



Evaluación de la correlación entre datos de material particulado de 2.5 micrones de estaciones de monitoreo de calidad del aire y los datos obtenidos por el sensor MODIS, en la ciudad Bogotá D.C.

JUAN DAVID PULIDO REYES

Código: 11792119058

Trabajo para optar al título de especialista en sistemas de Información Geográfica.

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y CIVIL

ESPECIALIZACION EN SISTEMAS DE INFORMACION
GEOGRAFICA

Bogotá D.C., Colombia

2022

Evaluación de la correlación entre datos de material particulado de 2.5 micrones de estaciones de monitoreo de calidad del aire y los datos obtenidos por el sensor MODIS, en la ciudad Bogotá D.C.

Juan David Pulido Reyes

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Director:

Andrés Felipe Carvajal, Dr.

Universidad Antonio Nariño

Programa de Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2022

1. Tabla de contenido

2. INTRODUCCION	8
3. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO	10
2.1. Teledetección:	10
2.1.1. Sistemas de Teledetección.....	10
2.1.1.1. Tele detectores activos.	10
2.1.1.2. Tele detectores Pasivos.....	10
2.2. MODIS	11
2.2.1. MCD19A2	11
2.2.2. AOD	12
2.2.2.1. Dispersión de Rayleigh	12
2.3. AEROSOLES	13
2.4. MATERIAL PARTICULADO DE 2,5 MICRAS O PM2,5	14
2.5. IBOCA	14
2.6. ESTUDIOS PREVIOS DE CALIDAD DEL AIRE	15
2.6.1. Estudios a nivel internacional.....	16
2.6.2. Investigaciones en Colombia.....	17
3. OBJETIVOS	18
3.1 Objetivo General:	18
3.2 Objetivos Específicos:	18
4. METODOLOGIA	19
4.1. Área de estudio	19
4.2. Regímenes de Vientos.....	20
4.3.1. Extracción de datos de calidad del aire IBOCA.....	21
4.3.2. Información obtenida por teledetección	25
4.3.2.1. Comparación servicios MODIS/Landsat 8	26
4.3.2.2. Descarga de imágenes MODIS	27
4.3.2.3. Preparación de archivo ráster y Re proyección de coordenadas.....	30
4.3.2.4. Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.....	31
4.3.2.5. Verificación de la información ráster con ubicación de las estaciones de monitoreo.	34
4.3.2.6. Método de correlación entre imagen MODIS y Datos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.	35
4.3.3. Coeficiente de Correlación de Pearson.	35

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
5.1. Verificación de la información	37
5.2. Comparación entre los valores obtenidos por día.....	38
5.3. Resultados Correlación de los datos.....	45
5.3.1. Condiciones externas a la lectura de la imagen.....	45
5.3.2. Análisis estadístico zonal.....	47
6. CONCLUSIONES	56
7. RECOMENDACIONES	57
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	59

Tabla de Graficas

Grafica 1 Comportamiento de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS – Enero 2017.....	41
Grafica 2 Comportamiento de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS –12 de enero 2017.....	41
Grafica 3 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 16 de Enero del 2017.....	41
Grafica 4 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 23 de Enero del 2017.....	41
Grafica 5 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 24 de Enero del 2017.....	42
Grafica 6 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 08 de Febrero del 2017.....	42
Grafica 7 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 08 de Febrero del 2017.....	42
Grafica 8 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 30 de noviembre del 2017.....	42
Grafica 9 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 19 de diciembre del 2017.....	42
Grafica 10. regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS –12 de Enero 2017.....	43
Grafica 11. regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS –16 de Enero 2017.....	43
Grafica 12.Regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS – 24 de Enero 2017.....	44
Grafica 13. Regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS – 23 de Enero 2017.....	44
Grafica 14. Regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS – 08 de Febrero 2017.....	44
Grafica 15. Regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS – 30 de Noviembre 2017.....	44
Grafica 16. Regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS.....	44
Grafica 17 Correlación MODIS – RMCAB para el PM 2,5 del año 2017.....	45
Grafica 18 Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 16/01/2017.....	47
Grafica 19 Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 23/01/2017.....	48
Grafica 20. Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 24/01/2017.....	48
Grafica 21. Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 08/02/2017.....	48
Grafica 22. Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 30/11/2017.....	48
Grafica 23. Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 19/12/2017.....	48
Grafica 24. Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 12/01/2017.....	49
Grafica 25. Representación de las correlaciones analizadas.....	50

Tabla de Figuras

Figura 1. Rangos del espectro electromagnético.....	11
Figura 2. Esquema función AOD. Fuente: NASA, 2017.	12
Figura 3. División Política de Bogotá – área de estudio. Fuente: IDECA - 2020.	19
Figura 4. Dirección de los vientos en la ciudad de Bogotá – Fuente: Meteoblue - 2021....	20
Figura 5. Ingreso búsqueda de información IBOCA.	21
Figura 6. Servicios Web IBOCA.....	22
Figura 7. Servicio WFS – IBOCA.....	23
Figura 8. Servicio WFS en formato XML – IBOCA.	23
Figura 9. Proceso de conexión del servicio WFS con software Qgis.....	24
Figura 10. Información ofrecida por el servicio WFS.....	24
Figura 11. Cartografía del servicio en ArcGIS.	25
Figura 12. Menú de opciones servicio Earth Explorer.....	28
Figura 13. Selección del set de datos.....	29
Figura 14. Resultados de búsqueda.....	29
Figura 15. Página web del IDECA (datos abiertos) para descarga de las estaciones de calidad del aire de Bogotá.....	31
Figura 16. Menú de agregar Data en ArcGIS.	33
Figura 17. Menú de opciones de archivo en tabla de contenido.	33
Figura 18. Herramienta Display XY Data.....	33
Figura 19. Visor de ArcGIS.....	33
Figura 20. Herramienta de proyección.....	34
Figura 21. Mapa de imágenes MODIS con ubicación de la RMCAB.....	34
Figura 22. Ubicación estaciones calidad del aire con imagen MODIS.	40
Figura 23. Dirección del viento - IDEAM 2019.....	47
Figura 24. Estadísticas Zonales RMCAB - AOD.....	53

Tablas

Tabla 1. Clasificación de riesgo del IBOCA frente a los valores de contaminantes medidos. Fuente: secretaria Distrital de Ambiente - 2021.	15
Tabla 2. Características evaluadas de MODIS.....	26
Tabla 3. Información estaciones de monitoreo de Calidad del aire. Fuente: secretaria Distrital de Ambiente – 2019.....	32
Tabla 4. Procesamiento de información de estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.....	32
Tabla 5. Datos imágenes MODIS MCD19A2.....	37
Tabla 6 Base de Datos estaciones año 2017.	38
Tabla 7. Promedio Velocidad del Viento durante el año. – IDEAM 2007.....	46
Tabla 8. Coeficiente de Correlación de estadísticas zonales del 2017.	49
Tabla 9. Diferencias entre correlación aplicando método de estadísticas zonales y valores entregados por MODIS.....	50
Tabla 11. Correlación AOD - RMCAB, datos sin manipular	52
Tabla 12. Diferencias entre correlación de estadísticas zonales y de imágenes sin procesamiento.	54
Tabla 13. Correlación de Pearson por cada estación.....	54

2. INTRODUCCION

El avance de las tecnologías, han permitido desarrollar mecanismos que facilitan las diferentes actividades del ser humano, dentro de estas, ha sido posible llevar a cabo labores de investigación, un claro ejemplo es el monitoreo del comportamiento de los diferentes espacios donde el ser humano desarrolla sus actividades, bien sea en las grandes ciudades, los extensos bosques o los cuerpos de agua de los que el hombre depende, ya que es evidente la degradación del medio ambiente por los diversos conflictos económicos y sociales. Dentro de los elementos más alterados se encuentra la composición del aire, especialmente en las grandes urbes, donde se han encontrado diferentes compuestos químicos y orgánicos que afectan la salud pública. En la ciudad de Bogotá se presentan diferentes alertas de calidad del aire por la presencia de componentes resultantes de diferentes actividades, especialmente la quema de combustibles por fuentes fijas y móviles, que representan una constante amenaza para la salud pública.

En la ciudad de Bogotá se cuenta con una red de monitoreo de calidad del aire en la que se ha observado cambios en los valores que alcanza las mediciones de PM10 y PM 2.5, entre otros gases que pueden representar un factor de riesgo a la salud pública. Según la organización internacional ambientalista Greenpeace a través de su informe titulado *“La niñez, la salud y la calidad del aire en el suroccidente de Bogotá, 2021”*, la red de estaciones de la ciudad no se encuentra ubicada en lugares donde puedan considerarse representativos los valores medidos de los contaminantes dispersos presentes en el medio, sumado a este informe, se encuentra también que el rango que utiliza este sistema conocido como IBOCA (Índice Bogotano de Calidad del Aire), se aparta de los lineamientos propuestos por la OMS, esta escala fue ajustada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) – Resolución 2254 del 2017; estas discrepancias entre la OMS y el gobierno nacional podrían representar un riesgo latente para la población.

Esta situación solo incrementa la incertidumbre para la población y para las otras entidades que deben tomar como base esta información que bien podría presentar ciertas discrepancias para otro tipo de estudios, un ejemplo de ello es la diferencia de incidencias entre calidad del aire y enfermedades respiratorias tanto en menores de 14 como de adultos mayores de 60 años.

Según información de la Secretaria Distrital de salud del año 2020, estos casos en su mayoría se han presentado en personas que conviven, estudian o trabajan, en zonas cercanas a vías principales como la localidad de Suba, donde la mayoría de los afectados de la población son las mujeres quienes por su edad y vivienda, están expuestas a emisiones de fuentes móviles, por lo que uno de los factores es el parque automotor que transita en la ciudad, esta información no se ve reflejada por los datos que suministra el sistema de monitoreo de calidad de aire de Bogotá, pues en su cartografía, no presenta a Suba como una localidad con incidencias cercanas a las que si se encuentran en la localidad de Kennedy, donde se genera continuamente, alertas en la calidad del aire.

En los históricos de las estaciones de Suba reportan riesgos entre favorables y moderados

Esto indica que hay una posible desconexión entre las ERAS y los datos registrados en las estaciones, las razones pueden ser variadas, desde la ubicación de estas o la falta de más estaciones de monitoreo.

