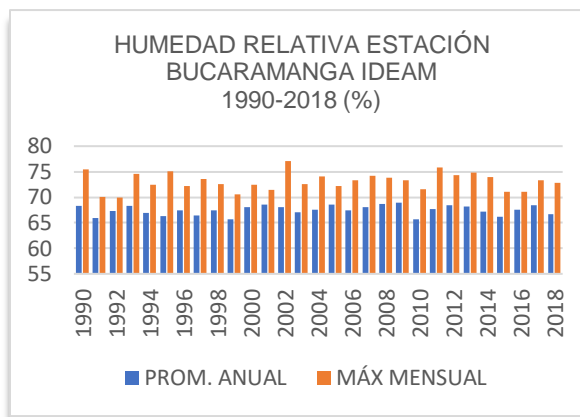


Ilustración 51. Humedad relativa estación Bucaramanga Ideam

Fuente. Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 50, representa una distribución variada, donde el comportamiento de la precipitación en la estación Bucaramanga Ideam presenta su nivel máximo anual en el año 2011 con 97,7 mm, y el nivel mínimo de precipitación en el 2004 con 54,77 mm. La precipitación máxima mensual alcanzada durante el periodo de estudio de 1990-2018 es en el 2009 con 22,53 mm y respectivamente su valor mínimo en 2010 con 9,31 mm.

El comportamiento de la humedad relativa en la estación Bucaramanga Ideam se evidencia en la ilustración 51. La humedad máxima anual se encuentra en el año 2009 con 68,88% y la mínima con 65,63% durante el 1999. El nivel máximo mensual se registra en el 2002 con 77,08% y respectivamente su valor mínimo con 69,88% en el 1992.

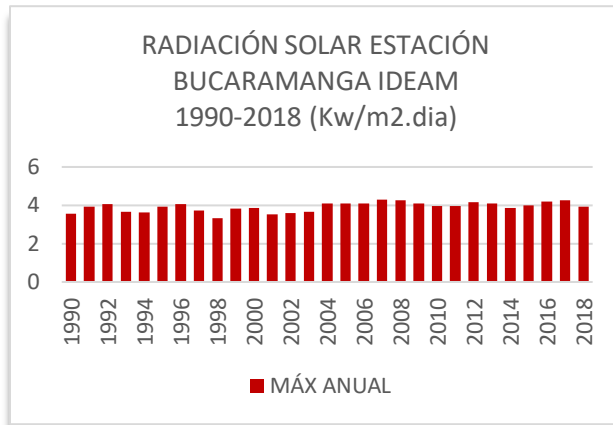


Ilustración 52. Radiación solar estación Bucaramanga Ideam

Fuente. Rivera, 2019

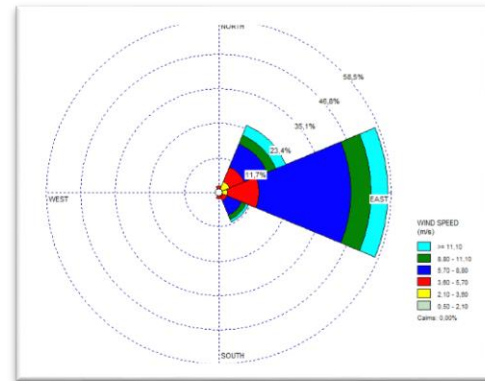


Ilustración 53. Rosa de los vientos estación Bucaramanga Ideam

Fuente. Rivera, 2019

La radiación solar máxima registrada del promedio anual de la estación Bucaramanga Ideam se encuentra en el 2007 con 4,29 kw/m2.dia (ver ilustración 52). En el año 1998 se presentó la mínima con 3,32 kw/m2.dia. El rango de variación de la radiación solar no supera el 1,2 kw/m2.dia en el periodo de 1990-2018.

En la ilustración 53 se obtiene el resultado de la rosa de los vientos de la estación Bucaramanga Ideam donde indica que la dirección del viento se presenta en sentido oeste a este de mayor magnitud, y de menor magnitud en dirección suroeste a noreste. Con una velocidad promedio que varía de 5,7 m/s a 8,9 m/s Las velocidades máximas registradas son de hasta 11m/s a una altura de 2 metros de la superficie.

4.2 RESULTADOS ESTACIONES DE LA CALIDAD DEL AIRE

4.2.1 Estación la Joya.



Ilustración 54. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación la Joya

Fuente. Rivera 2019, a partir de la base de datos suministrada por la CDMB

Como se observa en la ilustración 54 en la estación la Joya los parámetros registrados de ozono y PM10 no superaron los niveles máximos permisibles que establece la resolución N°2254 del 1 de noviembre de 2017. Los picos máximos de contaminación por PM10 se registraron en los años 2015, 2016 y 2018 con 30.2 [µg/m³], 28.4 [µg/m³] y 28,5 [µg/m³] respectivamente. La contaminación máxima por ozono se obtuvo en 2013, 2015 y 2018 con 40.8 [µg/m³], 30.6 [µg/m³] y 44.6 [µg/m³] respectivamente.

4.2.2 Estación la Concordia.

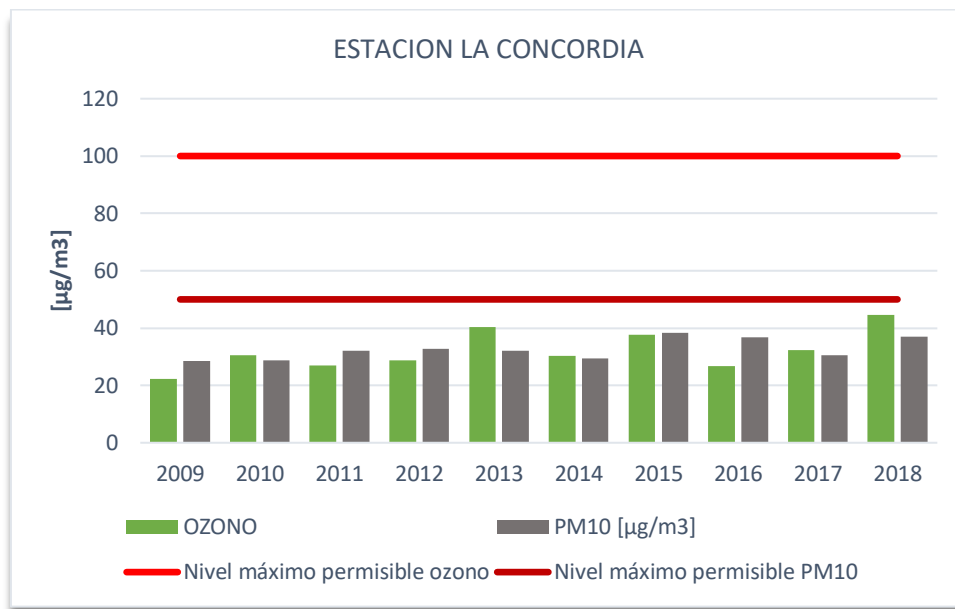


Ilustración 55. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación la Concordia

Fuente. Rivera 2019, a partir de la base de datos suministrada por la CDMB

En la ilustración 55 se observa que en la estación la Concordia los parámetros registrados de ozono y PM10 no superaron los niveles máximos permisibles que establece la resolución N°2254 del 1 de noviembre de 2017. Los picos máximos de contaminación por PM10 se registraron en los años 2015, 2016 y 2018 con 38.3 [µg/m³], 36.7 [µg/m³] y 36,9 [µg/m³] respectivamente. La contaminación máxima por ozono se obtuvo en 2013, 2015 y 2018 con 40.3 [µg/m³], 37.6 [µg/m³] y 44.6 [µg/m³] respectivamente.

4.2.3 Estación San Miguel.

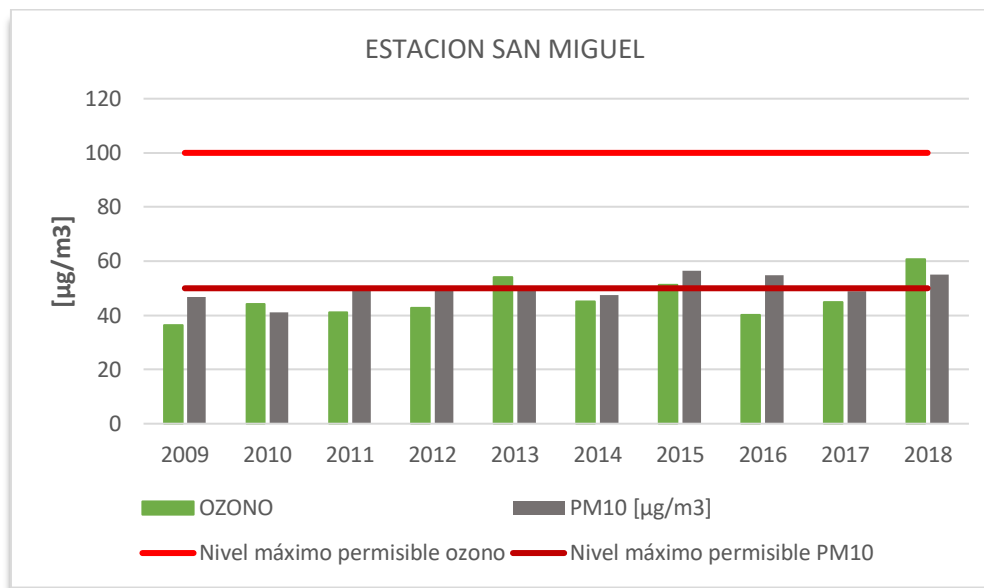


Ilustración 56. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación San Miguel

Fuente. Rivera 2019, a partir de la base de datos suministrada por la CDMB

Como se observa en la ilustración 56 en la estación San Miguel registra los parámetros de PM10 superaron los niveles máximos permisibles que establece la resolución N°2254 del 1 de noviembre de 2017, en los años 2012, 2015, 2016 y 2018 con 50.8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], 56.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], 54.8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y 54.1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente. En cuanto al ozono en ningún momento se superó el límite máximo establecido por la norma.

4.2.4 Estación Norte.

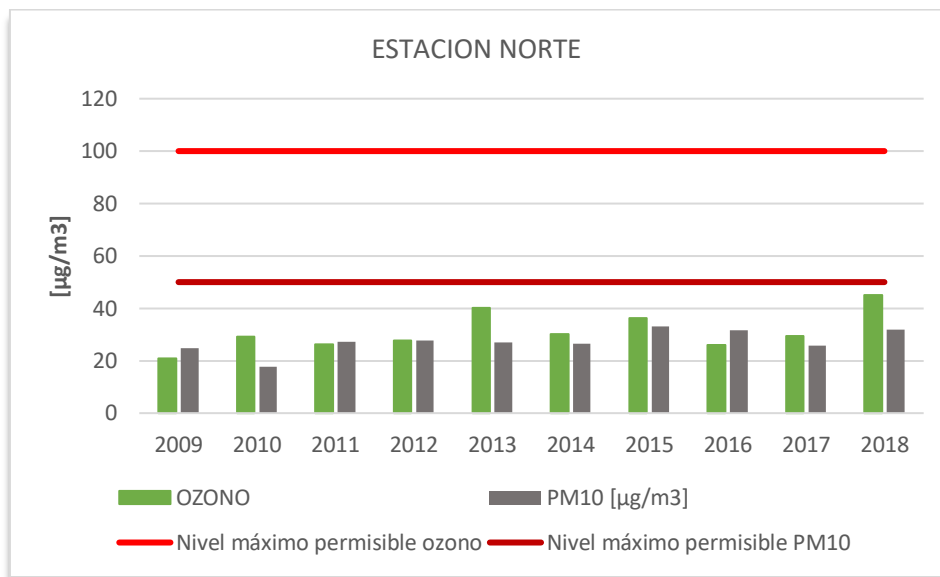


Ilustración 57. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación Norte

Fuente. Rivera 2019, a partir de la base de datos suministrada por la CDMB

En la ilustración 57 se observa que en la estación Norte los parámetros registrados de ozono y PM10 no superaron los niveles máximos permisibles que establece la resolución N°2254 del 1 de noviembre de 2017. Los picos máximos de contaminación por PM10 se registraron en los años 2015, 2016 y 2018 con 33.2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], 31.6 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y 31,8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente. La contaminación máxima por ozono se obtuvo en 2013, 2015 y 2018 con 40.1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], 36.3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y 45 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente.

4.2.5 Estación Florida.

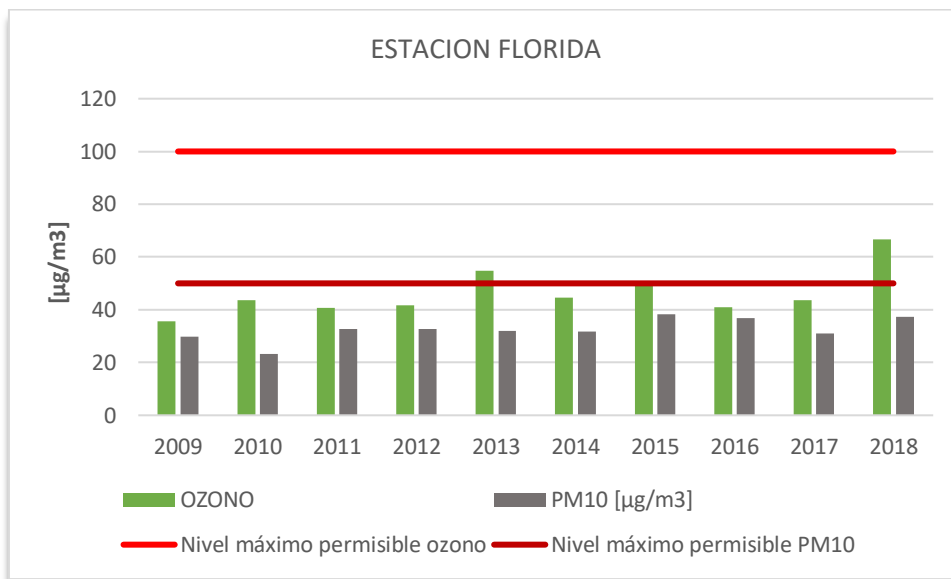


Ilustración 58. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación Florida

Fuente. Rivera, a partir de la base de datos suministrada por la CDMB

Como se observa en la ilustración 58 en la estación Florida los parámetros registrados de ozono y PM10 no superaron los niveles máximos permisibles que establece la resolución N°2254 del 1 de noviembre de 2017. Los picos máximos de contaminación por PM10 se registraron en los años 2015, 2016 y 2018 con 38.3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], 36.8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y 37.2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente. La contaminación máxima por ozono se obtuvo en 2013, 2015 y 2018 con 54.8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], 50.8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y 66.6 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente.

4.2.6 Estación Cabecera.



Ilustración 59. Comportamiento del ozono y PM10 en la estación Cabecera

Fuente. Elaboración propia, a partir de la base de datos suministrada por la CDMB

En la ilustración se observa en la ilustración 59 en la estación Cabecera los parámetros registrados de ozono y PM10 no superaron los niveles máximos permisibles que establece la resolución N°2254 del 1 de noviembre de 2017. Los picos máximos de contaminación por PM10 se registraron en los años 2015, 2016 y 2018 con 43.9 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], 42.2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y 40.2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente. La contaminación máxima por ozono se obtuvo en 2013, 2015 y 2018 con 39.3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], 39.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y 50.4 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente.

4.2.7 Estación Centro

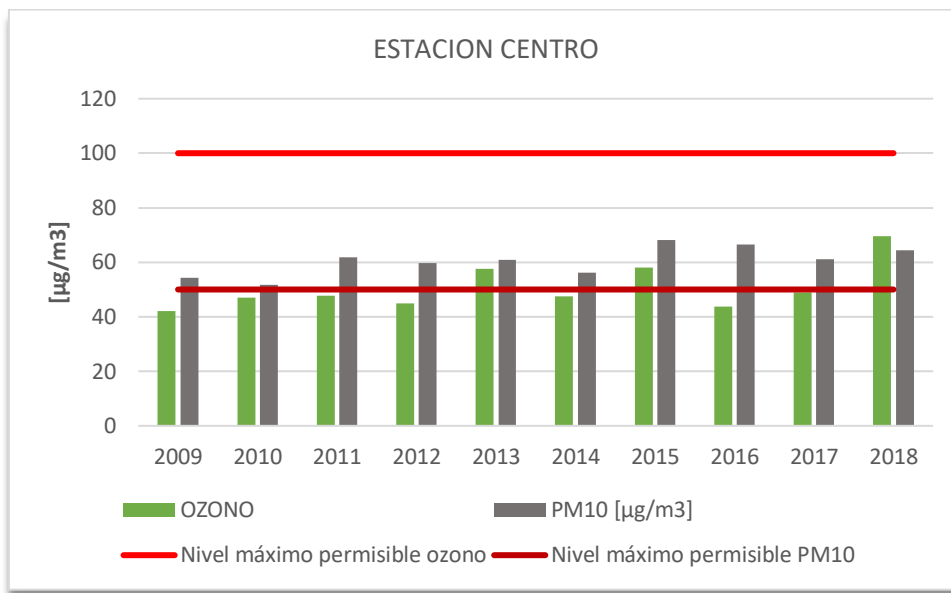


Ilustración 60. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación Centro

Fuente. Rivera 2019, a partir de la base de datos suministrada por la CDMB

Como se observa en la ilustración 60 en la estación Centro registra los parámetros de PM10 superaron los niveles máximos permisibles que establece la resolución N°2254 del 1 de noviembre de 2017, en el periodo de 2009 al 2018 con 54.4 [µg/m³], 51.8 [µg/m³], 61.7 [µg/m³], 59.8 [µg/m³], 60.91 [µg/m³], 56.1 [µg/m³], 68.1 [µg/m³], 66.5 [µg/m³], 61.2 [µg/m³] y 64.5 [µg/m³] respectivamente cronológicamente. En cuanto al ozono en ningún momento se superó el límite máximo establecido por la norma, pero si es superior referente a las demás estaciones.