Una forma de buscar reducir costos y poder realizar monitoreo de la calidad del aire, es por medio de la teledetección o percepción remota, si bien, es una metodología que se ha explorado en los últimos años, no se ha utilizado como una fuente de información complementaria a la entregada por las estaciones, esta nos podría permitir verificar la cobertura de las estaciones y la correlación de esta información con la encontrada en estas imágenes satelitales. Esta herramienta podría ayudar al estudio de la calidad del aire en Bogotá, especialmente con partículas suspendidas PM 2,5 o menores a 2,5 micrones ya que según la O.M.S. representan un factor de riesgo para la salud humana, pues al ser de un tamaño tan reducido este tipo de partículas pueden ingresar al cuerpo por medio de las vías aéreas y afectaría la función de diferentes órganos, especialmente los pulmones y el sistema cardiovascular (Linares Gil, 2008).

Con la lectura y análisis de estos datos, se podría interpretar que el sistema de monitoreo de la calidad del aire de la ciudad, requiere algunos ajustes, bien sea en la ubicación de algunas estaciones o en la instalación de estos dispositivos, sin embargo esto requiere tiempo y recursos que en muchas ocasiones son difíciles de obtener, por lo que dentro de posibles alternativas se propone el uso de imágenes satelitales o la teledetección para realizar una lectura y seguimiento de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá, con estos procedimientos se podría realizar un análisis multitemporal para poder entender el comportamiento de los gases emitidos a la atmosfera, revisando la literatura, ya se cuentan con varios estudios enfocados al PM10, para este caso, se desea relacionar las imágenes de la herramienta MODIS, con el comportamiento del contaminante de 2,5 micrones en la composición del aire de la ciudad.

3. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. Teledetección:

La Teledetección es un conjunto de técnicas que une la tecnología con el manejo de información y la observación del comportamiento de diferentes objetos a distancia, esta capta por medio de sensores, información del espectro electromagnético de un objeto.

2.1.1. Sistemas de Teledetección: Estos sistemas los podemos encontrar de dos formas.

2.1.1.1. *Tele detectores activos.*

Estos son sistemas que emiten energía a un objeto y capturan la información que este da de regreso de esta señal o energía, un claro ejemplo de este son los radares el cual utiliza una antena que emite una onda electromagnética, esta al rebotar en algún objeto, regresa al avión la señal y algunas características de este último, dando a conocer su posición, altura y tamaño, todo esto en un periodo de tiempo muy corto.

2.1.1.2. *Tele detectores Pasivos:*

Los sistemas Pasivos, utilizan como base la radiación emitida por otros objetos, estos cuentan con instrumentos que captan la información entregada por la radiación de estos elementos externos y sus áreas circundantes, traduciéndola en información de las características de estas entidades, dentro de los sistemas más comunes se encuentran las cámaras, los infrarrojos, entre otros tipos de sensores. (Romero, 2006).

En la teledetección o percepción remota, se destaca el uso de información entregada por diferentes fuentes, sin embargo, la más utilizada es la misma radiación solar, la cual entra en contacto con la superficie de la tierra y las entidades que en ella se encuentran, emitiendo o rebotando esa radiación en diferentes niveles o rangos, esta es captada por los sensores instalados en varios satélites, especializados en captar estas ondas electromagnéticas y la información que entrega acerca de las condiciones físicas del planeta tierra.

Estos sistemas ubicados en diferentes satélites artificiales captan la información a modo de imágenes que se encuentran ubicadas en los diferentes rangos del espectro electromagnético (Imagen 3), dentro de estos se destaca la lectura del ultravioleta, el infrarrojo y las imágenes de microondas.

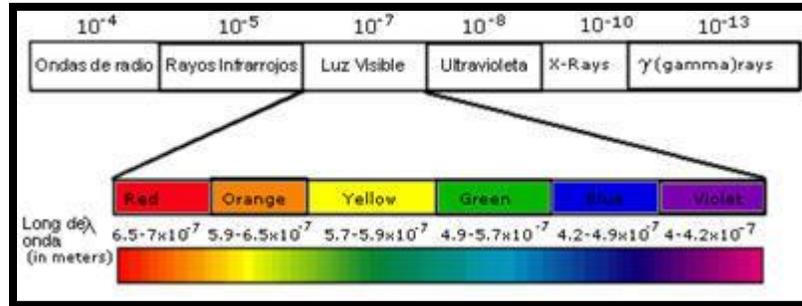


Figura 1. Rangos del espectro electromagnético.

La información captada por los sensores de percepción remota es conformada, ordenada y almacenada a varios centros en la tierra, donde se encuentran a disposición de expertos o de usuarios que requieran de la interpretación de esta información para el desarrollo de diferente tipo de proyectos.

Dentro de las herramientas disponible para los trabajos de investigación, es una de las más utilizadas y con un registro histórico de información amplio, el instrumento de observación MODIS.

2.2. MODIS

Uno de los instrumentos utilizados en la teledetección, son los satélites Aqua y Terra del proyecto MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer). Cuenta con 36 bandas espectrales, las cuales manejan diferentes resoluciones espaciales, dependiendo el producto, este puede contener imágenes que van desde 250, 500 y 1000 metros.

Los satélites MODIS realizan captura de imágenes a diario, cuentan con una órbita helio sincrónica, ambos pasan por los polos rodeando la tierra en dirección opuesta, es decir, mientras terra asciende, Aqua desciende, esto permite que el instrumento MODIS capte imágenes cada 1 a 2 días en el mismo sector.

Dentro de las imágenes disponibles por MODIS, se destacan las entregadas con el producto MCD19A2.

2.2.1. MCD19A2: este producto consiste en la recopilación y cifrado de los valores de la Profundidad Óptica del Aerosol o AOD por su nombre en inglés, es a través de este material que se puede realizar análisis de materiales en suspensión en el aire, también permite resaltar la presencia de nubes y vapor de agua. La NASA aplica en la lectura de este sensor una formula llamada MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction) esta permite mejorar la captura de aerosoles, además de corregir algunos errores con el Angulo de la captura de la imagen. Este producto también permite identificar las características de la nieve en la

superficie, pero para efectos del presente documento, el material que interesa es el relacionado al ya mencionado AOD. (NASA, 2013)

2.2.2. AOD: La profundidad Óptica del Aerosol es una función de la herramienta MCD19A2 que expresa la cantidad de luz removida de un rayo por medio de la dispersión o absorción durante su trayecto por un medio en la atmosfera. (Mehta, 2019).

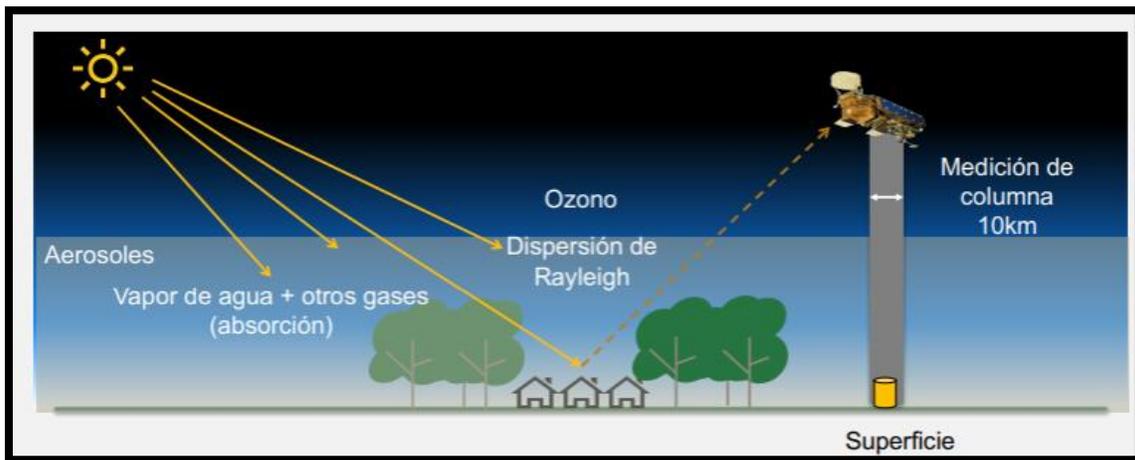


Figura 2. Esquema función AOD. Fuente: NASA, 2017.

(Ilustración 4) el satélite en este caso Terra o Aqua, realiza la lectura de la imagen desde el espacio exterior. Para identificar estos aerosoles tiene en cuenta el cambio de los valores en la imagen, frente a la dispersión de la luz que sufre a causa de las partículas en suspensión en el aire, por ejemplo, el vapor de agua tiene un efecto de absorción en las ondas de la luz, mientras que los aerosoles cumplen la teoría de dispersión de Rayleigh, por lo que el sistema tiene también en cuenta las funciones de esta teoría para la interpretación de imágenes.

2.2.2.1. *Dispersión de Rayleigh*: es un fenómeno de la naturaleza descrito por primera vez por Jhon William Strutt o Lord Rayleigh en 1871, describe el comportamiento de las ondas de la luz al contacto con partículas igual o más pequeñas que la longitud de onda de los fotones, esto varía según el tipo de partícula y el tamaño, un claro ejemplo es la particular tonalidad que toman las ondas de la luz solar al interior de la atmosfera terrestre, permaneciendo un color mayormente azul, pero que cambia según la posición de la superficie respecto a las ondas de luz que llegan del sol.

Finalmente, el AOD utiliza estos principios del comportamiento de las ondas del Haz de la luz solar, para determinar la presencia de aerosoles, dentro de las bandas del MODIS en el producto MCD19A2, se encuentran que en 7 bandas MODIS se

pueden derivar propiedades de los aerosoles, donde se destaca la banda No 1 de 0,47 μm , No 3 de 0,65 μm y la No 7 de 2,13 μm . (NASA – ARSET, 2017).

Es importante entender las diferentes variables y objetos de estudio del presente documento, por este motivo se revisarán algunos conceptos de los elementos involucrados en las mediciones de la calidad del aire.

2.3. AEROSOLES

Los Aerosoles o material particulado, son un conjunto homogéneo de partículas suspendidas, conformada por diferentes tipos de materiales que pueden ser líquidos o sólidos, esto dependerá de su origen, así también cambia de tamaño, pues varía desde los 0,005 $\mu\text{g}/\text{m}$ hasta los 100 $\mu\text{g}/\text{m}$, en referencia, estos tamaños pueden abarcar muchas entidades en la naturaleza, desde un átomo hasta el grosor de un cabello. (Rojas y Garibay, 2013).

Estos materiales suspendidos en el aire, tienen su origen principalmente de fuentes naturales como es el movimiento del viento que arrastra material del suelo, incendios forestales naturales, emisiones de actividad volcánica, pero sus niveles presentes en el aire no son tan altos si a estos no se les agregara aquellos de origen antrópico, especialmente la quema de combustible, sin importar su origen, el material particulado es considerado como un material contaminante de la atmosfera, debido a que cambia o altera la composición natural de la atmosfera (IPCC, 2007)

Las partículas pueden clasificarse de varias formas, dependerá de su tamaño, como se relaciona al inicio de este tema, según su proceso de formación o según su origen (EPA, 2010), en este último se encuentran dos tipos de partículas:

1. Partículas Primarias: Son las partículas que se emiten directamente a la atmosfera desde una fuente de emisión, por ejemplo, el humo de una fumarola o el originado por el parque automotor de una ciudad.
2. Partículas Secundarias: Estas tienen origen de la reacción química de los compuestos gaseosos que se encuentran en la atmosfera, con los elementos que llegan a ellos, dentro de estos encontramos los dióxidos de azufre, los compuestos orgánicos volátiles, el amoniaco, entre otros.