4.2.8 Estación Ciudadela



Ilustración 61. Comportamiento de ozono y PM10 en la estación Ciudadela

Fuente. Rivera 2019, a partir de la base de datos suministrada por la CDMB

En la ilustración se observa en la ilustración 61 en la estación Ciudadela los parámetros registrados de ozono y PM10 no superaron los niveles máximos permisibles que establece la resolución N°2254 del 1 de noviembre de 2017. Los picos máximos de contaminación por PM10 se registraron en los años 2015, 2016 y 2018 con 39.9 [µg/m³], 38.4 [µg/m³] y 36.4 [µg/m³] respectivamente. La contaminación máxima por ozono se obtuvo en 2013, 2015 y 2018 con 44.5 [µg/m³], 45.1 [µg/m³] y 56.4 [µg/m³] respectivamente.

4.3 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

A partir de los resultados estadísticos obtenidos de las variables meteorológicas y la base de datos de los contaminantes atmosféricos de cada una de las estaciones en el área de estudio, se elaboró las tablas que muestran los valores de coeficientes de correlación en cada estación en función de las variables meteorológicas.

Donde:

P = Precipitación (mm)

HR = Humedad Relativa (%)

RS = Radiación Solar (kw/m².dia)

T = Temperatura (°C)

Vv = Velocidad del viento (m/s)

Dv = Dirección del viento (Grados)

En la tabla 5 se evidencia el coeficiente de correlación positivo que presentan las variables de humedad relativa, radiación solar y temperatura en relación a los valores de PM10 en todas las estaciones, es decir, que el comportamiento del contaminante es directamente proporcional a estas variables. Caso contrario ocurre con las variables de precipitación, humedad relativa y velocidad del viento, esto debido a su coeficiente de correlación negativo.

Tabla 5. Coeficiente de correlación entre variables meteorológicas y ozono

Variable	Coeficiente de correlación (r)							
	Joya	Concordia	San Miguel	Norte	Florida	Cabecera	Centro	Ciudadela
P	-0,622	-0,488	-0,523	-0,541	-0,538	-0,622	-0,626	-0,569
HR	-0,549	-0,397	-0,469	-0,435	-0,431	-0,485	-0,485	-0,432
RS	0,600	0,725	0,720	0,663	0,650	0,695	0,641	0,468
T	0,646	0,611	0,543	0,532	0,527	0,565	0,480	0,389
Vv	-0,775	-0,705	-0,703	-0,691	-0,688	-0,706	-0,672	-0,597
Dv	0,202	0,245	0,203	0,176	0,176	0,093	0,119	0,098

Fuente. Rivera, 2019

Como se observa en la tabla 6, al igual que con el PM10 el coeficiente de correlación del ozono con las variables de humedad relativa, radiación solar y temperatura es positivo en relación a todas las estaciones, es decir, que el comportamiento del contaminante es directamente proporcional a estas variables. Caso contrario ocurre con las variables de precipitación, humedad relativa y velocidad del viento, esto debido a su coeficiente de correlación negativo.

Tabla 6. Coeficiente de correlación entre variables meteorológicas y PM10

Variable	Coeficiente de correlación (r)							
	Joya	Concordia	San Miguel	Norte	Florida	Cabecera	Centro	Ciudadela
P	-0,027	-0,052	-0,068	-0,068	-0,070	-0,036	-0,510	-0,010
HR	--0,542	-0,577	-0,596	--0,578	-0,706	-0,710	-0,325	-0,707
RS	0,687	0,734	0,745	0,737	0,787	0,790	0,795	0,784
T	0,546	0,594	0,586	0,593	0,525	0,462	0,454	0,463
Vv	--0,612	-0,594	-0,614	--0,616	-0,592	-0,603	-0,698	-0,563
Dv	-0,205	-0,182	-0,178	-0,182	-0,148	-0,175	-0,169	-0,174

Fuente. Rivera, 2019

4.4 RESULTADOS DE COMPARACIÓN DE OZONO Y PM10 CON LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS DE LAS ESTACIONES CENTRO Y JOYA

4.4.1 Comparación de ozono y variables meteorológicas de la estación Centro.

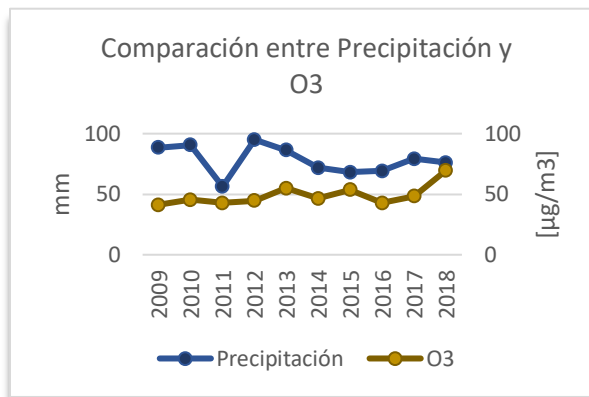


Ilustración 62. Comparación entre precipitación y ozono

Fuente. Rivera, 2019

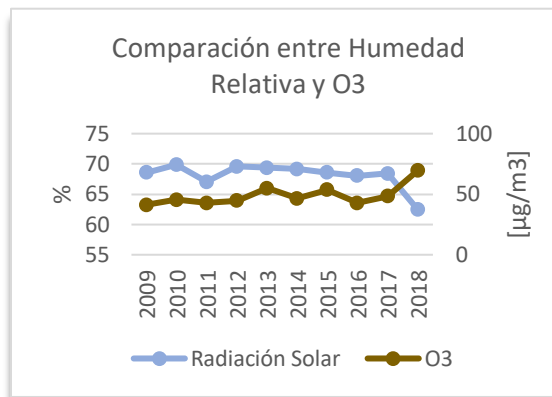


Ilustración 63. Comparación entre Humedad relativa y ozono

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 62 se observa una dependencia en más de la mitad de las variables ya que su coeficiente de correlación es de $-0,626$; lo que indica que es una correlación negativa, pero se aproxima más a una correlación negativa perfecta de -1 . Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2013, 2015, 2016 y 2018 donde se evidencia una relación inversa cercana entre las variables, es decir cuando las precipitaciones aumentan gran parte de las concentraciones de ozono disminuyen y viceversa

Como se observa en la ilustración 63 se las variables se comportan en sentido inverso, por su coeficiente de correlación igual a $-0,485$; lo que indica que es una correlación negativa donde los valores más altos de humedad relativa corresponden a los valores más bajos de concentración del ozono y viceversa. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2014 y 2018 donde $46,4$; $69,6$ $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ de ozono corresponde a $69,16$ y $62,44$ % humedad relativa respectivamente.

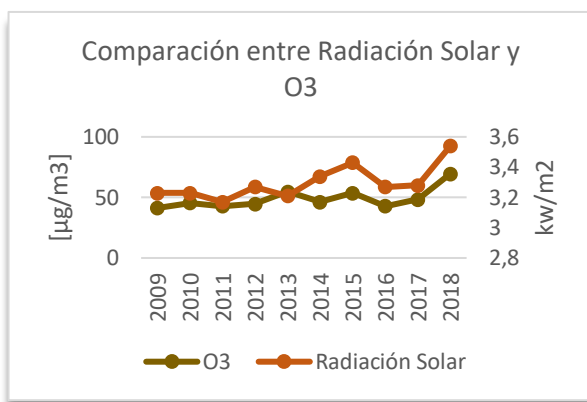


Ilustración 64. Comparación entre radiación solar y ozono

Fuente. Rivera, 2019

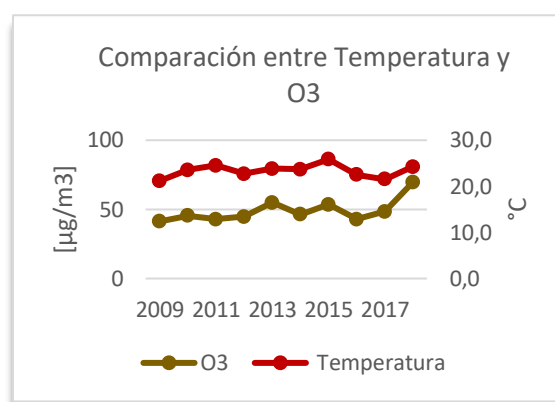


Ilustración 65. Comparación entre temperatura y ozono

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 64 se observa una dependencia en más de la mitad de las variables ya que su coeficiente de correlación es de 0,641; lo que indica que es una correlación positiva, pero se aproxima más a una correlación positiva perfecta de 1. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2010, 2015, 2016 y 2018 donde se evidencia una relación directa cercana entre las variables, como ocurre en el año 2015 cuando el ozono viene de 46,4 [µg/m³] y baja 53,6 [µg/m³], caso contrario a la radiación solar que viene de 3,34 kw/m².día y sube a 3,43 kw/m².día; es decir cuando las magnitudes de la radiación solar igualmente aumentan gran parte de las concentraciones de ozono.

Como se observa en la ilustración 65 las variables se comportan en sentido directo, por su coeficiente de correlación igual a 0,480; lo que indica que es una correlación positiva donde los valores más altos de temperatura corresponden a los valores más altos de concentración del ozono y viceversa. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2015 y 2018 donde 53,6 y 69,6 [µg/m³] de ozono corresponde a 25,9°C y 24,2 °C temperatura respectivamente.

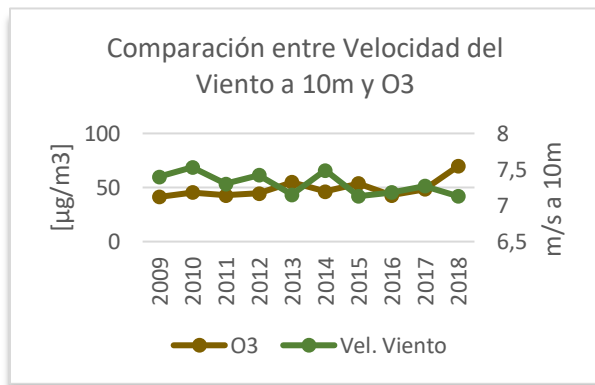


Ilustración 66. Comparación entre velocidad del viento y ozono

Fuente. Rivera, 2019

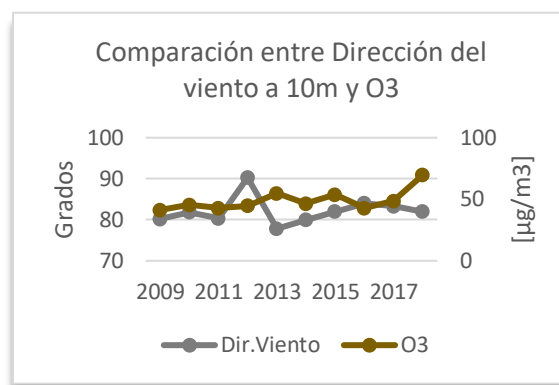


Ilustración 67. Comportamiento entre la dirección del viento y ozono

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 66 se observa una dependencia en más de la mitad de las variables ya que su coeficiente de correlación es de $-0,672$; lo que indica que es una correlación negativa, pero se aproxima más a una correlación negativa perfecta de -1 . Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2013, 2014, 2015 y 2018 donde se evidencia una relación inversa cercana entre las variables, es decir cuando las velocidades del viento aumentan gran parte las concentraciones de ozono disminuyen y viceversa

Como se observa en la ilustración 67 el mayor porcentaje de las variables se comportan de forma independiente, pero existe una leve relación lineal positiva como lo demuestra su coeficiente de correlación igual a $0,119$; lo que indica que hay una leve correlación positiva, pero se acerca más a que las concentraciones de ozono no presentan casi ninguna relación con la dirección del viento.

4.4.2 Comparación de ozono y variables meteorológicas de la estación Joya.

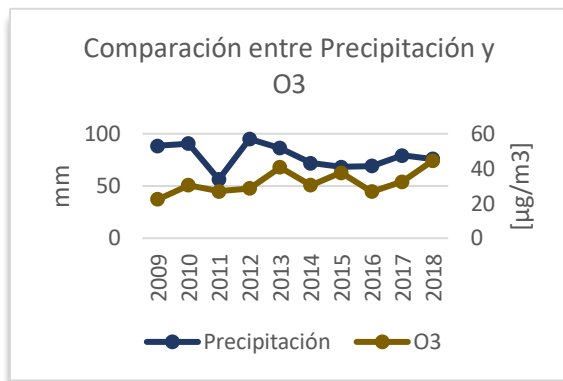


Ilustración 68. Comparación entre precipitación y ozono

Fuente. Rivera, 2019

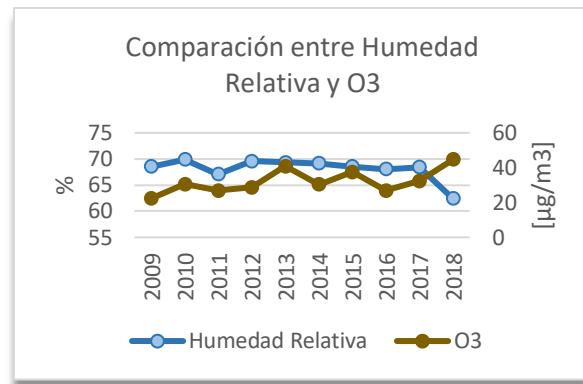


Ilustración 69. Comparación entre Humedad relativa y ozono

Fuente. Rivera, 2019

Como se identifica en la ilustración 68 se observa una dependencia en más de la mitad de las variables ya que su coeficiente de correlación es de $-0,622$, lo que indica que es una correlación negativa, pero se aproxima más a una correlación negativa perfecta de -1 . Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2013, 2015, 2016 y 2018 donde se evidencia una relación inversa cercana entre las variables, como ocurre en el año 2013 cuando el ozono viene de $95,05$ $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y baja $86,39$ $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, caso contrario a la precipitación que viene de $28,7$ mm y sube a $40,8$ mm; es decir cuando las precipitaciones aumentan las concentraciones de ozono disminuyen y viceversa

Como se observa en la ilustración 69 las variables se comportan en sentido inverso, por su coeficiente de correlación igual a $-0,549$, lo que indica que es una correlación negativa donde los valores más altos de humedad relativa corresponden a los valores más bajos de concentración del ozono y viceversa. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2015 y 2018 donde $37,6$ y $44,6$ $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ de ozono corresponde a $68,56\%$ y $62,44\%$ humedad relativa respectivamente.

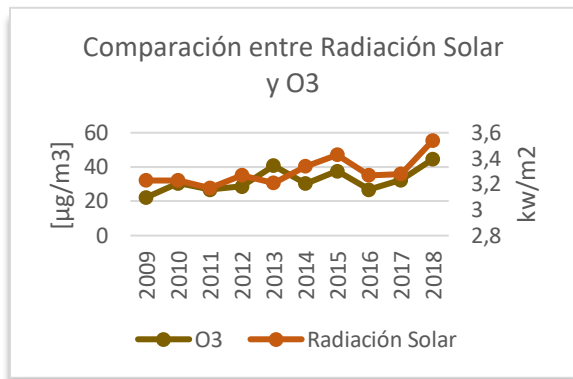


Ilustración 70. Comparación entre radiación solar y ozono

Fuente. Rivera, 2019

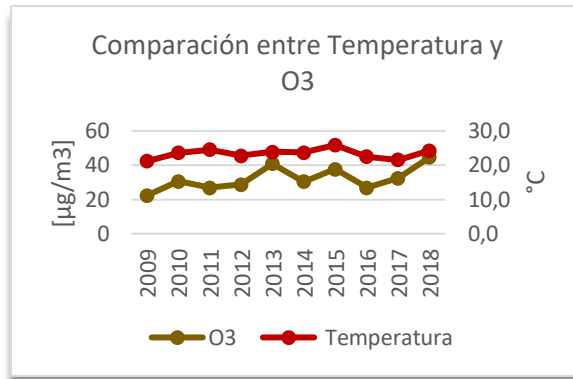


Ilustración 71. Comparación entre temperatura y ozono

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 70 se observa una dependencia en más de la mitad de las variables ya que su coeficiente de correlación es de 0,600; lo que indica que es una correlación positiva, pero se aproxima más a una correlación positiva perfecta de 1. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2015 y 2018 donde se evidencia una relación directa cercana entre las variables, como ocurre en el año 2018 cuando el ozono viene de 32,4 [µg/m³] y sube a 44,6 [µg/m³], caso contrario a la radiación solar que viene de 3,28 kw/m².dia y sube a 3,54 kw/m².dia; es decir cuando las magnitudes de la radiación solar igualmente aumentan gran parte de las concentraciones de ozono.

Como se observa en la ilustración 71 las variables se comportan en sentido directo, por su coeficiente de correlación igual a 0,646; lo que indica que es una correlación positiva donde los valores más altos de temperatura corresponden a los valores más altos de concentración del ozono y viceversa. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2015 y 2018 donde 53,6 y 69,6 [µg/m³] de ozono corresponde a 25,9°C y 24,2 °C de temperatura respectivamente.

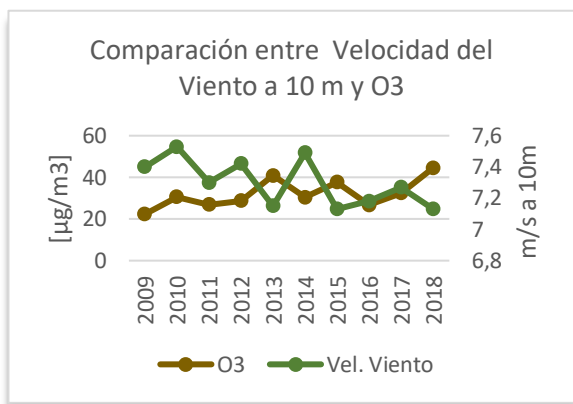


Ilustración 72. Comparación entre velocidad del viento y ozono

Fuente. Rivera, 2019

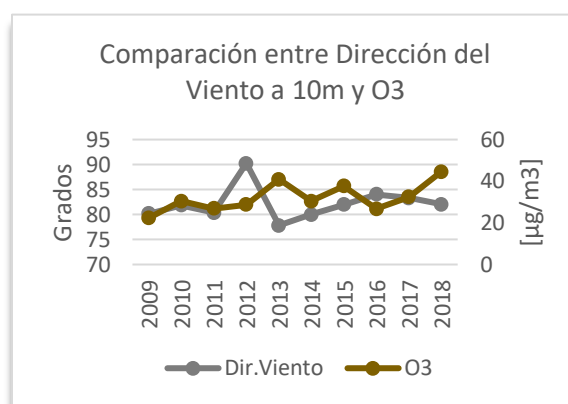


Ilustración 73. Comparación entre dirección del viento y ozono

Fuente. Rivera, 2019

Como se identifica en la ilustración 72 se observa una dependencia en más de la mitad de las variables ya que su coeficiente de correlación es de $-0,775$; lo que indica que es una correlación negativa, pero se aproxima más a una correlación negativa perfecta de -1 . Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2014, 2015 y 2018 donde se evidencia una relación inversa cercana entre las variables, es decir cuando las velocidades del viento aumentan gran parte las concentraciones de ozono disminuyen y viceversa.

Como se observa en la ilustración 73 el mayor porcentaje de las variables se comportan de forma independiente, pero existe una leve relación lineal positiva como lo demuestra su coeficiente de correlación igual a $0,202$; lo que indica que hay una leve correlación positiva, pero se acerca más a que las concentraciones de ozono y la dirección del viento no presentan casi ninguna relación.

4.4.3 Comparación de PM10 y variables meteorológicas de la estación Centro.

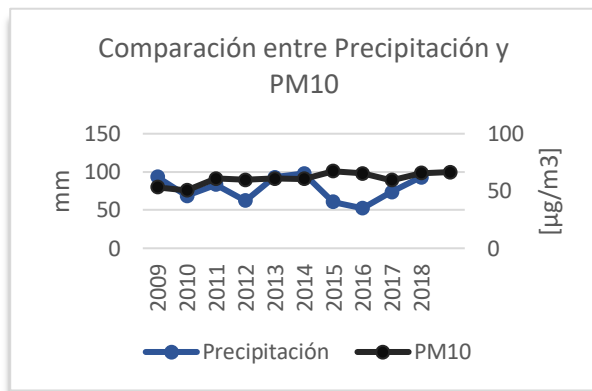


Ilustración 74. Comparación entre precipitación y PM10

Fuente. Rivera, 2019

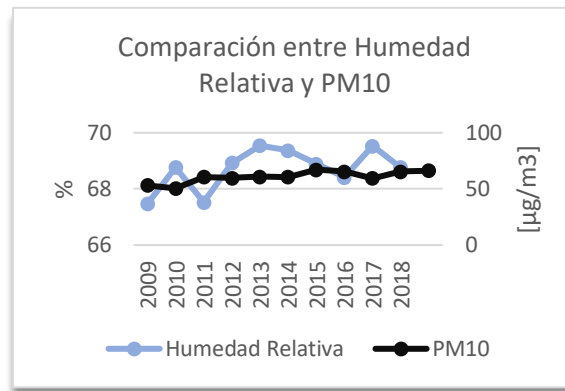


Ilustración 75. Comparación entre humedad relativa y PM10

Fuente. Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 74 gran parte de las variables se comportan de forma independiente, pero existe una leve relación lineal negativa como lo demuestra su coeficiente de correlación igual a $-0,010$; lo que indica que hay una leve correlación negativa, pero se acerca más a que las concentraciones de PM10 y la precipitación no presentan casi ninguna relación.

En la ilustración 75 las variables se comportan en sentido inverso, por su coeficiente de correlación igual a $-0,707$, lo que indica que es una correlación negativa donde los valores más altos de humedad relativa corresponden a los valores más bajos de concentración de PM10 y viceversa. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2015 y 2018 donde $37,6$ y $44,6$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de ozono corresponde a $68,56\%$ y $62,44\%$ humedad relativa respectivamente.

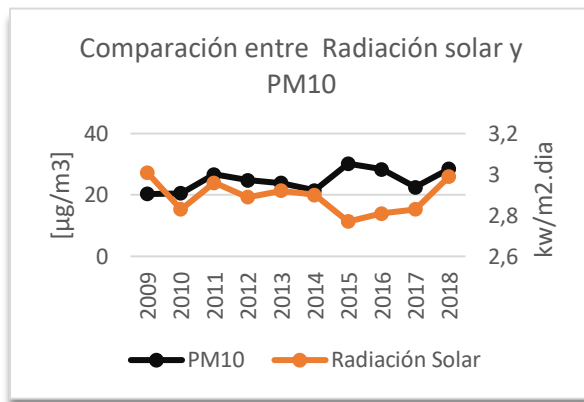


Ilustración 76. Comparación entre radiación solar y PM10

Fuente. Rivera, 2019

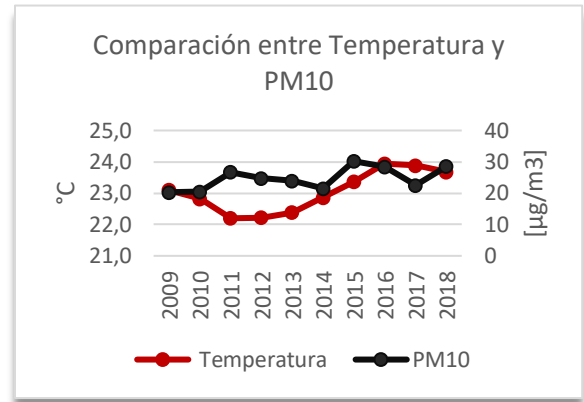


Ilustración 77. Comparación entre temperatura y PM10

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 76 se observa una dependencia en más de la mitad de las variables ya que su coeficiente de correlación es de 0,795; lo que indica que es una correlación positiva, pero se aproxima más a una correlación positiva perfecta de 1. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2011, 2012 y 2018 donde se evidencia una relación directa cercana entre las variables, como ocurre en el año 2018 cuando el PM10 viene de 22,5 [µg/m³] y sube a 28,5 [µg/m³], de igual modo la radiación solar que viene de 2,83 kw/m².día y sube a 2,99 kw/m².día; es decir cuando las magnitudes de la radiación solar igualmente aumentan gran parte de las concentraciones de PM10.

Como se observa en la ilustración 77 las variables se comportan en sentido directo, por su coeficiente de correlación igual a 0,454; lo que indica que es una correlación positiva donde los valores más altos de temperatura corresponden a los valores más altos de concentración del ozono y viceversa. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2014 y 2015 donde 21,5 y 30,2 [µg/m³] de PM10 corresponde a 22,9°C y 23,4 °C temperatura respectivamente.

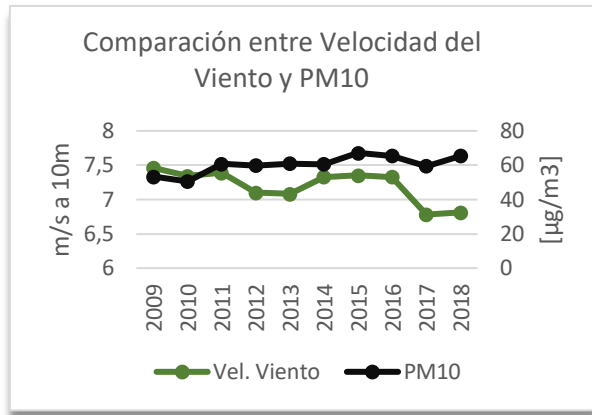


Ilustración 78. Comparación entre velocidad del viento y PM10

Fuente. Rivera, 2019

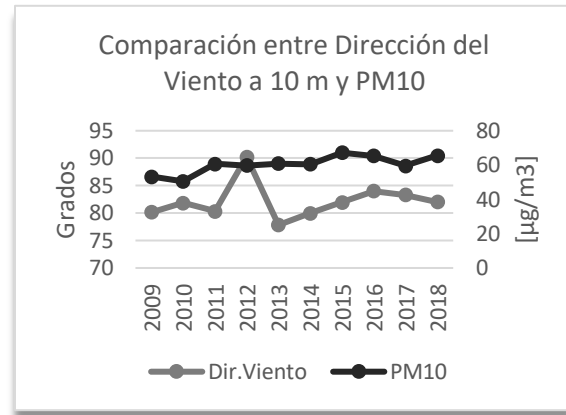


Ilustración 79. Comparación entre dirección del viento y PM10

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 78 se observa una dependencia en más de la mitad de las variables ya que su coeficiente de correlación es de $-0,598$; lo que indica que es una correlación negativa, pero se aproxima más a una correlación negativa perfecta de -1 . Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2012, 2014 y 2015 donde se evidencia una relación inversa cercana entre las variables, es decir cuando las velocidades del viento aumentan gran parte las concentraciones de PM10 disminuyen y viceversa

Como se observa en la ilustración 79 el mayor porcentaje de las variables se comportan de forma independiente, pero existe una leve relación negativa como lo demuestra su coeficiente de correlación igual a $-0,169$; lo que indica que hay una leve correlación negativa, pero se acerca más a que las concentraciones de PM10 no presentan casi ninguna relación con la dirección del viento.

4.4.4 Comparación de PM10 y variables meteorológicas de la estación Joya

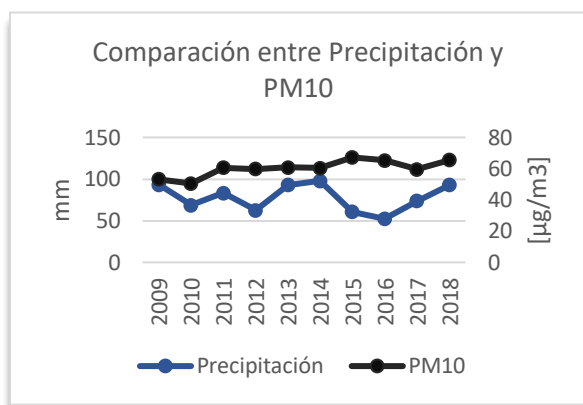


Ilustración 80. Comparación entre precipitación y PM10

Fuente. Rivera, 2019

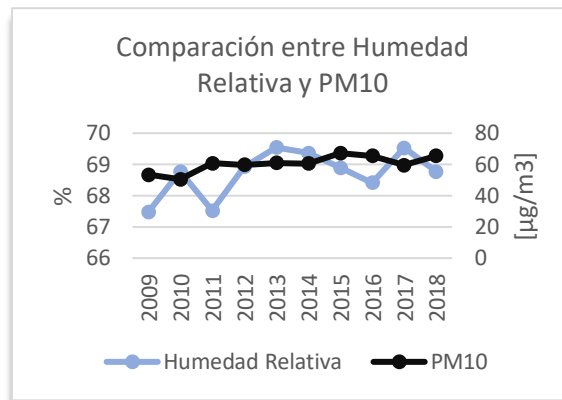


Ilustración 81. Comparación entre humedad relativa y PM10

Fuente. Rivera, 2019

Como se observa en la ilustración 80 gran parte de las variables se comportan de forma independiente, pero existe una leve relación lineal negativa como lo demuestra su coeficiente de correlación igual a $-0,027$; lo que indica que hay una leve correlación negativa, pero se acerca más a que las concentraciones de PM10 y la precipitación no presentan casi ninguna relación.

Como se observa en la ilustración 81 las variables se comportan en sentido inverso, por su coeficiente de correlación igual a $-0,542$, lo que indica que es una correlación negativa donde los valores más altos de humedad relativa corresponden a los valores más bajos de concentración de PM10 y viceversa. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2016 y 2017 donde $65,4$ y $59,5$ $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ de ozono corresponde a $68,41\%$ y $69,53\%$ humedad relativa respectivamente.

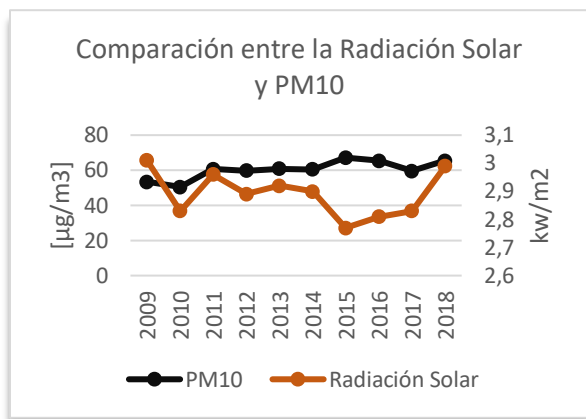


Ilustración 82. Comparación entre radiación solar y PM10

Fuente. Rivera, 2019

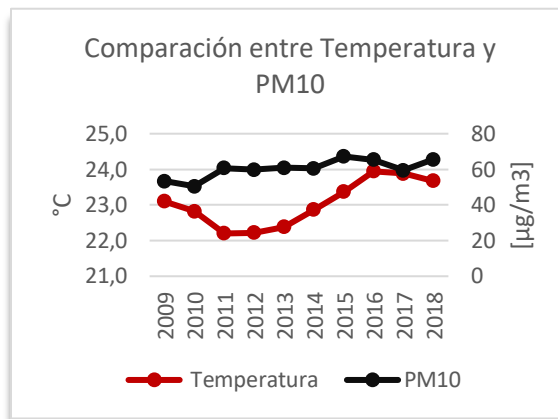


Ilustración 83. Comparación entre temperatura y PM10

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 82 se observa una dependencia en más de la mitad de las variables ya que su coeficiente de correlación es de 0,687; lo que indica que es una correlación positiva, pero se aproxima más a una correlación positiva perfecta de 1. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2010, 2011 y 2017 donde se evidencia una relación directa cercana entre las variables, como ocurre en el año 2011 cuando el PM10 viene de 50,5 [µg/m³] y sube a 60,7 [µg/m³], de igual modo la radiación solar que viene de 2,83 kw/m².día y sube a 2,96 kw/m².día; es decir cuando las magnitudes de la radiación solar igualmente aumentan gran parte de las concentraciones de PM10.

Como se observa en la ilustración 83 las variables se comportan en sentido directo, por su coeficiente de correlación igual a 0,546; lo que indica que es una correlación positiva donde los valores más altos de temperatura corresponden a los valores más altos de concentración del ozono y viceversa. Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2016 y 2018 donde 65,4 y 65,5 [µg/m³] de PM10 corresponde a 23,9°C y 23,5 °C temperatura respectivamente.