Los aerosoles o material particulado suspendido en el aire, pueden representar un riesgo para la salud, se ha encontrado relación entre la disminución de muertes cuando se logra controlar la exposición de la población a estos materiales por lo que la OMS recomienda a los países que dentro de sus normas para el control de la calidad del aire se manejen los siguientes estándares:

- **Partículas finas PM_{2,5}:**
 - 10 µg/m³ de media anual
 - 25 µg/m³ de media en 24 horas
- **Partículas gruesas PM₁₀**
 - 20 µg/m³ de media anual
 - 50 µg/m³ de media en 24 horas

Sin embargo, cada país puede ajustar los valores según su necesidad, siempre que no represente un factor de riesgo a la salud pública, pues en Colombia la normativa presenta valores más altos.

Una reducción media anual de las concentraciones de partículas (PM₁₀) de 35 microgramos/m³, común en muchas ciudades en desarrollo, a 10 microgramos/m³, permitiría reducir el número de defunciones relacionadas con la contaminación en un 15%. Sin embargo, la exposición de estos materiales, reducen la expectativa de vida de 6 a 8 meses menos. (OMS 2018)

2.4. MATERIAL PARTICULADO DE 2,5 MICRAS O PM_{2,5}

La EPA (Agencia de Protección Ambiental) por sus siglas en inglés, califica el PM_{2,5} dentro de los criterios para contaminantes que pueden representar riesgo para la salud humana, calificándolo dentro de los contaminantes de aire de criterio (EPA – Programa Frontera, 2012). Otra Organización que clasifica a las partículas PM_{2,5} como peligrosas para la salud es la OMS, en su informe del 2018 reporta incidencias de muertes prematuras, con la presencia de este tipo de contaminación en el aire, según estimaciones de la misma entidad 4,2 millones de muertes prematuras, tienen su razón en la presencia de material particulado menor a 2,5 micrones (motivo por el que se llama PM_{2,5}) donde no solo se encuentran enfermedades respiratorias, también se presentan enfermedades de origen cardiovasculares y hasta cáncer. Estas incidencias van de la mano con el tipo de población como es el caso de países en el área de Asia Sudoriental y el pacífico occidental. (OMS, 2018). Una de las características de este material que cuenta de con este diámetro imperceptible al ojo humano es que puede contener partes de diferentes orígenes, pues los contaminantes PM_{2,5} provienen de diferentes fuentes de contaminación como la quema de medara, carbón, el polvo que levanta viento, entre otros, por lo que se ha encontrado trazas de sustancias químicas, metales, sustancias orgánicas, hollín y polvo. (OEHHA, 2021).

2.5. IBOCA

El Índice Bogotano de Calidad del Aire, es un índice de alertas que toma los datos entregados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), la cual monitorea por medio de estaciones fijas y móviles, los índices de riesgo en calidad del aire de la ciudad de Bogotá, este sistema permite identificar los sectores

y horas en el que los contaminantes en el aire pueden representar un riesgo para la salud de la población. Este sistema de monitoreo con el que cuenta el IBOCA mide los contaminantes O₃, NO₂, SO₂, PM_{2,5} y PM₁₀ en diferentes localidades, además de permitir consultar la información actual y los históricos, siendo un proveedor de información para la verificación y estudio de la calidad del aire durante el tiempo; actualmente se actualizaron los estándares clasificando los niveles de riesgo en 5 colores, según los valores de cada contaminante medido:

Tabla 1. Clasificación de riesgo del IBOCA frente a los valores de contaminantes medidos. Fuente: secretaria Distrital de Ambiente - 2021.

Atributos del IBOCA				(5) Intervalos de concentración para cada contaminantes y tiempo de exposición del IBOCA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁽³⁾					
(1) Intervalos de valores adimensionales ⁽¹⁾	(2) Color	(3) Estado de calidad del aire	(4) Estado de actuación y respuesta	PM 10 (24h)	PM 2.5 (24h)	CO (8h)	SO2 (1h)	NO2 (1h)	O3 (8h)
0 - 50	Verde	Favorable	Prevención	0-54	0-12	0-5094	0-92	0-100	0-106
51 - 100	Amarillo	Moderada	Prevención ⁽²⁾	55-154	12.1-35.4	5095-10818	93-197	101-188	107-137
101 - 150	Naranja	Regular	Alerta Fase 1	155-254	35.5-55.4	10819-14253	198-485	189-677	138-167
151 - 200	Rojo	Mala	Alerta Fase 2	255-354	55.5-150.4	14254-17688	486-796	678-1220	168-206
201 - 300	Morado	Peligrosa	Emergencia ⁽³⁾	355-604	150.5-250.4	17689-34861	797-1582	1221-2349	207-392
301 - 500				425-604	250.5-500.4	34862-57703	1583-2681	2350-3853	-----

2.6. Dentro de los contaminantes que monitorean todas las estaciones están el PM_{2.5}, PM₁₀ y el O₃. Estos contaminantes en algunos sectores de la ciudad son generados por actividades industriales y el aumento del tránsito de vehículos lo que se caracteriza por presentar variación en los niveles de contaminantes, a ciertas horas en la mayor parte de las localidades de la ciudad. **ESTUDIOS PREVIOS DE CALIDAD DEL AIRE**

En los últimos años, con el crecimiento de los Sistemas de información Geográfica, también se presenta el aumento de diferentes estudios en las diferentes ramas ya que esta herramienta permite realizar estudios en temáticas como medio ambiente, economía, Sociales, salud, entre muchos otros. Concretamente para el caso de calidad del aire se han encontrado varios estudios con resultados prometedores tanto a nivel nacional, como en el extranjero, inclusive, proyectos desarrollados desde instancias internacionales donde también se involucra a Colombia dentro de sus resultados.

2.6.1. Estudios a nivel internacional

El equipo de investigadores de la universidad de Washington en San Louis, que se dedican a estudiar el comportamiento de los contaminantes en el aire en diferentes regiones del mundo desde el año 2003, y su interacción con la sociedad desde lo ambiental, económico y la salud. Para este tipo de análisis utilizan resultados de mediciones in situ y se apoyan con imágenes satelitales tomadas por MODIS, y así poder obtener el promedio del material particulado menor a 2,5 micras, para este material que se considera de alto riesgo para la población, se creó el proyecto SPARTAN, donde se evalúan todas las interacciones ya mencionadas, referentes al material particulado (Washington University in St. Louis 2021).

Dentro de sus recientes publicaciones están:

- Contribuciones del petróleo en la generación ambiental de PM_{2,5} y las muertes atribuibles a través de múltiples escalas. - 2021.

En este primer trabajo, por medio de imágenes satelitales de alta resolución y el uso de datos in situ, se comprueba que existe relación entre las muertes prematuras en personas con las emisiones de PM_{2,5} producidas por la industria del petróleo y todo lo que implica su procesamiento.

- Fuentes globales de partículas finas: interpretación de la composición química de PM_{2.5} observada por SPARTAN utilizando un modelo de transporte químico global.

Este artículo se refiere a la investigación en la que se busca identificar las fuentes de origen del PM_{2.5}, su clasificación y movimiento masivo a escala mundial, dentro de las conclusiones se menciona como el sector de la generación de la energía en casa, como uno de las fuentes principales de PM_{2.5}, seguido de la industria. (SPARTAN 2020).

- Estimating PM_{2.5} Concentrations Based on MODIS AOD and NAQPMS Data over Beijing–Tianjin–Hebei.

En este artículo se busca estimar los niveles de PM 2,5 en la región de Beijín, Taiji y Hebei en China, por medio del análisis de 3 fuentes de información: los datos del AOD, las mediciones de PM_{2,5} en las estaciones y el método de Covarianza utilizado para análisis de NDVI – DEM, con ello se buscó poder obtener la información suficiente para no solo verificar la precisión del método, también para efectuar análisis multitemporal de varios años, en la región.

- High resolution aerosol data from MODIS satellite for urban air quality studies

En un artículo de la revista Central Europea de Geociencias, busca realizar un análisis de correlación entre los datos entregados por los productos del MODIS, las estaciones de monitoreo y la aplicación de la ecuación MAIAC desarrollada por la NASA para corrección de las imágenes obtenidas en este producto, donde se busca desarrollar una correlación entre los datos generados, teniendo en cuenta que la imagen original tiene una resolución espacial de 10 Km y aplicando la corrección MAIAC esta pasaría a 1 km, por lo que se busca verificar la efectividad de esta corrección.

2.6.2. Investigaciones en Colombia

En estudios de calidad del aire, se pueden encontrar algunos acerca de la lectura de PM10 y PM2,5 en imágenes MODIS, Un ejemplo es el estudio donde realizan un análisis de la cantidad aproximada de material particulado en el Valle de Aburrá, suspendido en la troposfera y su aproximación a los datos in situ de las estaciones con imágenes Landsat, donde se obtiene un error cuadrático medio de 2,87 para el PM10.(Castro Coca, 2019).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General:

Evaluar la correlación entre datos de material particulado de 2.5 micrones de estaciones de monitoreo de calidad del aire y los datos obtenidos por el sensor MODIS, en la ciudad Bogotá D.C.

3.2 Objetivos Específicos:

- Identificar el comportamiento de los datos de $PM_{2,5}$ captados por las estaciones de monitoreo de calidad del aire y el de los datos de las imágenes generadas por el producto MODIS – AOD en la ciudad de Bogotá.
- Analizar la correlación entre los datos de $PM_{2,5}$ captados por las estaciones de monitoreo de calidad del aire y el de los datos de las imágenes generadas por el producto MODIS – AOD.
- Verificar resultados obtenidos en la correlación aplicando la herramienta estadística zonales.