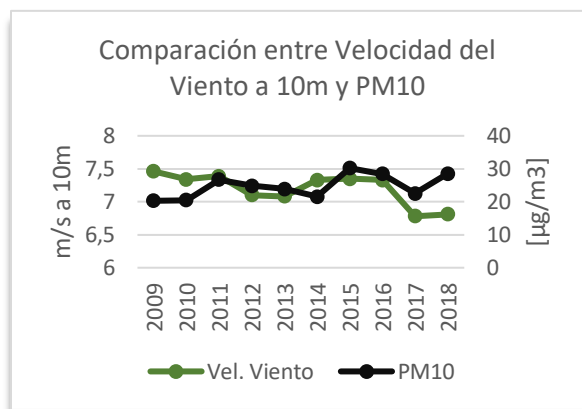


Ilustración 84. Comparación entre velocidad del viento a 10m y PM10

Fuente. Rivera, 2019

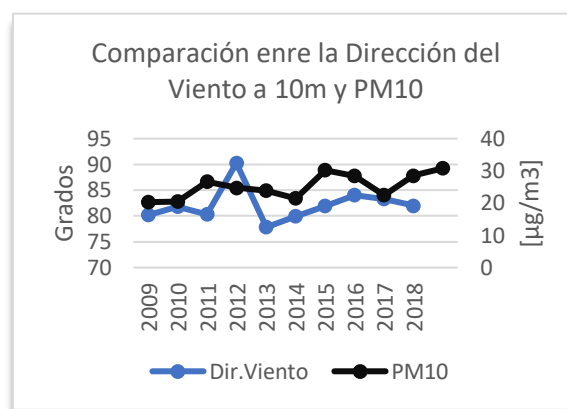


Ilustración 85. Comparación entre dirección del viento a 10m y PM10

Fuente. Rivera, 2019

En la ilustración 84 se observa una dependencia en más de la mitad de las variables ya que su coeficiente de correlación es de $-0,775$; lo que indica que es una correlación negativa, pero se aproxima más a una correlación negativa perfecta de -1 . Este comportamiento se presenta especialmente en los años 2010, 2014 y 2015 donde se evidencia una relación inversa cercana entre las variables, es decir cuando las velocidades del viento aumentan gran parte las concentraciones de PM10 disminuyen y viceversa

Como se observa en la ilustración 85 el mayor porcentaje de las variables se comportan de forma independiente, pero existe una leve relación negativa como lo demuestra su coeficiente de correlación igual a $-0,202$; lo que indica que hay una leve correlación negativa, pero se acerca más a que las concentraciones de PM10 no presentan casi ninguna relación con la dirección del viento.

4.5 RESULTADOS RELACIÓN ENTRE VARIABLES METEOROLÓGICAS Y CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Se establece las relaciones de los contaminantes atmosféricos PM10 y ozono en función de las variables meteorológicas precipitación, humedad relativa, temperatura, radiación solar, velocidad y dirección del viento. Con el fin de obtener una mayor amplitud de la

relación se empleó las estaciones de la calidad del aire que registrarán los máximos y menores valores de concentraciones de contaminantes; dichas estaciones son Centro y Joya respectivamente

4.6 ANALISIS DE PM10

4.6.1 Exploración estadística de los datos muestrales PM10.

El objetivo es obtener los estadísticos univariados de las partículas menores a diez micrómetros (PM10) utilizando algunas herramientas estadísticas y graficas del análisis exploratorio de datos de la extensión *Geostatistical Analyst*.

La descripción univariada de las medias anuales de partículas (PM10) en Bucaramanga (ver tabla 7) muestra que hay gran concentración de valores observados en torno a la media, de ahí el alto valor de la curtosis de 2,2. Su asimetría es positiva, con una cola de distribución que apunta hacia la derecha ya que tiene como valor 1,1 (ilustración 86A). La distribución de los datos tampoco es normal (ilustración 86B) y muestra una tendencia de aumento de los valores hacia la dirección NE-SW (véase ilustración 86C). La superficie del semivariograma (ilustración 86D), obtenida a partir del semivariograma empírico, confirma que la semivarianza de los datos de partículas (PM10) en Bucaramanga presenta diferencias espaciales, tanto en función de la distancia como en función de la dirección. Se puede observar que los valores más bajos de la semivarianza tienen dirección NW-SE, mientras que desde la zona central los valores aumentan en dirección NE-SW.

Tabla 7. Estadísticos de los datos muestrales de PM10

Estadísticos	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Media	43,3
Mínimo	31
Máximo	66
Desviación estándar	13,5
Asimetría	1,1

Curtosis	2,2
Q1	33
Q2	39
Q3	57,3

Fuente. Rivera, 2019

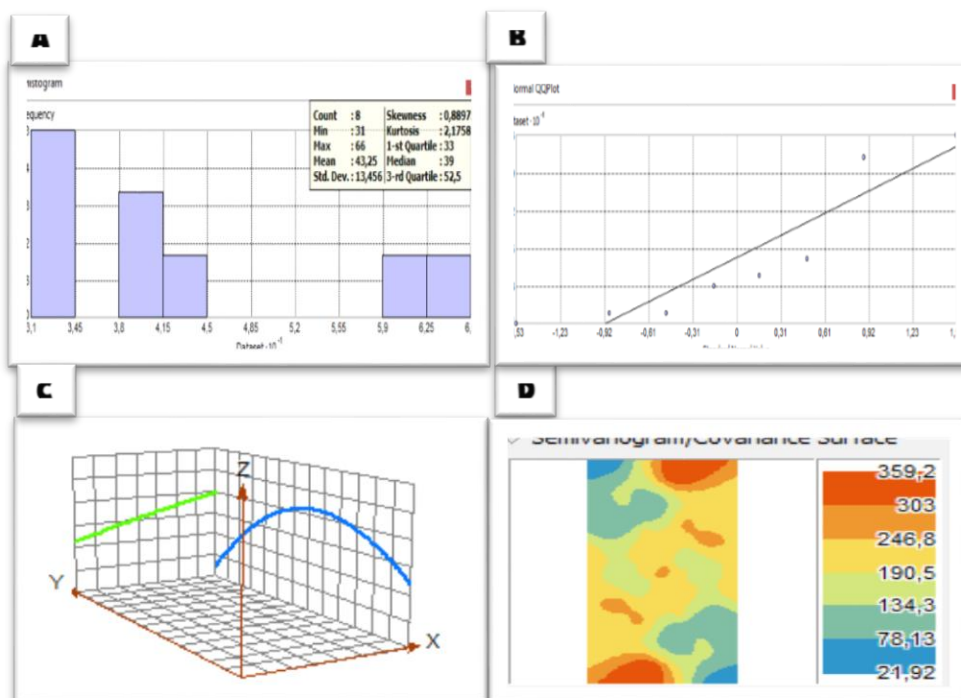


Ilustración 86. Análisis exploratorio de datos muestrales de PM10

Fuente. Rivera, 2019

4.6.2 Análisis estructural PM10.

Para descubrir la estructura espacial de los datos se ha utilizado el GPI y el ajuste teórico del semivariograma empírico. La superficie calculada con el GPI de segundo grado adopta la forma de elipse, con el eje más grande en sentido NW-SE y el eje más corto en dirección NE-SW (ilustración 87A). Los valores estimados son más elevados desde la zona central hacia la dirección NE-SW de la elipse y disminuyen de manera gradual en sentido NE-SW; sin embargo, la disminución es más rápida desde el centro en sentido NW-SE.

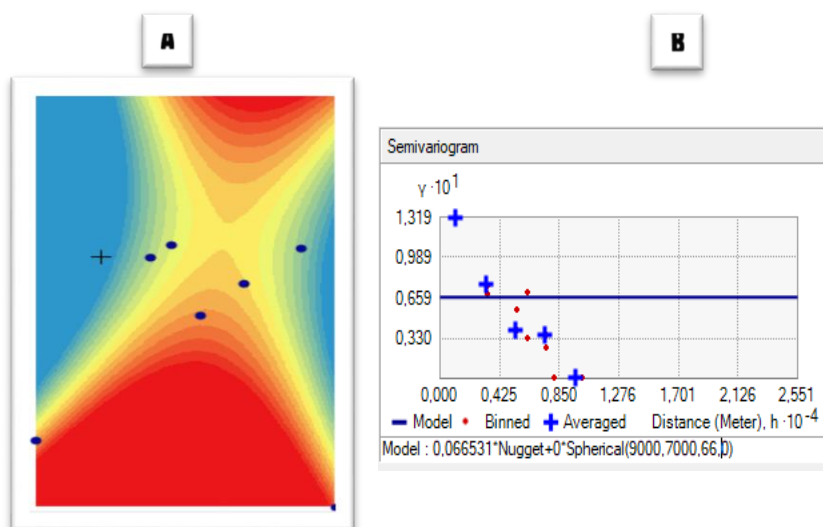


Ilustración 87. Superficie estimada con el GPI de segundo grado (A) y ajuste del semivariograma teórico (B) a los datos de PM10

Fuente. Rivera, 2019

La utilización de GPI permite constatar espacialmente que no existe comportamiento isotrópico de PM10 en Bucaramanga, a partir de los datos registrados en las estaciones. El modelo de ajuste del semivariograma empírico (ilustración 87B) ha adoptado los siguientes valores: $0,066531 * \text{Nugget} + 0 * \text{Spherical} (9000,7000,66,0)$. Agrupando los datos en 10 intervalos con una amplitud de 500 m. Es decir, la distancia a la que la varianza de la variable se estabiliza es 9000m en sentido NE-SW; por el contrario, esa varianza se estabiliza a 7000 m en sentido NW-SE. Se recuerda que con estos parámetros se ha obtenido un RMSE 17,7 y un valor RMSSE un poco por encima de 1,63.

4.6.3 Validación del modelo de PM10.

El proceso de interpolación termina con la validación del método IDW que proporciona los menores errores de la predicción en ambos métodos.

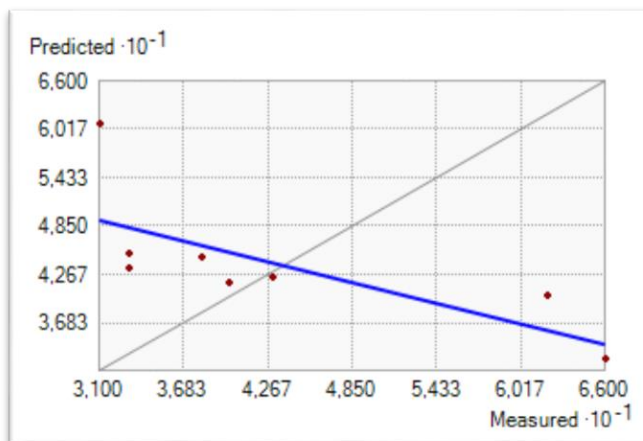


Ilustración 88. Dispersión de los valores predichos frente a los valores muestrales de PM10 por cada punto

Fuente. Rivera, 2019

La ilustración 88 muestra el gráfico de dispersión de los valores predichos frente a los valores medidos para cada punto, junto con una línea de regresión azul para los puntos que adopta la función de $0,4292908552448 \cdot x + 62,5058073106875$. En una situación ideal, los valores predichos serán cercanos a los valores medidos. Se muestra una línea de referencia de color gris en la ventana para evaluar la cercanía de la línea de regresión a este ángulo ideal de 45 grados. Para este punto, la línea de regresión azul es un poco más plana que la línea de referencia gris y existe una gran variabilidad en los puntos alrededor de las líneas.

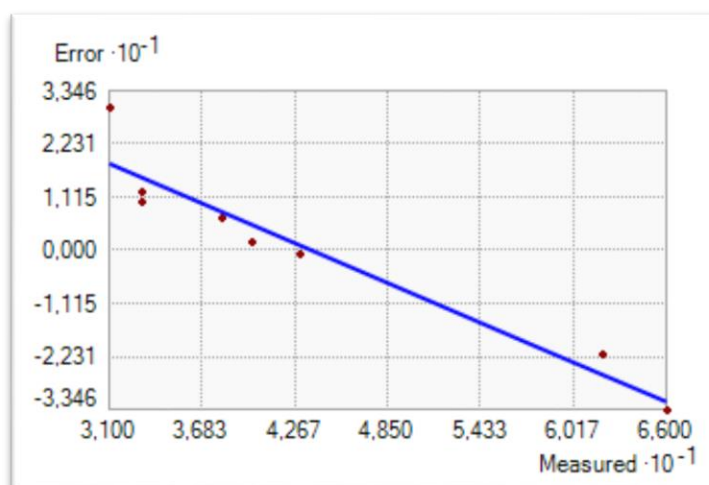


Ilustración 89. Errores de la validación

Fuente. Rivera, 2019

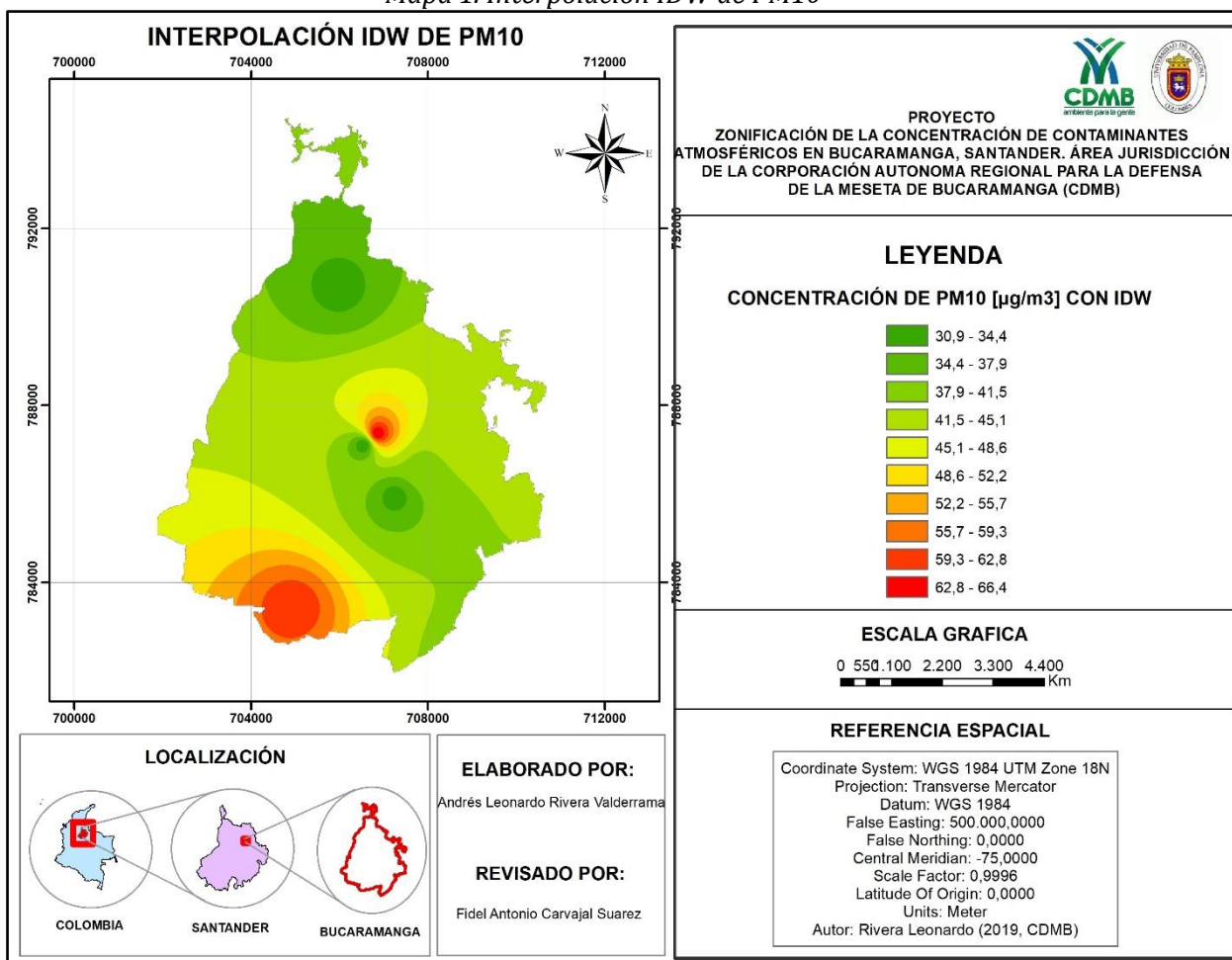
La ilustración 89 muestra un gráfico de dispersión de los valores medidos respecto de los errores de validación. La función de regresión que representa los errores es $-1,4292 * x + 62,5058$ revelando que la línea de regresión es decreciente, lo que indica que los valores medidos más altos estaban predichos por defecto y los valores medidos más bajos estaban predichos por exceso.

El valor cuadrático medio es de aproximadamente 12,413 lo que indica, en promedio, los errores de la validación se desviaron de los valores reales un poco más de 12 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de PM10.

En promedio, se está realizando predicciones que son aproximadamente 0,698 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] demasiado altas. Con un valor medio relativamente alto, se puede suponer con cierta seguridad que el modelo presenta desviación.