4. METODOLOGIA

4.1. Área de estudio

La ciudad de Bogotá es la capital de Colombia, esta ciudad cubre una extensión de 1775 Km², sin embargo, el presente documento, se encargará de realizar los respectivos análisis en los 307,36 Km² de territorio urbano, la ciudad de Bogotá se encuentra ubicada en las coordenadas 4°36'45.5"N, 74°4'13.8"W a una altura media de 2640 msnm. Con 7'743.995 habitantes (DANE, 2020)

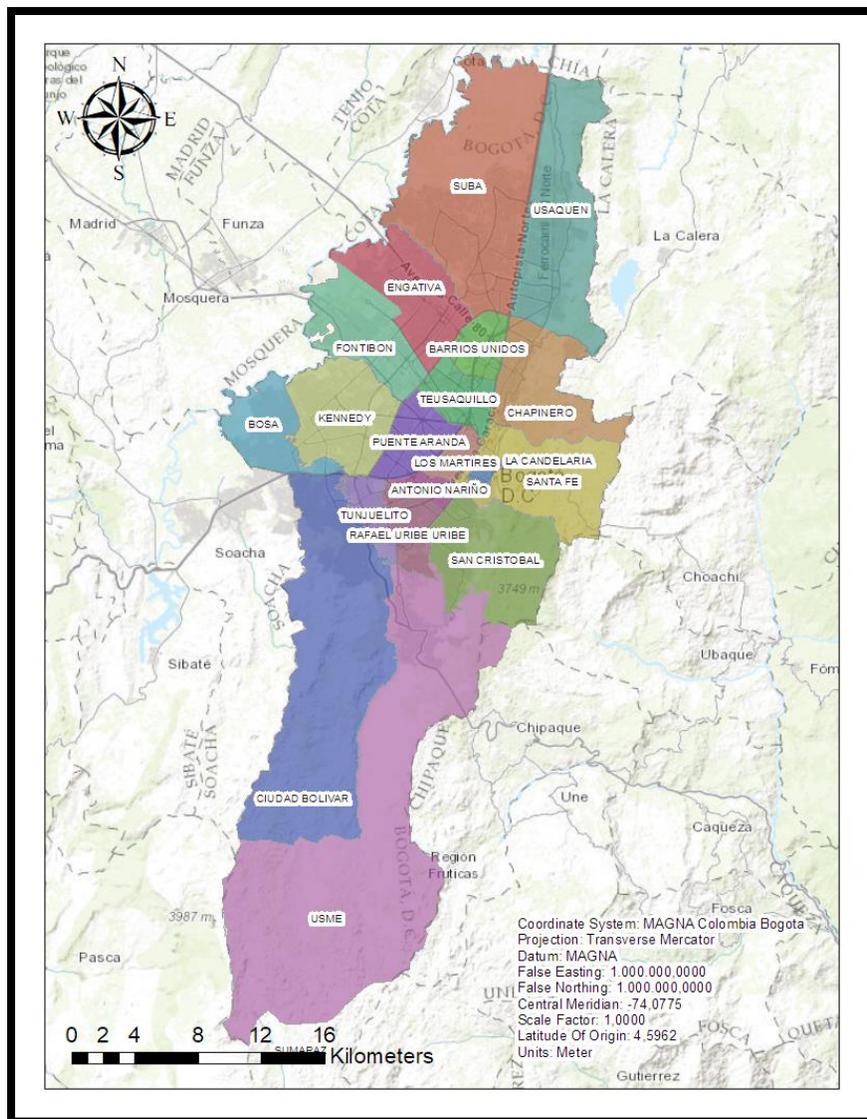


Figura 3. División Política de Bogotá – área de estudio. Fuente: IDECA - 2020.

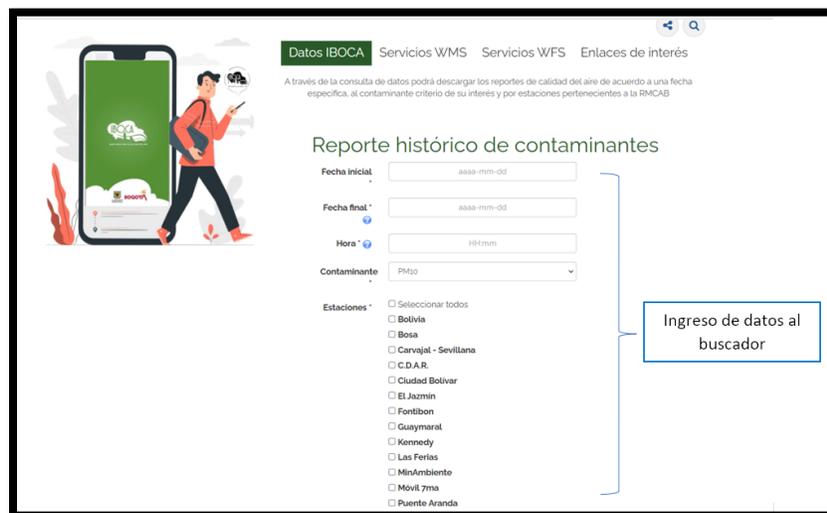
4.3. INSUMOS REQUERIDOS

Una vez identificada el área de estudio y sus características, se procede a determinar los insumos necesarios para iniciar el estudio de calidad del aire. Previamente se describió el sistema de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Bogotá, esta se conoce como IBOCA (Índice de Calidad del Aire Bogotano), por lo que se requieren varios insumos provenientes de su portal web:

4.3.1. Extracción de datos de calidad del aire IBOCA.

Para poder obtener la información necesaria se realizan los siguientes pasos:

- Se ingresa al portal web <http://iboca.ambientebogota.gov.co/index.php>



The screenshot displays the IBOCA website's search interface. At the top, there are navigation links: "Datos IBOCA", "Servicios WMS", "Servicios WFS", and "Enlaces de interés". Below these, a small text block states: "A través de la consulta de datos podrá descargar los reportes de calidad del aire de acuerdo a una fecha específica, al contaminante criterio de su interés y por estaciones pertenecientes a la RMCAE". The main section is titled "Reporte histórico de contaminantes" and contains several input fields: "Fecha inicial" and "Fecha final" (both with date pickers), "Hora" (with a time picker), and "Contaminante" (a dropdown menu currently showing "PM10"). Below these is a section for "Estaciones" with a "Seleccionar todos" checkbox and a list of station names, each with an unchecked checkbox: Bolivia, Bosa, Carvajal - Sevillana, C.D.A.R., Ciudad Bolívar, El Jazmin, Fontibon, Guaymaral, Kennedy, Las Ferias, MirAmbiente, Móvil 7ma, and Puente Aranda. A blue box with the text "Ingreso de datos al buscador" is positioned to the right of the search fields, with a bracket indicating that the date, time, and station selection fields are part of the search input.

Figura 5. Ingreso búsqueda de información IBOCA.

- Como se observa en la figura 5, una vez se encuentra en la página, se busca la opción "consulta de datos", en esta parte se van a obtener dos insumos importantes, desde el buscador de datos del IBOCA se ingresarán las fechas y estaciones de interés para el estudio, con esta información se obtendrá una base de datos con los valores del PM_{2,5} que registraron las estaciones en el periodo de tiempo que se requiera.

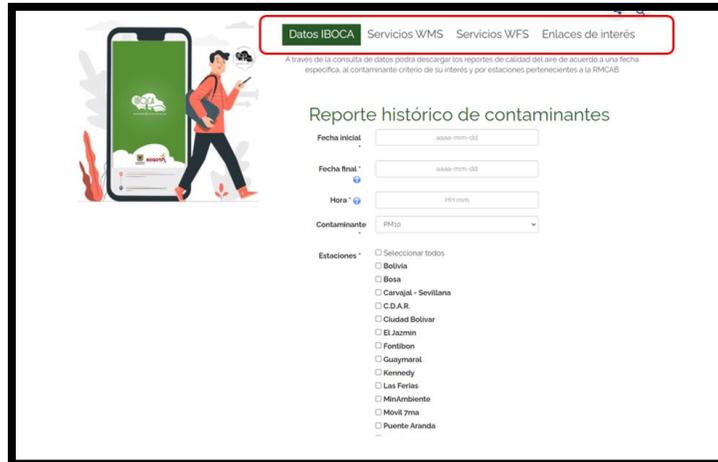


Figura 6. Servicios Web IBOCA.

- En esta página también se obtiene información cartográfica de lo monitoreado por las estaciones, en la Ilustración 6, se destaca la parte superior donde se encuentran 3 servicios adicionales, 1 servicio WMS (Web Map Service) en el que se podrá visualizar el comportamiento de la calidad del aire de la ciudad, este estándar permite conectar la información desde un servidor a otras interfaces graficas o bien, con la posibilidad de utilizar todos sus servicios desde el formato XML, sin modificar los datos que estas capas contengan (OGC, 2012),. El servicio WFS (Web feature services), contiene información de los datos captados por las estaciones, con este formato se puede realizar consultas de diferente tipo y exportar la data de las estaciones para poder manipular y modificarla. (OGC, 2012) Finalmente, en “Enlaces de interés”, se encuentran dos geo-visores asociados al IBOCA. Uno es la red de monitoreo de calidad del aire en la que se puede consultar y descargar información por tipo de contaminante monitoreado, por día.
- Se decide utilizar adicional a la base entregada por el IBOCA, los servicios WFS del sistema; Debido a que este formato no facilita su lectura desde el programa de ESRI – ArcGIS, se decide utilizar el software libre Qgis 3.17.0, con el fin de cambiar el formato a “.shp” para poder trabajarlo desde el otro programa, ya que se van a requerir herramientas de ambos programas.
- En la página del Índice de calidad del aire Bogotano – IBOCA, se encuentra dentro del servicio WFS, un icono el cual parece que va a descargar un archivo en formato XML

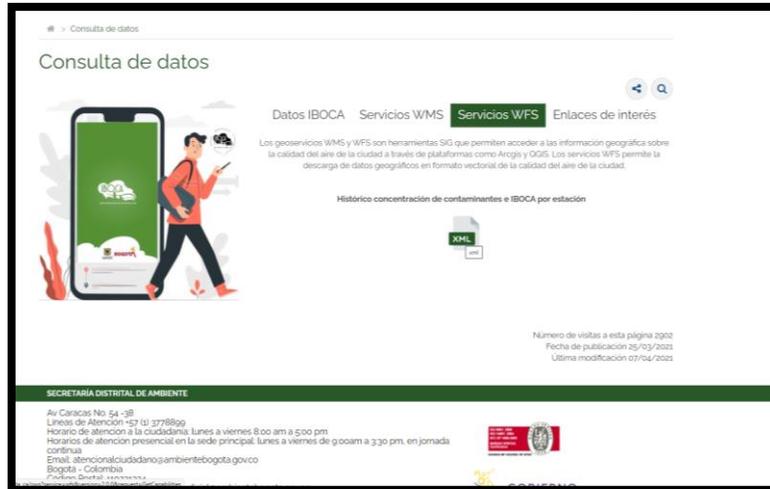


Figura 7. Servicio WFS – IBOCA.

Sin embargo, con esta es llevada a una página web con la que se realizará el enlace del servicio con nuestro programa de sistema de información geográfica, pues como aparece de esta manera, los datos no van a ser de gran utilidad

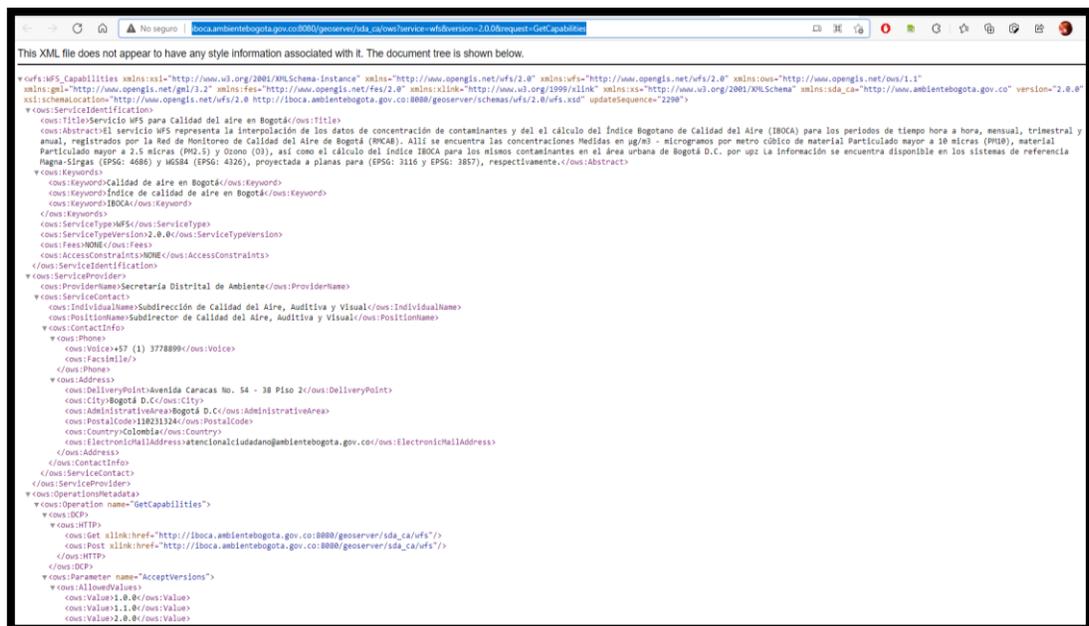


Figura 8. Servicio WFS en formato XML – IBOCA.

- Para la elaboración del presente proyecto de investigación, se da uso en algunas etapas del software libre Qgis en su versión 3.17.0. y de ArcGIS 10.8.

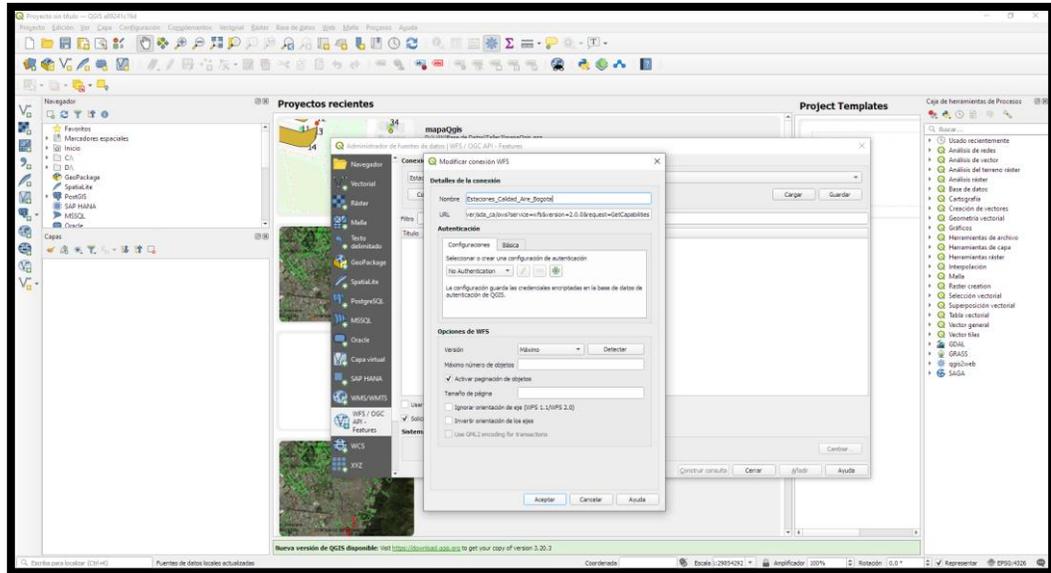


Figura 9. Proceso de conexión del servicio WFS con software Qgis.

- En la Figura 9 se presenta el proceso como se conectar o enlazar el programa Qgis, con el servicio WFS, en la información requerida se le da un nombre a la cartografía y se agrega la URL del servicio.

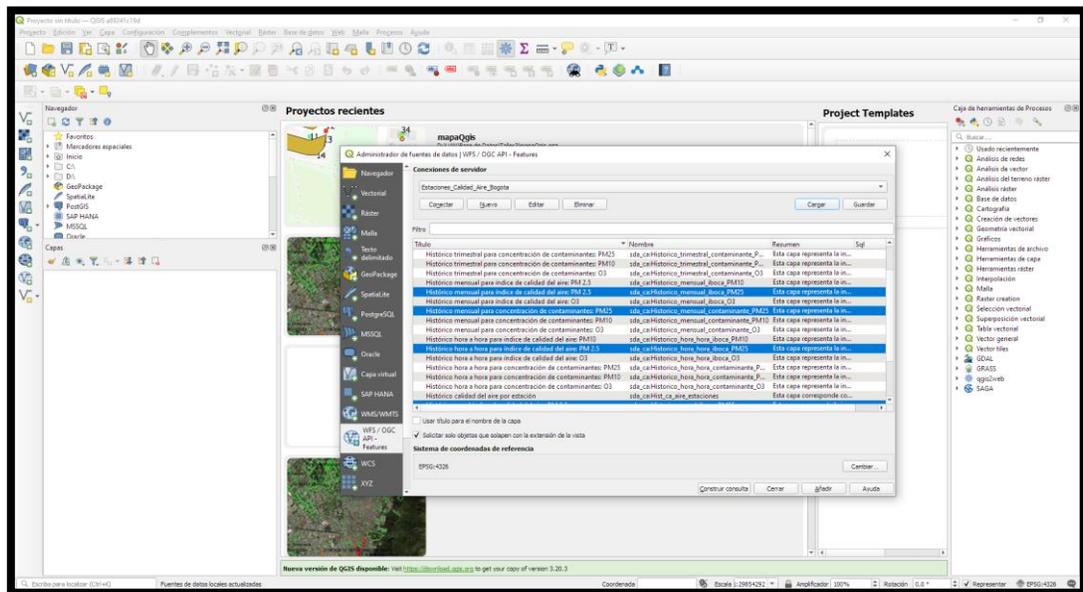


Figura 10. Información ofrecida por el servicio WFS.

- Como se observa en la Figura 10, al conectar el servicio con el software SIG, este despliega la información que contiene, para el caso del sistema de monitoreo de calidad del aire, se seleccionan aquellos resultados que

se obtuvo de medir PM_{2,5} y de esta manera, poder obtener la información georreferenciada de las mediciones de este tipo de contaminante atmosférico. Al obtener la salida gráfica, desde Qgis, se realiza el proceso para cambiar formato a .shp, con el fin de poder trabajarlo desde ArcGIS.

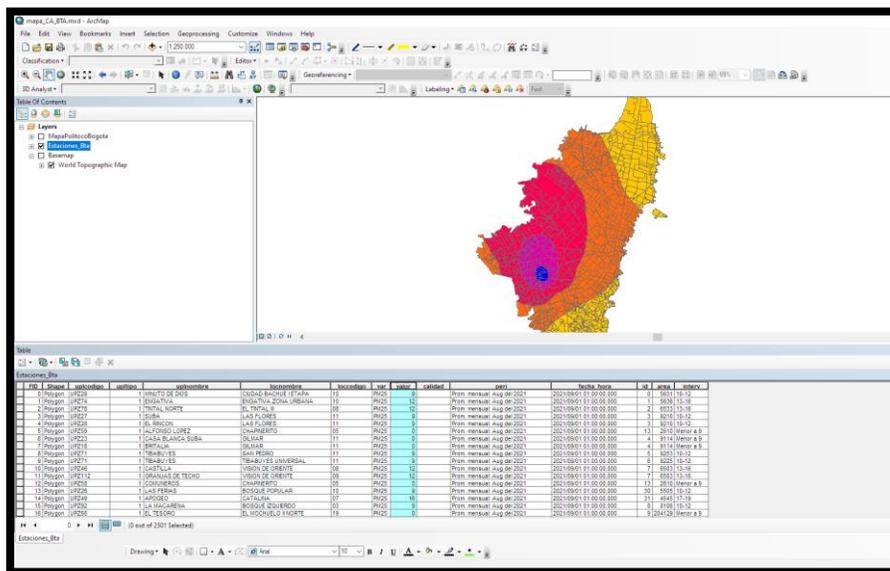


Figura 11. Cartografía del servicio en ArcGIS.

Al abrir este archivo en el software ArcGIS, se puede cambiar varias características, con el fin de identificar los valores medidos del PM_{2,5}; en la figura 11 se observa la interfaz gráfica, se identifican los niveles del contaminante por áreas y en la tabla de atributos se destacan los valores medidos, estos son el promedio mensual en agosto del 2021. Este insumo es de gran importancia ya que con él se podrá realizar una comparación de la representación gráfica que arrojan las estaciones, frente a lo que se obtiene con las imágenes obtenidas por teledetección a través del producto MODIS.

4.3.2. Información obtenida por teledetección

Para poder realizar el análisis que se requiere, se procede a efectuar el procedimiento para obtener la información que ofrecen los servicios de percepción remota, para este documento se trabajarán imágenes satelitales provenientes del instrumento MODIS; Si bien su resolución no tiene un gran alcance en comparación con otros productos como Landsat 7 y 8, MODIS cuenta con un gran repositorio de imágenes satelitales tomadas casi a diario por medio de dos satélites: Aqua y Terra de los que se puede aprovechar una gran cantidad de estos servicios, con sensores especializados en la detección de aerosoles en la superficie terrestre.