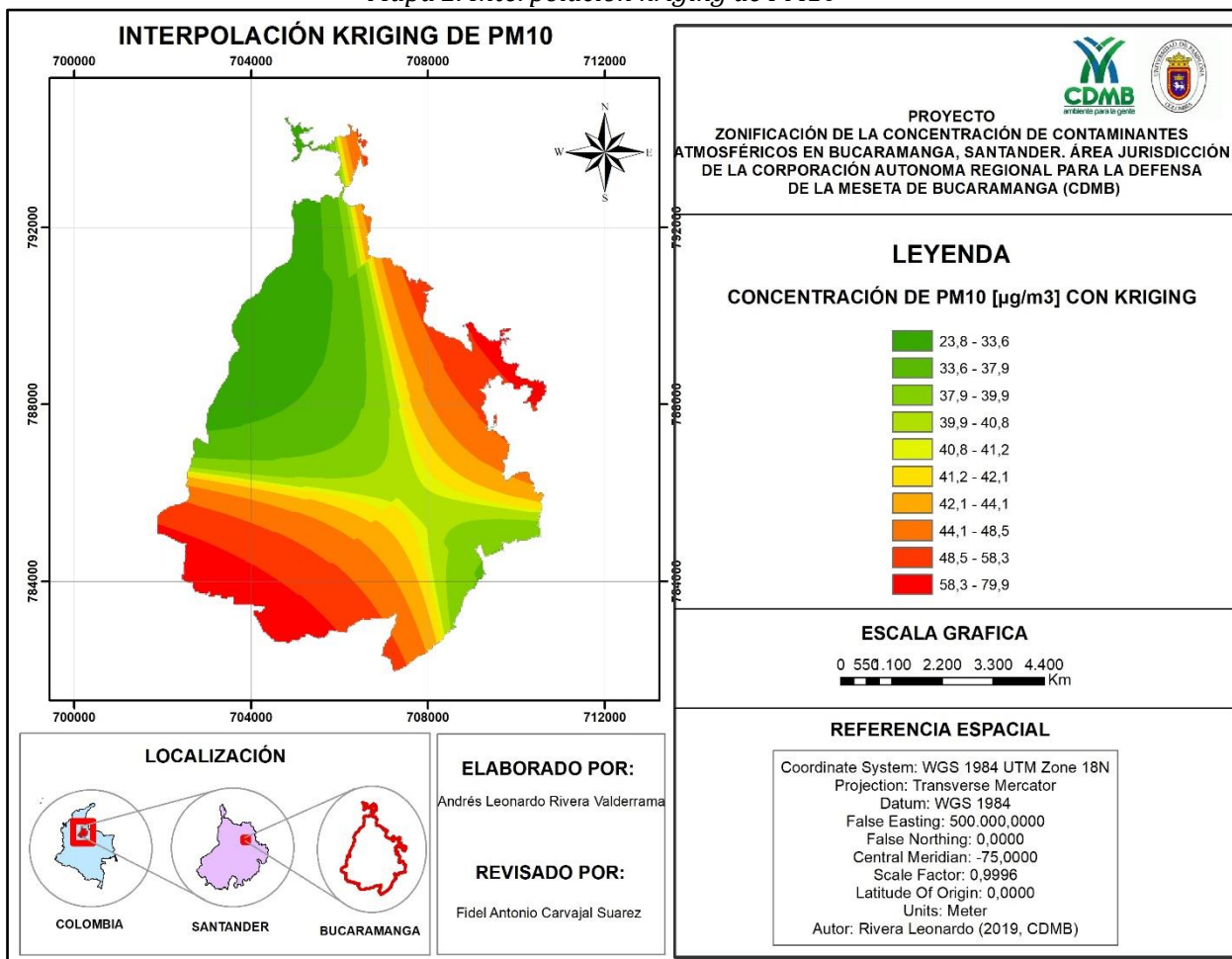
4.6.4 Mapas de interpolación con IDW y kriging de PM10

Mapa 1. Interpolación IDW de PM10



Fuente: Rivera, 2019

Mapa 2. Interpolación kriging de PM10



Fuente: Rivera, 2019

Como consecuencia de la transformación a ráster se ha podido constatar que mientras la capa interpolada por IDW no experimentaba ningún cambio en la amplitud de los valores pronosticados, que por otra parte coincidían con los del Kriging, la capa del kriging, al transformarla a ráster, sufría un cambio en sus cifras, subiendo sus valores máximos de 66,4 [µg/m³] a 79,9 [µg/m³] y bajando los mínimos de 30,9 [µg/m³] a 23,8 [µg/m³], consecuencia del fuerte suavizado que realiza el kriging.

Tabla 8. Estadísticos descriptivos de PM10 en las capas interpoladas de los modelos

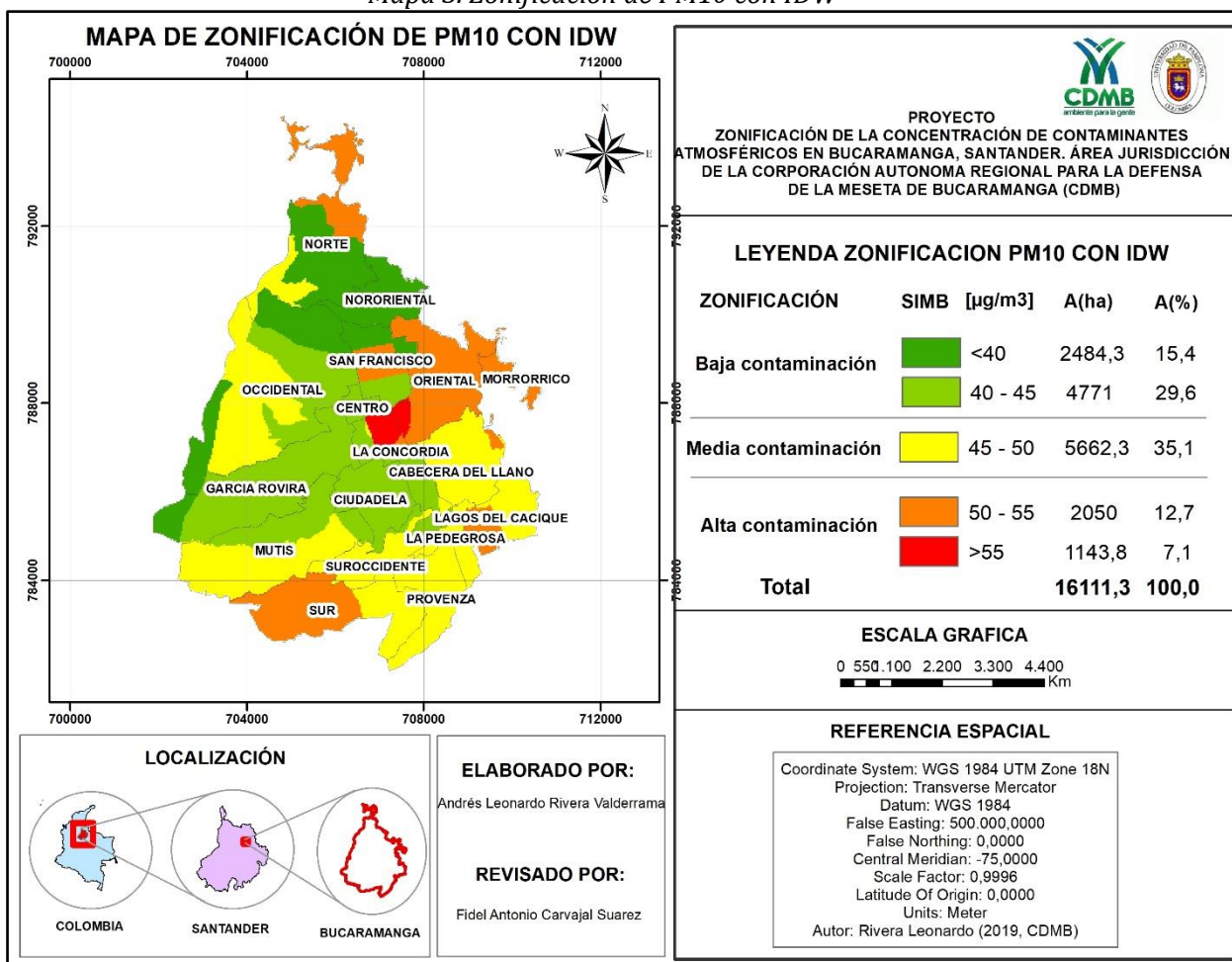
Estadísticos	IDW	KRIGING
Media	60,2	60,5

Desviación	12,6	15,1
Maximo	66,4	79,9
Minimos	30,9	23,8

Fuente. Rivera, 2019

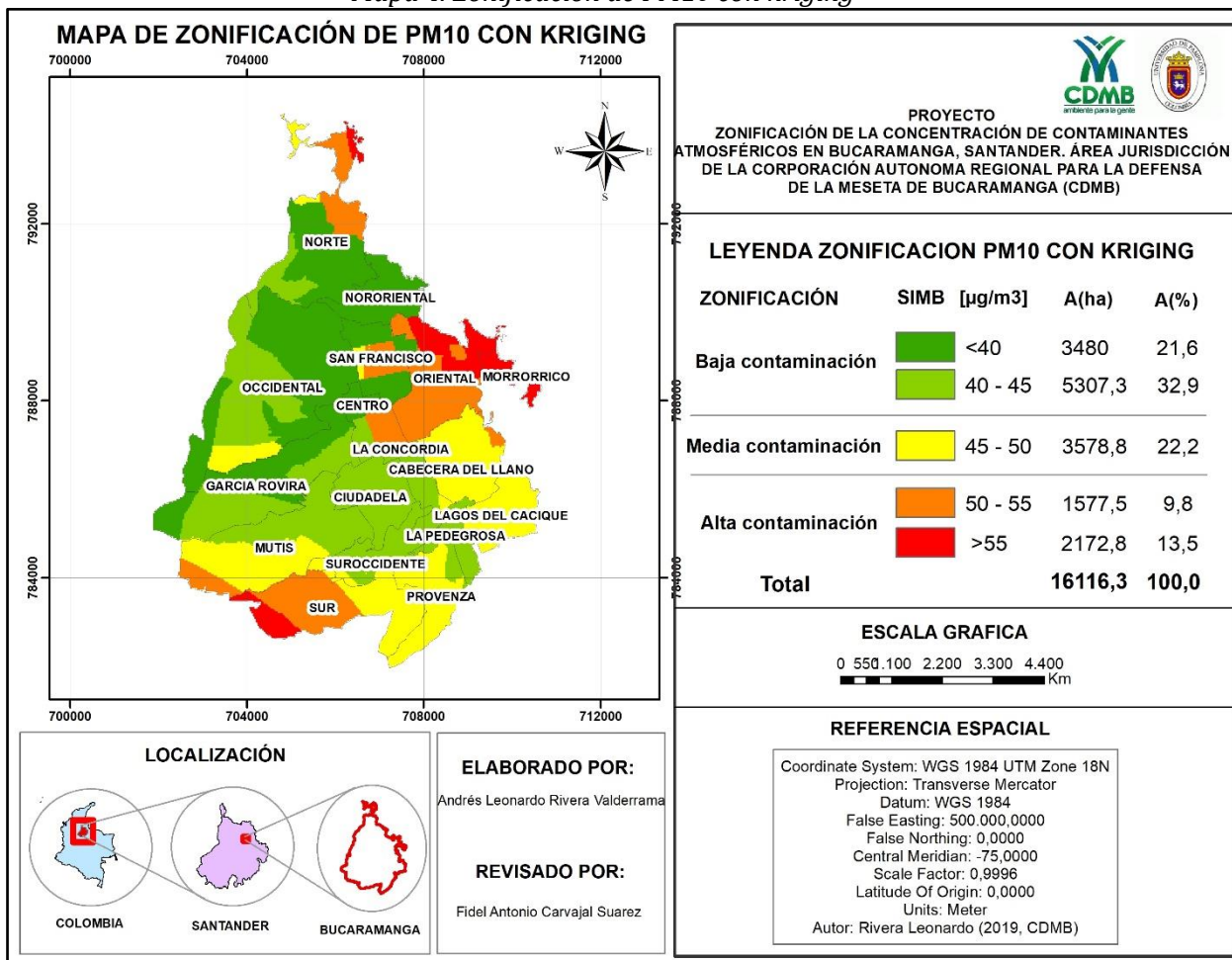
4.6.5 Mapas de zonificación con IDW y kriging de PM10

Mapa 3. Zonificación de PM10 con IDW



Fuente: Rivera, 2019

Mapa 4. Zonificación de PM10 con kriging



Fuente. Rivera, 2019

Los mapas de zonificación muestran a grandes rasgos una idéntica distribución espacial, con una zona occidental con las menores concentraciones de PM10 y un sector noroccidente y suroriente, con las mayores concentraciones de PM10 en que se supera el umbral de los 50 [µg/m³], estos mapas nos muestra tres ámbitos donde más veces se supera el umbral diario de 50 [µg/m³]; una zona oriental entorno a las comunas Centro, Cabecera del Llano, Lagos del Cacique, Oriental y la Concordia, otro sector al sur, extendido por la comuna Sur y una tercera zona en pequeña proporción al norte en la comuna Norte.

Las razones que pueden explicar esta distribución espacial son:

- En el primer y tercer caso la alta densidad de tráfico de esas comunas, como lo informa la Dirección de Tránsito de Bucaramanga entorno a:
 - ✓ La autopista a Floridablanca, desde el puente de Provenza hasta la Puerta del Sol en sentidos Sur - Norte y Norte - Sur.
 - ✓ la carrera 27 desde la calle 48 hasta la Puerta del Sol, en sentido Norte - Sur.
 - ✓ la carrera 33 y abarca el tramo desde la calle 45 hasta el Centro Comercial Cacique, en sentido Norte – Sur.
 - ✓ Al oriente, la vía más transitada es la calle 36 desde el parque García Rovira hasta la carrera 27.
 - ✓ Al norte de la ciudad desde el CAI de La Virgen hasta el barrio Kennedy.
- En el segundo caso hay que mencionar además del tráfico (en el túnel vehicular de la carrera 17), y en el tercero caso al igual que el segundo al ser zonas con una pobre cobertura vegetal con grandes espacios de suelos desnudos secos, más fácilmente erosionables y expuestos durante todo el año a la acción del viento. Estas circunstancias unidas a las bajas precipitaciones, que provocan un menor lavado de la atmosfera, influyen en que estas partículas permanezcan durante más tiempo en suspensión.

Otro factor que también contribuye es de tipo meteorológico y es la intensa actividad convectiva, inducida por la alta insolación sobre estas zonas de suelos desprotegidos, que se registra durante el verano.

Las zonas con menor frecuencia de concentraciones superiores a 50ug/m³ se pueden dividir en dos sectores, uno al noroeste, con las comunas Occidental y García Rovira, donde existen menos concentraciones que superen el nivel máximo permisible, y otro al suroeste, entorno a las comunas Mutis y Suroccidente.

En el mapa resultante del modelado por el kriging se encuentra muy similar a la distribución espacial el IDW, si bien las zonas menos contaminadas aparecen más extendidas hacia el oeste, desde la parte central.

En cuanto a las zonas con mayor contaminación por partículas, se localizan igualmente en dos sectores, uno al centro en dirección este, en torno a Centro, La Concordia, Cabecera del Llano, Lagos del Cacique y Orienta, pero con un apéndice hacia el extremo noroeste de la ciudad (Comuna Norte); y otro al sur, de menor importancia y extensión, como en el caso del IDW, donde se superan los 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] el nivel máximo permisible establecido. Las comunas de Centro, San Francisco, La Concordia, Ciudadela, La Pedregosa, Lagos del Cacique, Cabecera del Llano y Oriental, son comunas con una elevada población (según datos del DANE, 2017) y por tanto con mayor número de personas expuestas a los problemas de salud que ocasiona la contaminación por partículas.

Al observar en detalle ambos mapas se evidencia una serie de diferencias. En el mapa de interpolación por el kriging se destaca una zona de mucha contaminación en las comunas Oriental, Morrorrico y Sur que no aparecen en el IDW, y que corresponde a la estación de Cabecera y San Miguel, que presenta los niveles que superan los 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], pero a pesar de estar rodeadas de estaciones con valores mucho más bajos, el suavizado realizado por el kriging no es lo suficiente para difuminar los valores extremos y mínimos. Igualmente, en el mapa obtenido por el IDW aparece en su totalidad la menor contaminación entorno a la estación de Norte, y la de mayor contaminación en la estación Centro donde se superan los 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de PM10.

Es decir, el modelado realizado con el kriging, devalúa los valores extremos (altos y bajos), de cara a obtener un menor error en la estimación, pero en este caso al tener pocos datos muestrales, no se logra producir un suavizado generalizado. Por el contrario, el modelado con IDW, tiende a crear puntos de concentración o a formar islas en torno a los puntos muestrales, donde demostró mejores resultados en la predicción.

4.6.6 Comparación de resultados entre ambos métodos de interpolación de PM10

4.7.6.1 Numero de pixeles en cada intervalo con su respectivo porcentaje de PM10

Se utiliza el programa Excel. Con todos los cálculos realizados se confecciona una tabla para una mejor comparación de los resultados (ver tabla 9).

Tabla 9. Superficie ocupada por cada intervalo en los dos métodos de interpolación

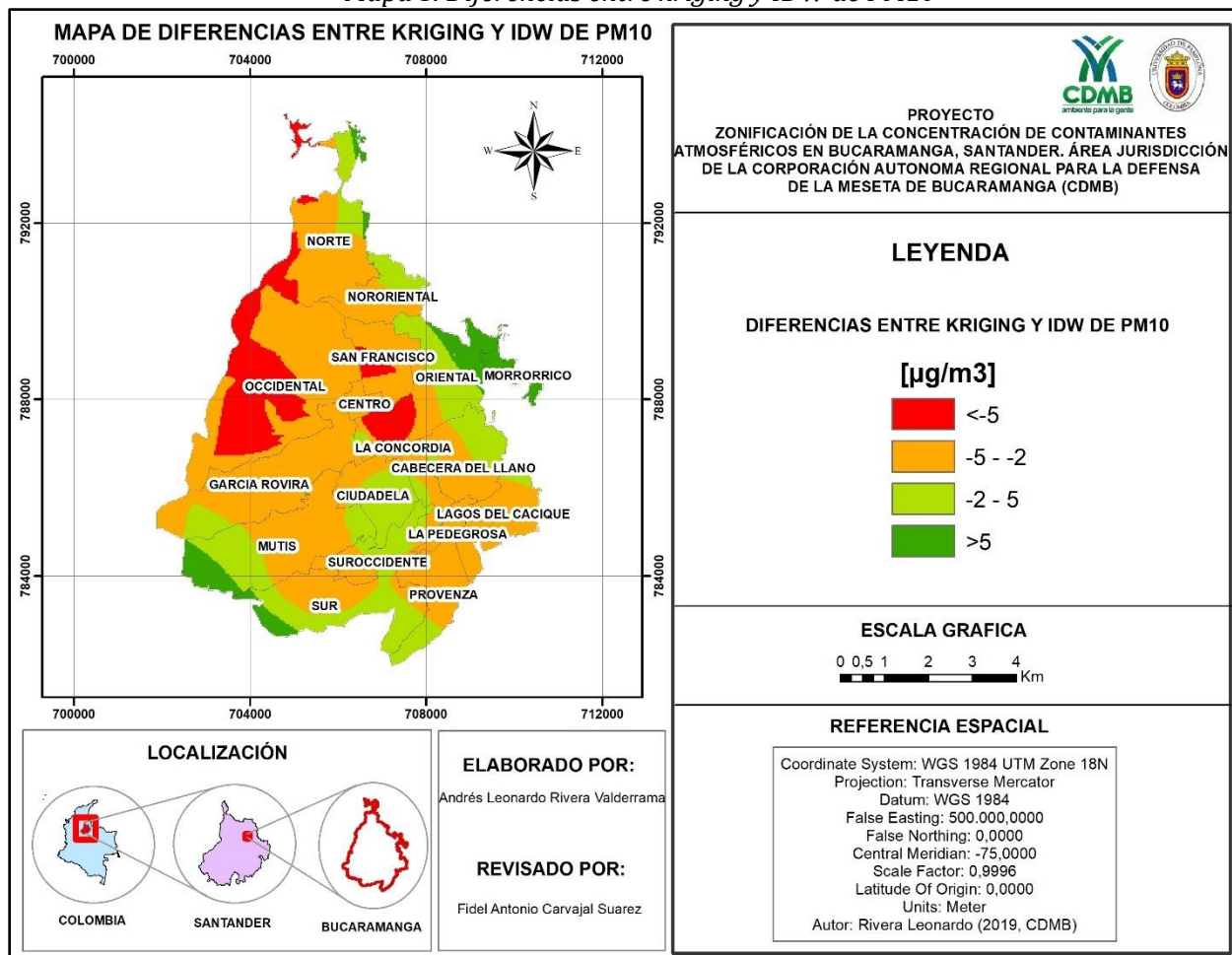
Intervalos	IDW	%	KRIGING	%
	pixeles		pixeles	
<40	621	15,4	870	21,6
40 - 45	1193	29,6	1327	32,9
45 - 50	1417	35,1	895	22,2
50 - 55	513	12,7	394	9,8
>55	284	7,1	542	13,5
TOTAL	4028	100	4028	100
1 píxel = 0,25 ha				

Fuente: Rivera, 2019

El espacio ocupado por encima de los 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (expresado en colores rojo y anaranjado) representa el 19,8% en la superficie interpolada por el IDW-PID, frente al 14,3% en la superficie interpolada por el Kriging; existen mayores diferencias entre capas al comparar los intervalos por debajo de 45 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (tonos verdosos): 45% en el IDW Y 63,5% en el kriging. En la superficie obtenida con el kriging, la clase entre 40 y 45 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] es la que representa la máxima superficie con el 44,2%, mientras que en la capa interpolada con IDW-PID está entre 45 y 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] con 35,3%.

4.7.6.2 Diferencias entre las capas interpoladas de PM10

Mapa 5. Diferencias entre kriging y IDW de PM10



Fuente: Rivera, 2019

El mapa resultante del patrón espacial, muestra que las mayores diferencias positivas entre ambos métodos se localizan en zonas con menor concentraciones de PM10 que no superan el umbral de 50 [µg/m³], son zonas donde la interpolación por el kriging había pronosticado unos valores por encima de los observados y de los pronosticados por el IDW-PID, de ahí que al restar esas capas, el resultado sea positivo, corresponde a las comunas Nororiental, Ciudadela y en menores proporciones a Norte y Mutis; por el contrario, las mayores diferencias negativas aparecen en las áreas donde se contabilizaban más concentraciones de contaminación por partículas, y es ahí, donde la interpolación por el

kriging aumenta los valores predichos respecto a los observados y los interpolados por el IDW-PID (de 81,2 a 85,1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]), por esta razón al restar esos espacios el resultado es positivo.

4.6.7 Valoración de la situación de PM10 en Bucaramanga según ambos métodos de interpolación.

Ambos métodos de interpolación coinciden en señalar a las comunas Nororiental, García Rovira y Ciudadela ubicadas al noreste y suroeste respectivamente, como las zonas de mayor calidad ambiental en cuanto a contaminación por partículas, mientras que las zonas de Oriental, La Concordia y San Francisco, son las comunas con peor calidad ambiental.

La variabilidad obtenida por el modelo kriging es mayor que la del IDW. El juicio de valor que se puede emitir sobre ambas técnicas no es el mismo; con el método IDW la zona con mejor calidad ambiental, es decir, con menos contaminación por partículas, ocupa una superficie mayor que la obtenida con el kriging, luego se puede hacer una valoración más favorable para el IDW que para el Kriging.

4.7 ANALISIS DE OZONO

4.7.1 Exploración estadística de los datos muestrales de ozono.

El objetivo es obtener los estadísticos univariados Ozono (O3) utilizando algunas herramientas estadísticas y graficas del análisis exploratorio de datos de la extensión *Geostatistical Analyst*.

La descripción univariada de las medias anuales de ozono en Bucaramanga (ver tabla 10) muestra que hay menor concentración de valores observados en torno a la media, de ahí el valor de la ya que tiene como valor 0,24 (ilustración 90A). La distribución de los datos

tampoco es normal (ilustración 90B) y muestra una tendencia de aumento de los valores hacia la dirección NE-SW (véase ilustración 90C). La superficie del semivariograma (ilustración 90D), obtenida a partir del semivariograma empírico, confirma que la semivarianza de los datos de ozono en Bucaramanga presenta diferencias espaciales, tanto en función de la distancia como en función de la dirección. Se puede observar que los valores más bajos de la semivarianza tienen dirección NW-SE, mientras que desde la zona central los valores aumentan en dirección NE-SW.

Tabla 10. Estadísticos de los datos muestrales de ozono

Estadísticos	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Media	56,4
Mínimo	45
Máximo	69,6
Desviación estándar	8,9
Asimetría	0,24
Curtosis	-1,2
Q1	47,6
Q2	55,9
Q3	65,2

Fuente: Rivera, 2019

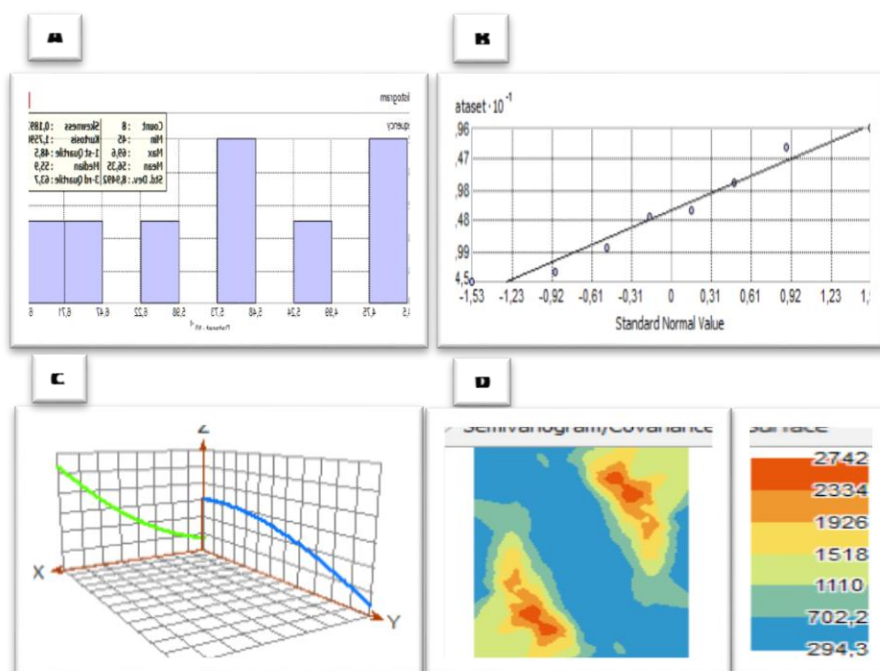


Ilustración 90. Análisis exploratorio de datos muestrales de ozono
Fuente: Rivera, 2019

4.7.2 Análisis estructural.

Para descubrir la estructura espacial de los datos se ha utilizado el GPI y el ajuste teórico del semivariograma empírico. La superficie calculada con el GPI de segundo grado adopta la forma de elipse, con el eje más grande en sentido NW-SE y el eje más corto en dirección NE-SW (ilustración 91A). Los valores estimados son más elevados desde la zona central hacia la dirección NE-SW de la elipse y disminuyen de manera gradual en sentido NE-SW; sin embargo, la disminución es más rápida desde el centro en sentido NW-SE.

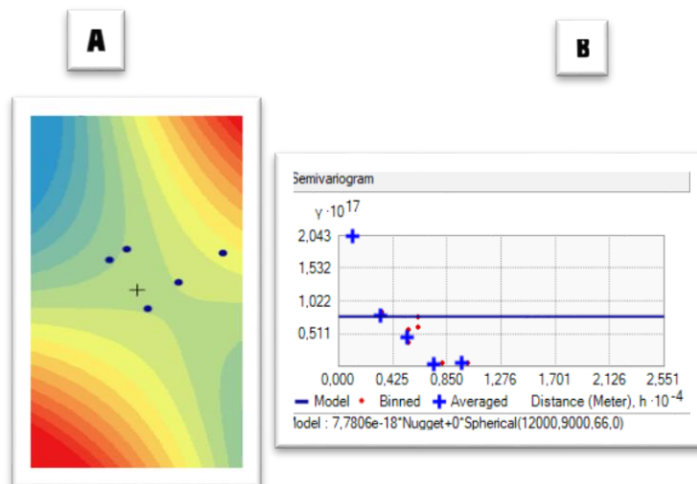


Ilustración 91. Superficie estimada con el GPI de tercer grado (A) y ajuste del semivariograma teórico (B) a los datos de ozono

Fuente: Rivera, 2019

La utilización de GPI permite constatar espacialmente el comportamiento anisotrópico de ozono en Bucaramanga, a partir de los datos registrados en las estaciones. El modelo de ajuste del semivariograma empírico (ilustración 91B) ha adoptado los siguientes valores: $7,786e-18 \text{Nugget} + 0 \text{Spherical}(12000,9000,66,0)$. Agrupando los datos en 10 intervalos con una amplitud de 500 m. Es decir, la distancia a la que la varianza de la variable se estabiliza es 12000 m en sentido NE-SW; por el contrario, esa varianza se estabiliza a 9000 m en sentido NW-SE. Se recuerda que con estos parámetros se ha obtenido un RMSE de 17,7 y un valor RMSSE de 1,3.

4.7.3 Validación de los modelos de ozono.

El proceso de interpolación termina con la validación del método IDW que proporciona los menores errores de la predicción en ambos métodos.

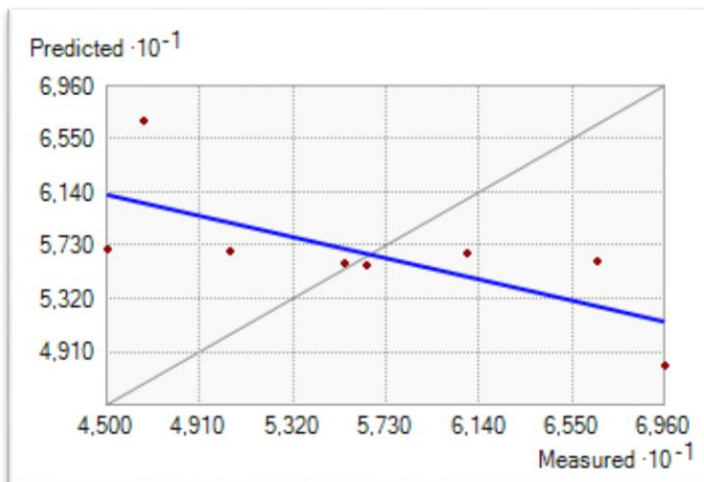


Ilustración 92. Dispersión de los valores predichos frente a los valores muestrales de ozono por cada punto

Fuente: Rivera, 2019

La ilustración 92 muestra el gráfico de dispersión de los valores predichos frente a los valores medidos para cada punto, junto con una línea de regresión azul para los puntos que adopta la función de $-0,3978 * x + 79,1129$. En una situación ideal, los valores predichos serán cercanos a los valores medidos. Se muestra una línea de referencia de color gris en la ventana para evaluar la cercanía de la línea de regresión a este ángulo ideal de 45 grados. Para este punto, la línea de regresión azul es un poco más plana que la línea de referencia gris y existe una gran variabilidad en los puntos alrededor de las líneas.

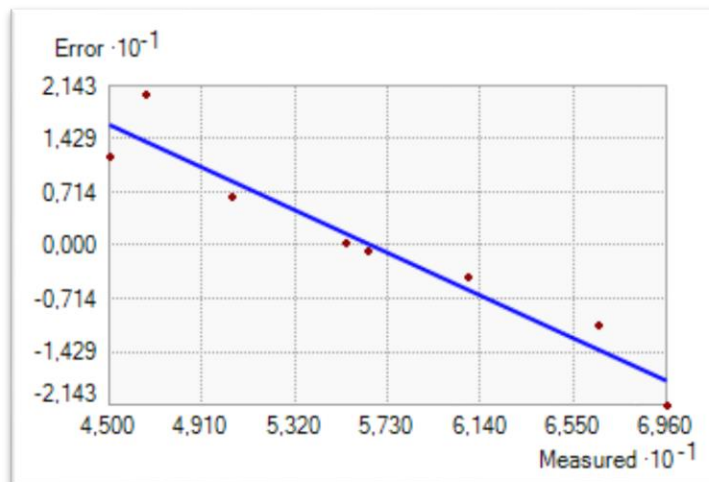


Ilustración 93. Errores de la validación

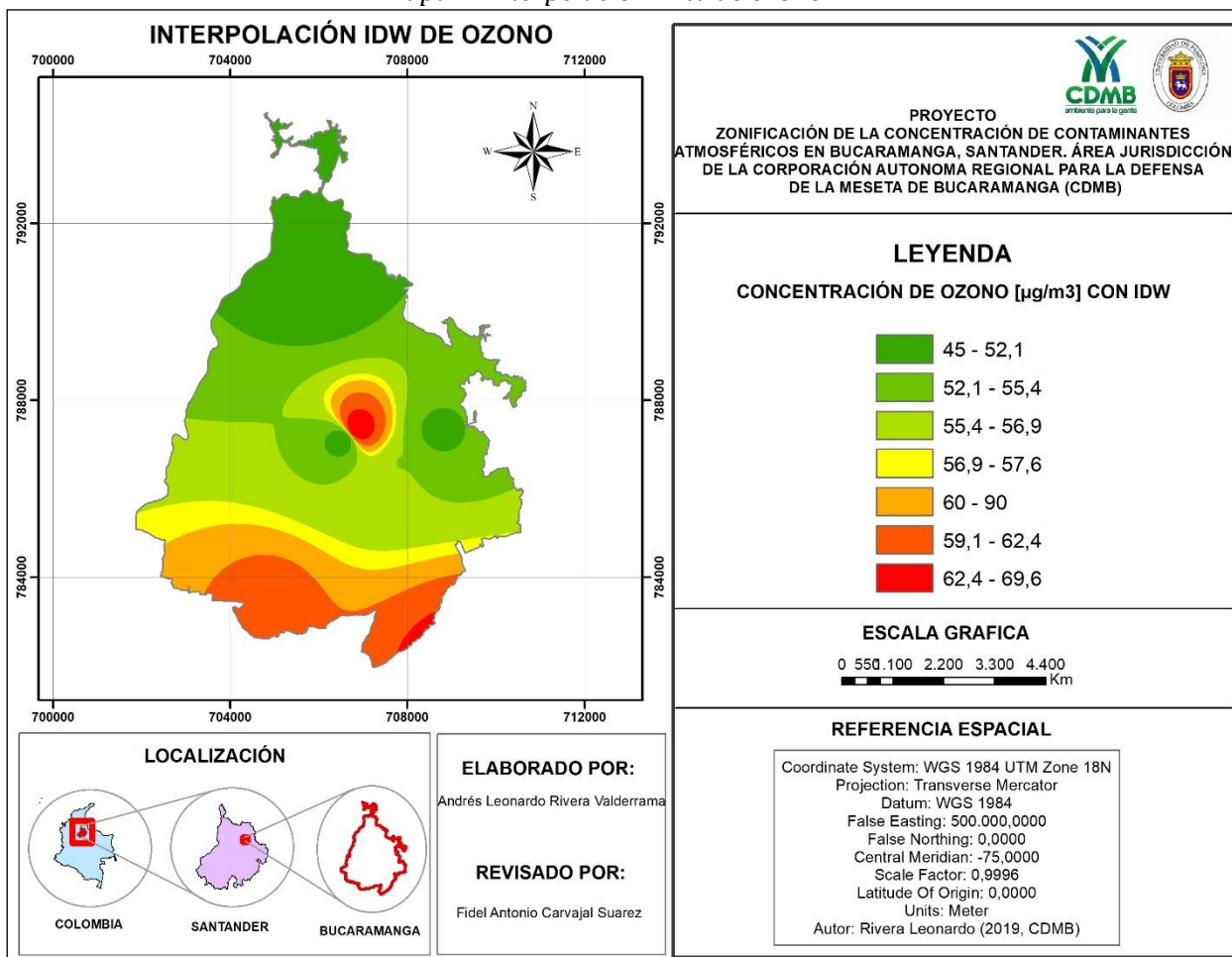
Fuente: Rivera, 2019

La ilustración 93 muestra un gráfico de dispersión de los valores medidos respecto de los errores de validación. La función de regresión que representa los errores es $-1,3978 \cdot x + 79,1129$ revelando que la línea de regresión es decreciente, lo que indica que los valores medidos más altos estaban predichos por defecto y los valores medidos más bajos estaban predichos por exceso.