4.3.2.1. Comparación servicios MODIS/Landsat 8

Después de realizar un análisis sobre los productos y servicios que prestan las imágenes obtenidas por teledetección, se determina que la mejor opción es utilizar el material entregado por MODIS, otra alternativa que se contempló, era utilizar imágenes obtenidas por landsat 8, por este motivo se socializan las ventajas y desventajas evaluados para el presente estudio:

Tabla 2. Características evaluadas de MODIS

PARAMETROS EVALUADOS	MODIS
RESOLUCION ESPACIAL	varia en 250 m, 500 m y 1 Km
PRODUCTOS PARA AEROSOLES	Tiene un producto conocido como MC19A1 el cual calcula e interpreta la AOD
PERIODO DE TIEMPO DE LA CAPTURA	Recorrido a diario 2 veces en el día en una misma zona
HISTORICO	activo desde el año 1999

Revisando las principales ventajas y desventajas de cada uno, las imágenes Landsat 8 contienen capturas en una resolución importante de la zona de estudio, sin embargo, la ciudad de Bogotá presenta la característica de contar con cielos parcialmente nublados la mayor parte del tiempo, en épocas de menos lluvia se puede llegar a obtener hasta un 67% de nubes en la ciudad, sin embargo este puede variar, también se resaltan las mañanas de 6 am en adelante, la predominancia de nubosidad la mayor parte del tiempo (IDEAM 2005).

Por lo que uno de los factores que determinan el uso de imágenes MODIS, es la frecuencia con la que pasan los satélites Aqua y Terra por la zona donde se ubica el territorio nacional.

Otro aspecto que podría ser importante es la disponibilidad del histórico de imágenes en los servicios que presta cada producto, como se describe en la tabla 3, Landsat cuenta con imágenes registradas desde el año 2013, sumado a estos años de registro, se debe resaltar que gran parte de las imágenes tomadas presentan nubosidad en la zona, por lo que no se puede observar la imagen con las condiciones adecuadas para el análisis. A diferencia del producto Landsat 8, MODIS

cuenta con una gran base de registros, además de presentar un servicio exclusivo para la identificación de aerosoles en la atmosfera conocido como AOD.

Es por estas razones que finalmente se decide trabajar con imágenes MODIS, que si bien, no cuentan con una resolución alta, la identificación de las características de los aerosoles en la zona de estudio es más que suficiente para realizar los respectivos análisis.

4.3.2.2. *Descarga de imágenes MODIS.*

La NASA (Nacional Aeronáutica and Space Administration) presta el servicio de consulta y descarga de imágenes de percepción remota con los diferentes proyectos con la que cuenta; si bien otras instituciones tienen a cargo este servicio en otros productos satelitales como es el caso de la ESA (Agencia Nacional Europea), por sus siglas en inglés, con las imágenes Sentinel 2, para el desarrollo de este proyecto, se utilizara uno de los servicios prestados y administrados por la NASA, como es el caso de MODIS.

Dentro de los sensores y configuraciones de este se cuenta con el producto llamado MCD19A2, el cual facilita la identificación de aerosoles en la atmosfera, al contar con una corrección de la lectura de la imagen conocida como MAIAC, por sus siglas en inglés, se garantiza la identificación de los aerosoles en superficies en áreas con nubosidad baja o en días despejados.

Para descargar estos productos se ingresa a la dirección web: [LP DAAC - MCD19A2 \(usgs.gov\)](https://lpdaac.usgs.gov/) , en ella se podrá revisar las características del insumo y la tecnología anteriormente descrita, con la que se realizaron capturas de las imágenes.

En esta página se tiene acceso a una caja de herramientas dentro de las cuales nos conecta con otra página web, en este sitio web se podrán trazar los parámetros para la descarga de las imágenes requeridas para el presente estudio. La dirección web del servicio es: <https://earthexplorer.usgs.gov/> , se recuerda que para poder dar uso de esta página es necesario crear un usuario y asignar contraseña.

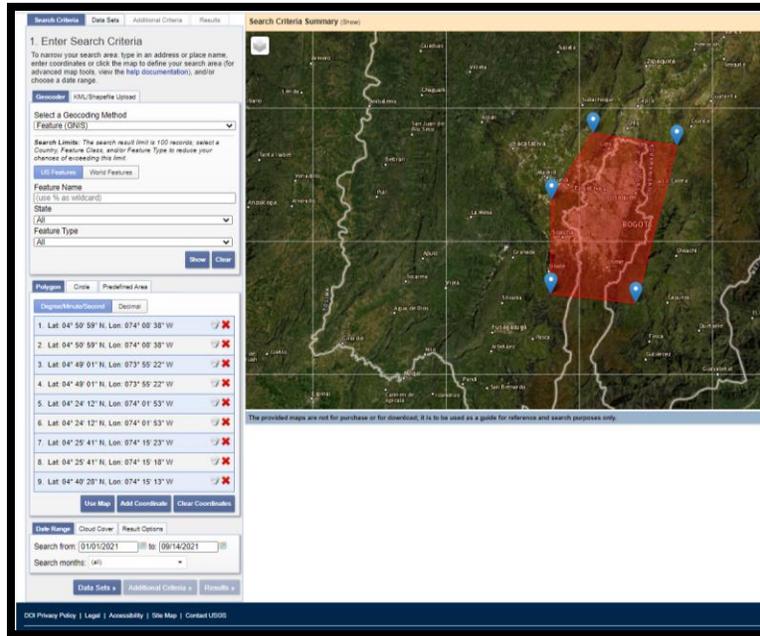


Figura 12. Menú de opciones servicio Earth Explorer.

En la anterior ilustración, se observa la interfaz gráfica de la página del servicio Earth Explorer de la USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), por sus siglas en inglés, y la NASA. Dentro de las opciones se encuentran las herramientas para delimitar el área de estudio del que se desea obtener información y el rango de tiempo en el que se necesitan los datos. También cuenta con otra opción para subir un archivo en formato KML o en Shp, se recomienda que este archivo no sea muy pesado, más sin embargo la ubicación de los polígonos puede ser una opción fácil de trabajar. También es importante mencionar que la mayor parte del territorio nacional, se ubica en una sola imagen de las tomadas por los satélites, estas se ubican y ordenan por un sistema de referencia alfa numérico, para el país, se observa que se encuentra clasificado con el numero horizontal del tile 10 (H10) y en el número Vertical del tile (V08), en orden de la convención sería H10V08

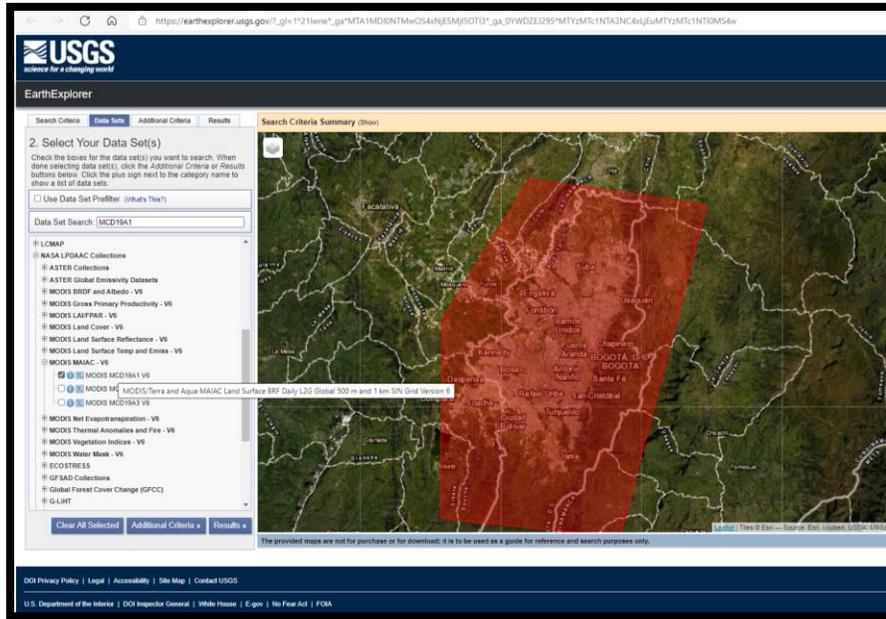


Figura 13. Selección del set de datos

La segunda parte del menú contiene la información del producto que se va a solicitar, es decir los tipos de instrumentos que se requieren para descargar las imágenes, para este caso se busca el tipo de imagen MDC19A1; dentro de los productos se selecciona el MODIS MAIAC – V6 pues este contiene la corrección que se le realizó a las imágenes por parte de la NASA para obtener mejor resultado en la identificación de aerosoles en atmosfera.

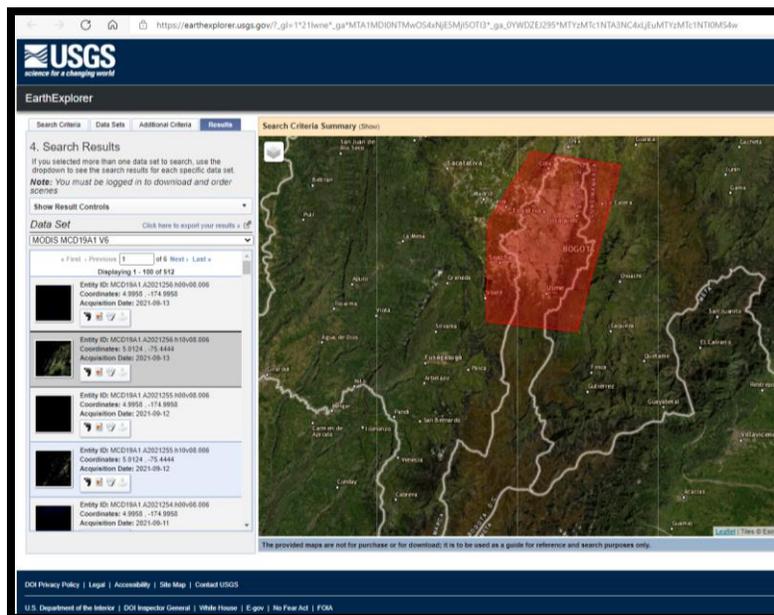


Figura 14. Resultados de búsqueda.

Una vez se selecciona el tipo de imagen, se prosigue a seleccionar el producto y descargarlo, cada imagen contiene un menú que tiene diferentes opciones, la primera es “Footprint” esta nos permite visualizar la imagen y la información básica de la captura, la siguiente opción de este menú es una imagen previa en el mapa base ubicado en la derecha del visor, La penúltima opción permite visualizar los metadatos y finalmente se encuentra la descarga del archivo completo.

Los archivos que se obtienen de esta descarga presentan algunas características importantes que se deben tener en cuenta, como el formato y el nombre del archivo.

El formato que tiene el nombre se presenta así:

- MCD19A2.A2020001.h10v08.006.2020003034330

Este archivo viene en formato HDF, este permite su lectura con programas de SIG como ArcGIS de ESRI o el software libre Qgis o Quantum GIS, entre otros; en cómo se menciona, el nombre del archivo contiene información importante del contenido de este.

MCD19A2.A – 2020001: Día de la Observación – h10v08: es el tile o la ubicación del lugar del estudio en conversiones internacionales. 006: número de versión o colección, y finalmente tenemos la fecha de creación del archivo.

4.3.2.3. *Preparación de archivo ráster y Re proyección de coordenadas.*

Los archivos entregados por el servicio de la USGS y la NASA, vienen sin un sistema de coordenadas definido, por lo que es necesario llevar a cabo una Re proyección del sistema y con esto poder trabajarlo en un sistema de coordenadas planas, para el caso de la ciudad de Bogotá se cuenta con un sistema conocido como Magna Colombia Bogotá, en el que se ubica como punto central del sistema nacional a la capital, de ahí su nombre.

Para poder asignar el sistema de coordenadas y poder alistar la imagen satelital, primero es necesario verificar, que datos se requiere de la base entregada, por lo que, al agregar la imagen, que se encuentra en formato ráster, primero se debe determinar, cuales productos se necesitan.

Al extraer una de las imágenes, se despliega un menú donde se encuentran varios servicios según lo que se requiera estudiar, como se busca el comportamiento de los aerosoles en la atmosfera se procede a seleccionar aquellas imágenes que contengan dentro de sus características el AOD (Profundidad Óptica del Aerosol), se determina que la banda de 0,55 μm tomada desde la Banda B4 (Verde), ofrece más resolución y cantidad de imágenes en comparación de las captadas por la banda B3 (Azul) de 0.47 μm (NASA 1999).

De la banda B4 ofrece 3 imágenes que se distinguen por su ubicación, por lo que se seleccionan las 3 opciones, estas se pueden unir en 1 solo archivo, pues las 3

son complementarias. Al concluir esta parte aún queda pendiente proyectar la imagen raster a coordenadas planas, para ello se utiliza en ArcGIS la herramienta “Project to raster”, en ella se va a agregar la siguiente información:

- Capa a la que se requiere cambiar las coordenadas
- Ruta en la que se guardara información (se recomienda guardar todo en una geodata base).
- Sistemas de coordenadas que se desea proyectar en la imagen: para este proyecto como ya se mencionó, se va a utilizar el sistema de coordenadas Magna Colombia Bogotá.

Finalmente, con esta información se ejecuta la herramienta y este, asignara la ubicación en el sistema requerido.

4.3.2.4. *Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.*

La Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), está conformada actualmente de 18 estaciones fijas y 2 móviles. Este sistema permite la medición de parámetros como PM2.5, PM10, O₃, SO₂, NO₂ y CO, además que cuenta con los equipos para la medición de variables meteorológicas como precipitación, temperatura, presión atmosférica, radiación solar, velocidad, y dirección del viento (secretaria Distrital de Ambiente, 2020).

La ubicación de estas estaciones es un insumo importante para el análisis de calidad del aire en PM2,5 propuesto, por lo que desde la página de datos abiertos del IDECA se puede encontrar esta capa.

Primero se ingresa a la página web <<https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/31ocalización-de-las-estaciones-calidad-del-aire-en-bogota>> en donde se encontrará un archivo en formato .CSV, este se puede abrir desde Excel.

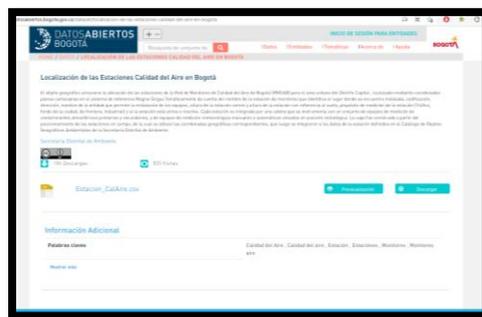


Figura 15. Página web del IDECA (datos abiertos) para descarga de las estaciones de calidad del aire de Bogotá.

Para obtener la información, en la Ilustración 15, se encuentran 2 opciones para trabajar este archivo, “visualización” y “descarga”, para poder trabajar directamente con los datos se descarga este archivo, al abrirlo se obtendrán los siguientes datos:

Dentro de la información entregada por la página de datos abiertos, se registra la ubicación de 14 estaciones fijas y 1 móvil (Tabla 3), se debe tener en cuenta que la información es del año 2019 y no ha sido actualizada, por lo que se debe proceder a ingresar esta información en el software SIG, para este caso se utiliza ArcGIS de ESRI y luego buscar información de las estaciones restantes, para poder registrar la ubicación dentro de la cartografía.

Tabla 3. Información estaciones de monitoreo de Calidad del aire. Fuente: secretaria Distrital de Ambiente – 2019

ESTACION	COD_ESTAC	DIR_ESTAC	ALTURA	CORREGIDA	LATITUD	LONGITUD	NORTE	ESTE	LOCALIDAD	SECTOR	BARRIO	UPZ
Bolivia	10	Av. Calle 80	2574	AC 80 121 98	4,72759285	-74,1264508	114532,225	94570,2626	Engativa	5663	EL DORADO	UPZ73
Carvajal	3	Autopista Su	2563	AU SUR 63 40	4,59661723	-74,1495668	100042,907	92004,615	Kennedy	4544	LAS DELICIAS	UPZ45
Centro de Al	5	Calle 63 No.	2577	CL 63 59A 06	4,65768001	-74,0871811	106798,299	98929,3771	Barrios Unid	5112	PARQUE DIS	UPZ103
Fontibon	14	Kr 96 G No.	2591	KR 96G 17B 4	4,67026259	-74,1414109	108189,981	92909,9309	Fontibon	6406	VILLEMAR	UPZ75
Guaymaral	8	Autopista Nd	2580	AK 45 205 59	4,78341785	-74,0416191	120708,786	103984,609	Suba	9136	CASABLANC	UPZ2
Kennedy	9	Kr 80 No. 40	2580	KR 80 40 55 S	4,62206375	-74,1555547	102857,952	91339,9406	Kennedy	4507	CIUDAD KEN	UPZ47
Las Ferias	6	Av. Calle 80	2552	AC 80 69Q 50	4,69169375	-74,0821497	110561,149	99487,5055	Engativa	5402	SANTA ROSA	UPZ26
Puente Aran	13	Calle 10 No.	2590	CL 10 65 28	4,63104555	-74,1180006	103851,627	95508,5693	Puente Aran	6212	SALAZAR GO	UPZ111
Sagrado Cora	2	Calle 37 No.	2621	CL 37 8 40	4,62501204	-74,0671294	103184,595	101155,49	Santafe	8101	SAGRADO CQ	UPZ91
San Cristoba	7	Kr 2 Este No	2688	KR 2 ESTE 12	0	0						
Suba	11	Kr 111No. 15	2571	KR 111 159A	4,76086977	-74,0927385	118213,721	98311,6246	Suba	107106	TUNA RURAL	UPR1
Tunal	4	Kr 24 No. 49	2589	KR 24 49 86 S	4,57580779	-74,1331615	97740,8646	93825,7822	Tunjuelito	2401	TUNAL ORIE	UPZ42
Usaquen	1	Kr 7 B Bis No	2570	KR 7B BIS 13	4,71141486	-74,0316658	112743,538	105090,537	Usaquen	8404	BELLA SUIZA	UPZ14
Unidad Movi	14	AK 7 Calle 60	2578	AK 7 60 00	4,64537041	-74,0611403	105436,835	101820,032	Chapinero	8206	LA SALLE	UPZ90

Es necesario ubicar estas estaciones en la cartografía que se está desarrollando, por este motivo se deben seguir los siguientes procesos:

Tabla 4. Procesamiento de información de estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.

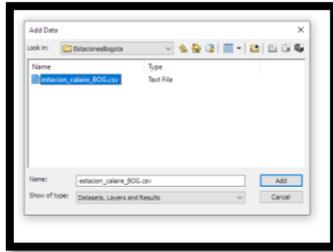


Figura 16. Menú de agregar Data en ArcGIS.

Primero se busca archivo desde la opción Add Data, donde se selecciona y se da clic en la opción “add” como se observa en la Figura 1.

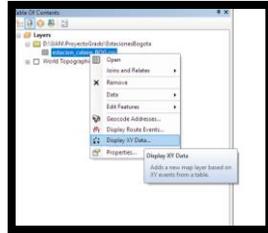


Figura 17. Menú de opciones de archivo en tabla de contenido.

Se agregará el archivo en la tabla de contenido, en la figura 2 se presenta que al dar clic derecho sobre este documento y se despliega un menú, para poder continuar con el proceso, se selecciona la opción “Display XY Data...”



Figura 18. Herramienta Display XY Data

En la figura 3 se observa la herramienta seleccionada, para este caso se ingresan los siguientes datos:
 X Field: Longitud
 Y Field: Latitud
 Z Field: none
 Sistemas de coordenadas: se recomienda dejar la que viene por defecto, en este caso es un sistema geográfico.

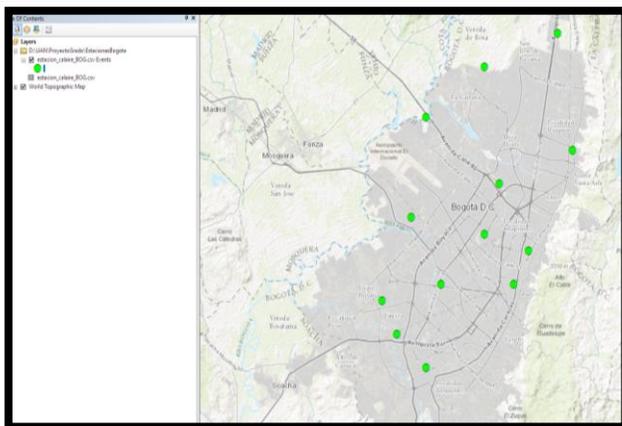


Figura 19. Visor de ArcGIS

Al ejecutar la herramienta, este nos genera un archivo temporal donde ubica los puntos dentro de las coordenadas, como se presenta en la figura 4, es necesario cambiar este archivo temporal a un shape de puntos, para esto, se despliega el menú con clic derecho sobre la capa temporal de puntos y se sigue la ruta: Data – Export Data. En ella se asigna la ubicación del shape y se le da nombre, luego este nos genera una capa adicional con la misma información del temporal, eliminamos este último y se procede a trabajar con la capa creada.

valores captados por las imágenes de los sensores remotos y los valores captados en el monitoreo de las estaciones, buscando asignar un valor para ello, para la adecuada determinación de estos valores se debe tener en cuenta las siguientes condiciones:

- La ubicación de la estación debe encontrarse dentro del espectro captado por el sensor.
- Se requiere que existan relaciones de valores entre la imagen y la ubicación de las estaciones
- Los valores de PM_{2,5} captados por la estación, deben encontrarse cercanos a la hora por la que fue captada la imagen y el día.

Estas condiciones deben ser revisadas al momento de buscar la relación entre los productos (Mohammed 2011).