El valor cuadrático medio es de aproximadamente 2,1783 lo que indica, en promedio, los errores de la validación se desviaron de los valores reales en un poco más de 2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de ozono

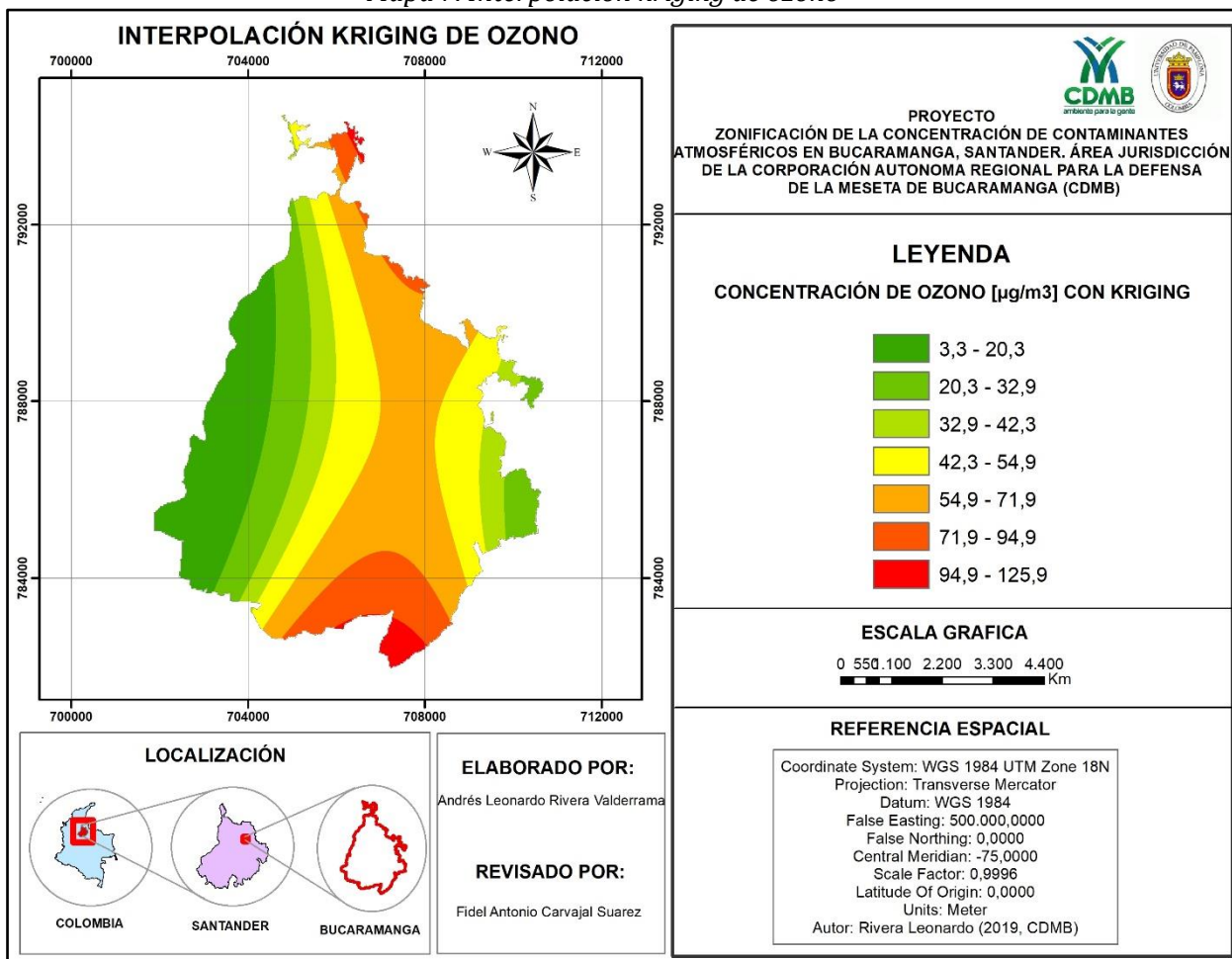
4.7.4 Mapas de interpolación con idw y kriging de ozono.

Mapa 6. Interpolación IDW de ozono



Fuente: Rivera, 2019

Mapa 7. Interpolación kriging de ozono



Fuente: Rivera, 2019

Como consecuencia de la transformación a ráster se ha podido constatar que mientras la capa interpolada por IDW no experimentaba ningún cambio en la amplitud de los valores pronosticados, que por otra parte coincidían con los del Kriging (oscilando entre 45 y 70), la capa del kriging, al transformarla a ráster, sufría un cambio en sus cifras, aumentando sus valores máximos de 67,8 a 78,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y disminuyendo los mínimos de 48,5 a 40,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (ver tabla 11), consecuencia del fuerte suavizado que realiza.

Tabla 11. Estadísticos descriptivos de ozono en las capas exportadas a ráster

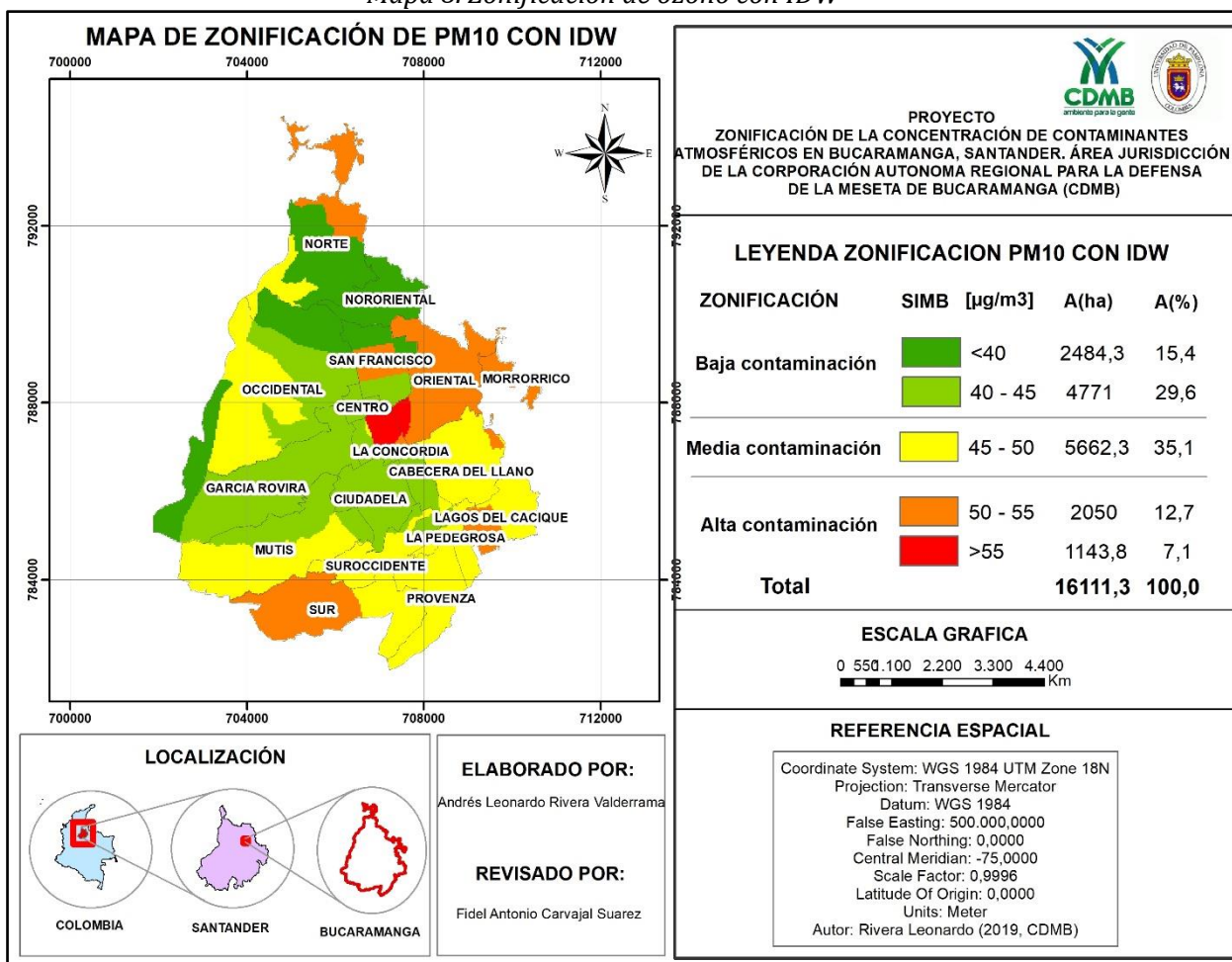
ESTADÍSTICO	IDW	KRIGING
Media	58,1	57,2

Desviacion	13,6	17,3
Maximo	67,8	78,5
Minimos	48,5	40,5

Fuente: Rivera, 2019

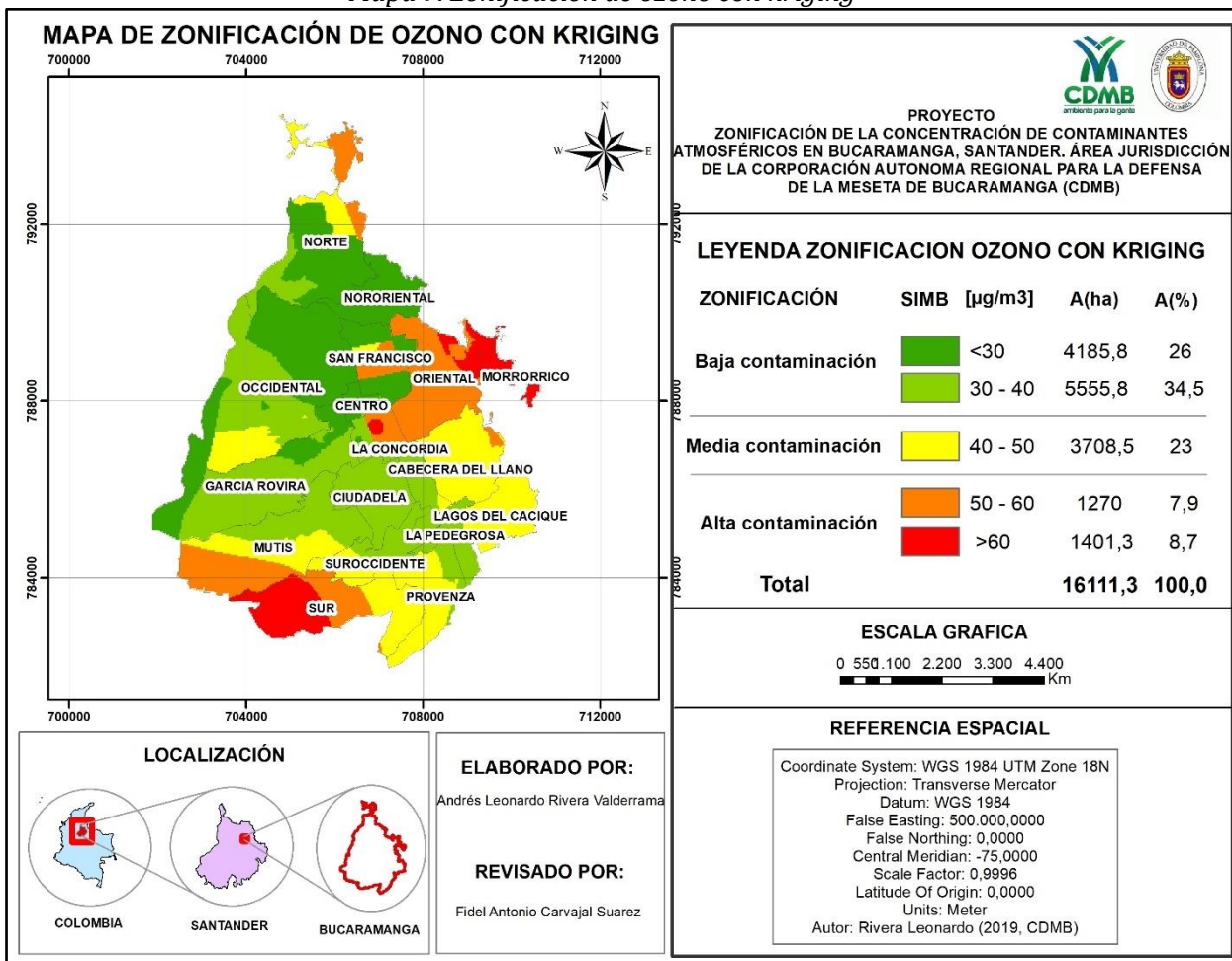
4.7.5 Mapas de zonificación con IDW y kriging de ozono.

Mapa 8. Zonificación de ozono con IDW



Fuente: Rivera, 2019

Mapa 9. Zonificación de ozono con kriging



Fuente: Rivera, 2019

Los mapas de zonificación muestran a grandes rasgos una idéntica distribución espacial, con una zona occidental con las menores concentraciones de ozono y un sector noroccidente y suroriental, con las mayores concentraciones de ozono, estos mapas no nos muestra ámbitos donde más se supera el umbral anual en 8 horas de 100 [µg/m³]; una zona oriental entorno a las comunas Centro, Cabecera del Llano, Lagos del Cacique, Oriental y la Concordia, otro sector al sur, extendido por la comuna Sur y una tercera zona en pequeña proporción al norte en la comuna Norte.

Debido que es un contaminante secundario, es decir que se forma a partir de otros indicadores de contaminación. Las razones que pueden explicar esta distribución espacial son:

- En el primer y tercer caso la alta densidad de tráfico de esas comunas, como lo informa la Dirección de Tránsito de Bucaramanga entorno a:
 - ✓ La autopista a Floridablanca, desde el puente de Provenza hasta la Puerta del Sol en sentidos Sur - Norte y Norte - Sur.
 - ✓ la carrera 27 desde la calle 48 hasta la Puerta del Sol, en sentido Norte - Sur.
 - ✓ la carrera 33 y abarca el tramo desde la calle 45 hasta el Centro Comercial Cacique, en sentido Norte - Sur.
 - ✓ Al oriente, la vía más transitada es la calle 36 desde el parque García Rovira hasta la carrera 27.
 - ✓ Al norte de la ciudad desde el CAI de La Virgen hasta el barrio Kennedy.

- En el segundo caso hay que mencionar además del tráfico (en el túnel vehicular de la carrera 17), al ser una zona con una pobre cobertura vegetal con grandes espacios de suelos desnudos secos, más fácilmente erosionables y expuestos durante todo el año a la acción del viento. Estas circunstancias unidas a las bajas precipitaciones, que provocan un menor lavado de la atmosfera, influyen en que estas partículas permanezcan durante más tiempo en suspensión.

Otros factores que también contribuyen en estas zonas son de tipo meteorológico y son las intensas radiaciones solares junto con las altas temperaturas desde la parte central en dirección noreste y suroeste.

Las zonas con menor frecuencia de concentraciones mayores se pueden dividir en dos sectores, uno al noroeste, con las comunas Occidental y García Rovira, donde existen menos concentraciones que superen el nivel máximo permisible, y otro al suroeste, entorno a las comunas Mutis y Suroccidente.

En el mapa resultante del modelado por el kriging se encuentra muy similar a la distribución espacial el IDW, si bien las zonas menos contaminadas aparecen más extendidas hacia el oeste, desde la parte central.

En cuanto a las zonas con mayor contaminación por ozono, se localizan igualmente en dos sectores, uno al centro en dirección este, en torno a Centro, La Concordia, Cabecera del Llano, Lagos del Cacique y Orienta, pero con un apéndice hacia el extremo noroeste de la ciudad (Comuna Norte); y otro al sur, de menor importancia y extensión, como en el caso del kriging, donde se encuentran las mayores concentraciones de ozono. Las comunas de Centro, San Francisco, La Concordia, Ciudadela, La Pedregosa, Lagos del Cacique, Cabecera del Llano y Oriental, son comunas con una elevada población (según datos del DANE, 2017) y por tanto con mayor número de personas expuestas a los problemas de salud que ocasiona la contaminación por partículas.

Al observar en detalle ambos mapas se evidencia una serie de diferencias. En el mapa de interpolación por el kriging se destaca una zona de mucha contaminación en la comuna Centro que no aparece en el IDW, y que corresponde a la estación La Joya y Centro, que presenta los niveles de mayores concentraciones de ozono, a pesar de estar rodeada por otras estaciones con valores mucho más bajos, el suavizado realizado por el kriging no es lo suficiente para difuminar la distribución espacial. Igualmente, en el mapa obtenido por el IDW no aparece en su totalidad la menor contaminación entorno a la estación la Joya extendiéndose al oeste.

Es decir, el modelado realizado con el kriging, devalúa los valores extremos (altos y bajos), de cara a obtener un menor error en la estimación, pero en este caso al tener pocos datos muestrales, no se logra producir un suavizado generalizado. Por el contrario, el modelado con IDW, tiende a crear puntos de concentración o a formar islas en torno a los puntos muestrales, donde demostró mejores resultados en la predicción.

4.7.6 Comparación de resultados entre ambos métodos de interpolación

Mediante los procedimientos del cálculo de número de píxeles en cada intervalo con su respectivo porcentaje, y el otro una diferencia de las capas interpoladas.

4.4.6.1 Número de píxeles en cada intervalo con su respectivo porcentaje

Se utiliza el programa Excel. Con todos los cálculos realizados se confecciona una tabla para una mejor comparación de los resultados (ver tabla 12).

Tabla 12. Superficie ocupada por cada intervalo en los dos métodos de interpolación

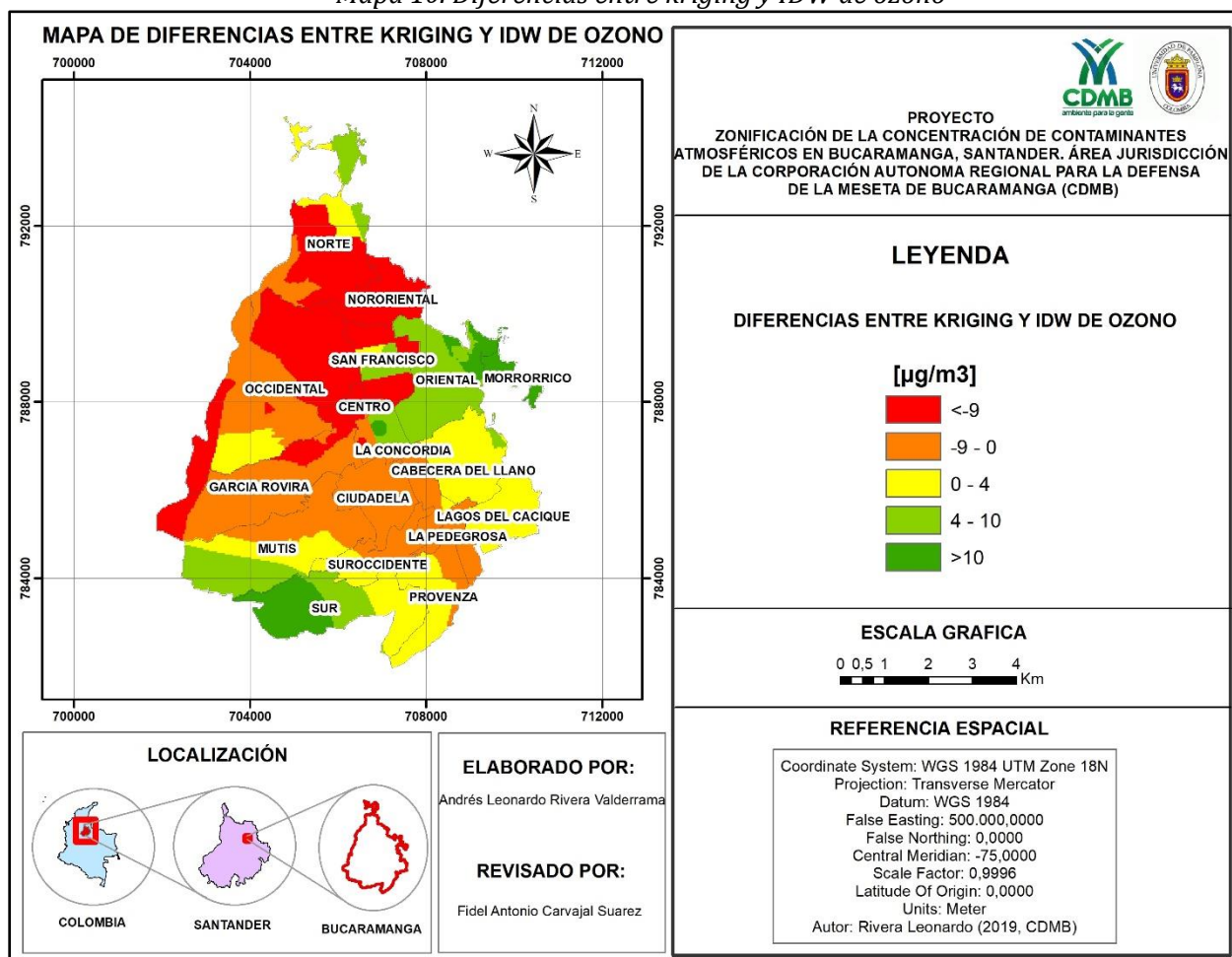
Intervalos	IDW píxeles	%	KRIGING píxeles	%
<30	1086	27	1046	26
30 - 40	1368	33,9	1388	34,5
40 - 50	888	22	927	23
50 - 60	376	9,3	318	7,9
>60	310	7,7	349	8,7
TOTAL	4028	100	4028	100
1 píxel = 0,25 ha				

Fuente.: Rivera, 2019

El espacio ocupado por encima de los 60 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (expresado en colores rojo y anaranjado) representa el 7,7% en la superficie interpolada por el IDW-PID, frente al 8,7% en la superficie interpolada por el Kriging; existen mayores diferencias entre capas al comparar los intervalos por debajo de 40 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (tonos verdosos); 60,9% en el IDW Y 60,5% en el kriging. En la superficie obtenida con el kriging, la clase entre 40 y 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] representan una superficie con el 23%, mientras que en la capa interpolada con IDW-PID está entre 40 y 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] con 22%.

4.4.6.2 Diferencias entre las capas interpoladas

Mapa 10. Diferencias entre kriging y IDW de ozono



Fuente: Rivera, 2019

El mapa resultante del patrón espacial, muestra que las mayores diferencias positivas entre ambos métodos se localizan en zonas con menor concentraciones de ozono que no superan el umbral de 60 [µg/m³], son zonas donde la interpolación por el kriging había pronosticado unos valores por encima de los observados y de los pronosticados por el IDW-PID, de ahí que al restar esas capas, el resultado sea positivo, corresponde a las comunas Nororiental, Ciudadela y en menores proporciones a Norte y Mutis; por el contrario, las mayores diferencias negativas aparecen en las áreas donde se contabilizaban más concentraciones de contaminación por partículas, y es ahí, donde la interpolación por el

kriging aumenta los valores predichos respecto a los observados y los interpolados por el IDW-PID (de 70 a 79 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]), por esta razón al restar esos espacios el resultado es positivo.

4.7.7 Valoración de la situación de ozono en Bucaramanga según ambos métodos de interpolación

Ambos métodos de interpolación coinciden en señalar a las comunas Nororiental, García Rovira y Ciudadela ubicadas al noreste y suroeste respectivamente, como las zonas de mayor calidad ambiental en cuanto a contaminación por ozono, mientras que las zonas de Oriental, La Concordia y San Francisco, son las comunas con peor calidad ambiental.

La variabilidad obtenida por el modelo kriging es mayor que la del IDW. El juicio de valor que se puede emitir sobre ambas técnicas no es el mismo; con el método IDW la zona con mejor calidad ambiental, es decir, con menos contaminación por partículas, ocupa una superficie mayor que la obtenida con el kriging, luego se puede hacer una valoración más favorable para el IDW que para el Kriging.

CONCLUSIONES

A pesar de que el kriging es un método que proporciona un análisis más elaborado y con un fundamento estadístico, no es el ideal cuando la intensidad de los datos muestrales es menor, como resultado en este estudio se obtuvo que el IDW es el correcto para este caso

El aumento de los niveles de concentración de contaminantes atmosféricos está ligado a factores determinantes, como las variables meteorológicas directamente con la temperatura y radiación solar, e inversamente con la precipitación, humedad relativa y velocidad del viento. Otro factor es la topografía que en las zonas más elevadas tiende a aumentar la concentración en menor proporción en relación a las variables meteorológicas.

Al determinar la concentración espacial de contaminantes con el método IDW que arrojó los resultados más favorables, se encontró que el 19,8% del área total de Bucaramanga presenta un nivel de contaminación alto de PM10 el cual supera los 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] anual, límite máximo establecido en la norma, mientras que el ozono con el 17% dentro del rango de 60 a 90 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] anual en 8 horas no supera el nivel máximo permisible en la norma que es de 100 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

RECOMENDACIONES

Se recomienda a futuro seguir realizando estudios con el fin de obtener resultados que permitan conocer mejor el nivel de contaminación en la ciudad de Bucaramanga, permitiendo diferenciar las metodologías propuestas

En los procesos de zonificación se considera importante obtener una considerable cantidad de datos muestrales para obtener una mejor calidad de la producción cartográfica

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. (5, enero, 2011). Un reporte sobre la salud.
2. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución No. 2254 (01, noviembre, 2017). Por la cual se adopta la Norma de la Calidad del Aire Ambiente. Bogotá D.C. 1 p.
3. CAÑADA TORRECILLA, María; MORENO JIMÉNEZ, Antonio y HEIZEL GONZÁLEZ, Lorenzo. Modelado de la Calidad del Aire Urbano, un experimento Metodológico con Técnicas de Interpolación Espacial. [En línea]. España. Universidad Autónoma de Madrid. 2014., 2 p. Disponible en [https://www.Dialnet-ModeladoDeLaCalidadDelAireUrbanoUnExperimentoMetod4757146%20\(3\).pdf](https://www.Dialnet-ModeladoDeLaCalidadDelAireUrbanoUnExperimentoMetod4757146%20(3).pdf)
4. LONDOÑO, Libardo, et al. Caracterización espacial de PM10 en la ciudad de Medellín mediante modelos geoestadísticos. [En línea]. Medellín. 2015. Disponible en <file:///C:/Users/leona/Downloads/ArticuloRevistaIngenieriasUSBMEDNo6-1728-3738-1-PB.pdf>
5. LOPEZ MONTERO, Cecilia. Pronóstico de la Calidad del Aire en el Área Metropolitana de la Ciudad de México a través del Análisis de las Series de Tiempo de los Componentes del Imeca. [En línea]. México. Universidad Iberoamericana. 2014., 5 p. Disponible en <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/015419/015419.pdf>
6. FRANCO, Juan. Contaminación Atmosférica en Centros Urbanos desafío para lograr su sostenibilidad caso de estudio Bogotá. [En línea]. Colombia. Universidad de Londres y Universidad de los Andes. 2012., 10 p. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/ean/n72/n72a13.pdf>.

7. TYLER, Nick, et al. Caracterización de la Contaminación Atmosférica. [En línea]. Colombia. Revista Escuela Administración de negocios. 2013., 33 p. Disponible en <https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wpcontent/uploads/Caracterizaci%C3%B3n-de-la-contaminaci%C3%B3n-atmosf%C3%A9rica-en-Colombia.pdf>.
8. MESNARD, Louis. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks. [En línea]. 2012. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009830041200372X#!>.
9. COLOMBIA. DANE. El Departamento Administrativo Nacional De Estadística. Planeación, levantamiento, procesamiento, análisis y difusión de las estadísticas oficiales de Colombia.
10. PABON CAICEDO, José. Cambio climático en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. [En línea]. Colombia. 2012., 2 p. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v36n139/v36n139a10.pdf>.
11. ESPERT ALEMANY, Vicent y LÓPEZ JIMENEZ, Amparo. Dispersión de Contaminantes en la Atmosfera. Grupo Editor Alfaomega. [En línea]. México. 2004. 36 p. Disponible en <https://www.worldcat.org/title/dispersi%C3%B3n-de-contaminantes-en-la-atmosfera/oclc/70683817>.
12. MARCANO, José. La Contaminación Atmosférica. [En línea]. 2009. Disponible en <http://www.jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf4.html>.
13. MÉTODO PARA MEDICIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN FUENTES FIJAS. DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO. Norma Técnica Colombiana. (09, diciembre, 2015). [En línea]. Colombia. 2015. Disponible en <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC6141.pdf>.

14. ESTADOS UNIDOS. EPA. Environmental Protection Agency; Agencia de Protección Ambiental. (02, diciembre, 1970).
15. MUÑOZ, Marcela; QUIROZ PALACIO, Carlos y PAZ, John. Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud en adultos que laboran a diferentes niveles de exposición. [En línea]. Medellín. Universidad Antioquia. 2006., 37-38 p. Disponible en <http://saludpublicavirtual.udea.edu.co/cvsp/Efectos%20de%20la%20contaminacion%20atmosferica.pdf>
16. Warner, W. Contaminacion del aire, 2001, Editorial Limusa Noriega, Mexico DF, Mexico, 12 p.
17. Dióxido de nitrógeno. [En línea]. 2010. En Consejería de Sanidad y Política Social de la Región de Murcia. Disponible en <http://www.murciasalud.es/pagina.php?id=180252&idsec=1573>.
18. MEDINA DIONICIO, Elvis. Redes Neuronales Artificiales para la Predicción de la Concentración de Ozono Troposférico en el Distrito de Atelima. [En línea]. Medellín. Universidad Agraria de la Selva. 2013., 28 p. Disponible en https://web2.unas.edu.pe/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/REDES%20NEURONALES%20ARTIFICIALES%20PARA%20LA%20PREDICCI%C3%93N%20DE%20LA%20CONCENTRACION.pdf.
19. GONZALES VELANDIA, Tomas. Prevención y control de la contaminación ambiental. [En línea]. Bogotá. Universidad Libre. 2015., 18-20 p. Disponible en <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7951/Proyecto%20Calidad%20del%20Aire%20U%20Libre%20%281%29%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

ANEXOS

A. BASE DE DATOS MUESTRALES DE PM10 OBTENIDOS DE LA CDMB

AÑO	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]						
	LA JOYA	CONCORDIA	SAN MIGUEL	NORTE	FLORIDA	CABECERA	CIUDADELA
2009	20,3	28,6	46,8	24,7	29,7	33,1	54,2
2010	20,5	28,8	41,1	17,7	23,2	29,8	51,8
2011	26,7	32,1	50,3	27,3	32,6	37,7	61,7
2012	24,8	32,8	50,8	27,8	32,8	35,8	59,8
2013	23,9	32,1	50,2	26,9	31,9	36,9	60,9
2014	21,5	29,5	47,5	26,5	31,7	31,9	56,1
2015	30,2	38,3	56,5	33,2	38,3	43,9	68,1
2016	28,4	36,7	54,8	31,6	36,8	42,2	66,5
2017	22,5	30,6	48,9	25,7	31,1	36,6	61,2
2018	28,5	36,9	55,1	31,8	37,2	40,2	64,5

B. BASE DE DATOS MUESTRALES DE OZONO OBTENIDOS DE LA CDMB

OZONO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]							
AÑO	LA JOYA	CONCORDIA	SAN MIGUEL	NORTE	FLORIDA	CABECERA	CIUDADELA
2009	22,3	31,4	36,4	20,9	35,7	23,7	42
2010	30,5	39,9	44,1	29,1	43,7	28,7	47
2011	26,9	35,9	41,2	26,2	40,7	29,7	47,7
2012	28,7	37,8	42,8	27,8	41,8	26,7	45
2013	40,3	47,5	54,2	40,1	54,8	39,3	57,6
2014	30,4	39,7	45,1	30,1	44,6	29,4	47,5
2015	37,6	46	51,3	36,3	50,8	39,5	58,1
2016	26,8	35,8	40,1	25,9	40,9	25,6	43,8
2017	32,4	39,7	44,8	29,5	43,7	30,7	49
2018	44,6	55,4	60,8	45	66,6	50,4	69,6