4.3.2.6. *Método de correlación entre imagen MODIS y Datos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.*

Para poder trabajar con la información entregada por los productos MODIS y las estaciones de monitoreo de calidad del aire, es necesario unir los datos obtenidos por las imágenes satelitales e incorporarlos en la data de la medición de PM_{2,5} de las estaciones, para ello se da uso de la herramienta de ArcGIS “extract multivalued to point” en ella se agrega la información de las estaciones de monitoreo, con el valor del pixel de la imagen trabajada, al procesarlos, como resultado, se obtiene una celda adicional en la tabla de atributos de la capa de puntos de las estaciones, con el valor de la capa del producto MODIS.

Al contar con estos valores, se procede a exportar esta tabla en formato Excel, con el fin de poder trabajar de una manera más sencilla el respectivo análisis de correlación entre los resultados de los procesos de la imagen, frente a los valores obtenidos por la imagen MODIS – OAD de 0.47 μm .

4.3.3. Coeficiente de Correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson permite evaluar que tan relacionados están los valores de las estaciones frente a las de la imagen del MODIS, es necesario realizar estas relaciones en cada estación poder obtener una relación temporal de las mismas, el resultado de este procedo debe estar entre 1 y -1 donde 1 es una relación lineal positiva directa, -1 es una relación lineal inversa y 0 no tiene ningún tipo de relación lineal entre las variables. (Jorge Dagnino S., 2014).

Adicional a este análisis de correlación, también se evalúa la relación entre las variables por medio del coeficiente de determinación (R^2), para poder determinar qué tan acertada es la hipótesis, el resultado debe ser menor al 20%, si es mayor indica que no hay relación entre los valores evaluados. En caso de obtener un resultado menor a 20% está refiriendo que las variables tienen una correlación,

entre más bajo sea el resultado, indicaría que esa relación es más débil. (Morales Vallejo Pedro, 2011).

Para determinar el R^2 se eleva al cuadrado el resultado del coeficiente de Pearson.

Finalmente se verifican los resultados de estos análisis y se procede a establecer el método para el respectivo análisis temporal, por lo que se debe verificar aquellas imágenes con mejor cobertura y que coincidan con la ubicación de las estaciones, como parte de este análisis se deben ejecutar los siguientes procesos:

- Unificar las capas que vengan por satélite, es decir, en los productos del satélite Aqua al agregar el archivo HDF, presenta hasta 4 bandas en 0,47 μm , con el satélite Terra se presenta una situación similar, pero con dos bandas lo que se traduce en diferentes capas, para que la información no quede incompleta, se recomienda unir las capas ráster, además, se debe delimitar el área de estudio para evitar exceso de información que no se va a utilizar.
- Se recomienda generar archivos en Gtiff para poder trabajarlos en diferentes formatos y aplicaciones.
Generar un promedio de los valores de los ráster trabajados en determinado tiempo para poder estimar los valores de PM2,5.

4.3.4. ESTADÍSTICAS ZONALES

Las condiciones descritas en el ítem anterior, pueden determinar una diferencia entre la hora de la captura de la imagen y el momento en que son captados los datos de PM2,5 por la estación de monitoreo, por este motivo se decide realizar un breve análisis adicional por medio de la herramienta de “estadísticas Zonales” en ArcGIS para los datos del año 2017, Con esta función lo que se obtiene es, en este caso, el promedio de los valores obtenidos en un diámetro de 800 metros a la redonda, con el fin de captar la lectura de los pixeles obtenidos y con ello, promediarlos, verificando si la correlación obtiene alguna modificación, a continuación se presentan las gráficas de la correlación de los datos aplicados a las estadísticas zonales del año 2017.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. Verificación de la información

En la tabla 5, se encuentran los valores de los píxeles de la imagen MODIS de que coinciden con la ubicación de las estaciones, por cada fecha se observan variaciones en los valores, esto se podría interpretar como las fluctuaciones en las imágenes captadas según los aerosoles flotantes en la superficie, de los días analizados, se encuentra que el 24 de Enero del 2017, presenta los valores más altos asignados a los píxeles captados.

Tabla 5. Datos imágenes MODIS MCD19A2

FECHA	ESTACION	VALOR PIXEL
12/01/2017	Carvajal	263
	Centro de Alto Rendimiento	133
	Guaymaral	204
	Kennedy	190
	Suba	207
	Tunal	241
16/01/2017	Carvajal	108
	Centro de Alto Rendimiento	98
	Guaymaral	56
	Kennedy	93
	Las Ferias	101
	Puente Aranda	66
	Tunal	107
23/01/2017	Carvajal	69
	Centro de Alto Rendimiento	57
	Guaymaral	58
	Kennedy	79
	Las Ferias	44
	Puente Aranda	34
	Suba	60
	Tunal	68
24/01/2017	Centro de Alto Rendimiento	285
	Guaymaral	208
	Kennedy	319

FECHA	ESTACION	VALOR PIXEL
	Las Ferias	344
	Puente Aranda	319
	Suba	184

5.2. Comparación entre los valores obtenidos por día.

Se aplica el factor de estaca a los datos de los pixeles obtenidos, con este cambio se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6 Base de Datos estaciones año 2017.

FECHA	ESTACION	VALOR PIXEL	Factor escala (0,01)	ESTACION A LAS 15 HRS
12/01/2017	Carvajal	263	0,263	18,5
	Centro de Alto Rendimiento	133	0,133	31,9
	Guaymaral	204	0,204	21
	Kennedy	190	0,19	27
	Suba	207	0,207	19,1
	Tunal	241	0,241	10,8
16/01/2017	Carvajal	108	0,108	22,8
	Centro de Alto Rendimiento	98	0,098	16,3
	Guaymaral	56	0,056	6
	Kennedy	93	0,093	13
	Las Ferias	101	0,101	8
	Puente Aranda	66	0,066	14,2
	Tunal	107	0,107	4,3
23/01/2017	Carvajal	69	0,069	21,6
	Centro de Alto Rendimiento	57	0,057	18
	Guaymaral	58	0,058	14
	Kennedy	79	0,079	15
	Las Ferias	44	0,044	31
	Puente Aranda	34	0,034	30,1
	Suba	60	0,06	0,7
	Tunal	68	0,068	3,8
24/01/2017	Centro de Alto Rendimiento	285	0,285	25,4
	Guaymaral	208	0,208	20

FECHA	ESTACION	VALOR PIXEL	Factor escala (0,01)	ESTACION A LAS 15 HRS
	Kennedy	319	0,319	24
	Las Ferias	344	0,344	45
	Puente Aranda	319	0,319	39,3
	Suba	184	0,184	23,9
8/02/2017	Carvajal	106	0,106	11,9
	Centro de Alto Rendimiento	95	0,095	8,5
	Guaymaral	60	0,06	7
	Kennedy	91	0,091	8
	Las Ferias	94	0,094	12
	Puente Aranda	85	0,085	9,8
	Suba	107	0,107	5,9
9/02/2017	Centro de Alto Rendimiento	133	0,133	33,2
	Guaymaral	204	0,204	13
	Kennedy	190	0,19	18
	Las Ferias	150	0,15	57
	Puente Aranda	132	0,132	20,8
	Suba	153	0,153	21,7
	Tunal	241	0,241	6,2
30/11/2017	Centro de Alto Rendimiento	232	0,232	19.3
	Guaymaral	213	0,213	7
	Las Ferias	226	0,226	12.9
	Suba	227	0,227	30.4
	Usaquén	268	0,268	34
	Unidad Móvil	227	0,227	22
19/12/2017	Carvajal	190	0,19	49,3
	Guaymaral	149	0,149	23
	Kennedy	235	0,235	42
	Puente Aranda	95	0,095	55
	Suba	234	0,234	16,3
	Tunal	20	0,02	26
	Usaquén	233	0,233	36
	Unidad Móvil	138	0,138	33

De esta manera se obtuvo valores de rangos más fáciles de operar, como se puede observar, las proporciones de los valores se mantiene.

Al generar cartografía con los valores obtenidos, se obtuvo la figura 22, pues en el se encuentran cambios no solo por días, también por estaciones.

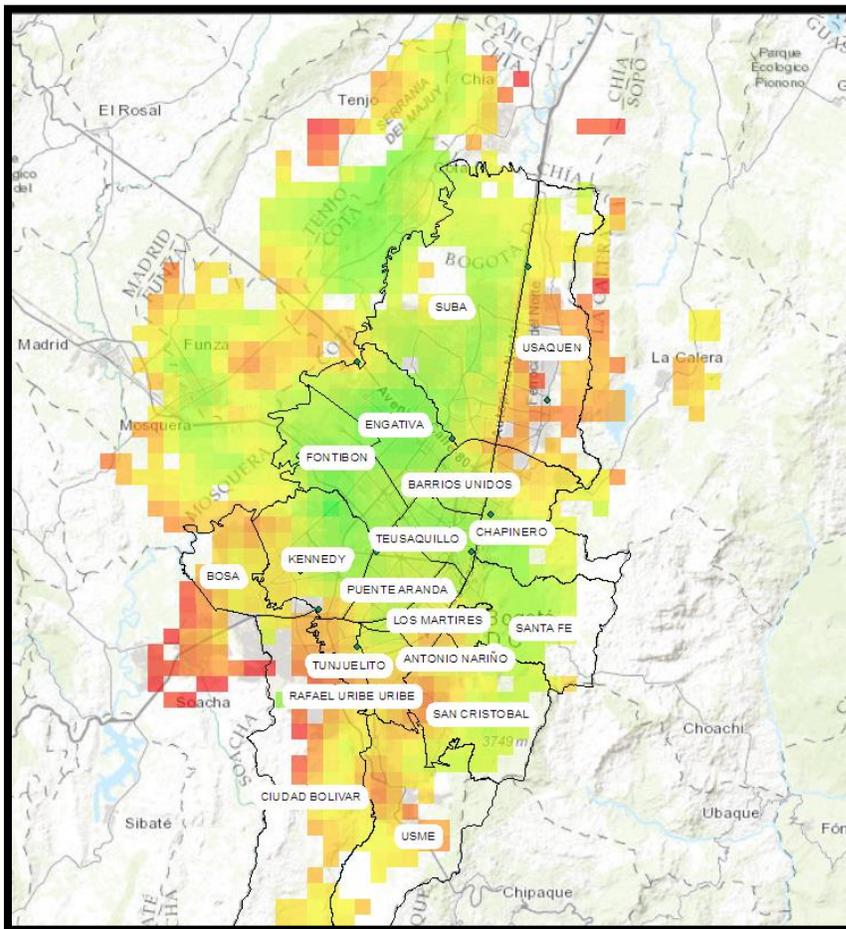
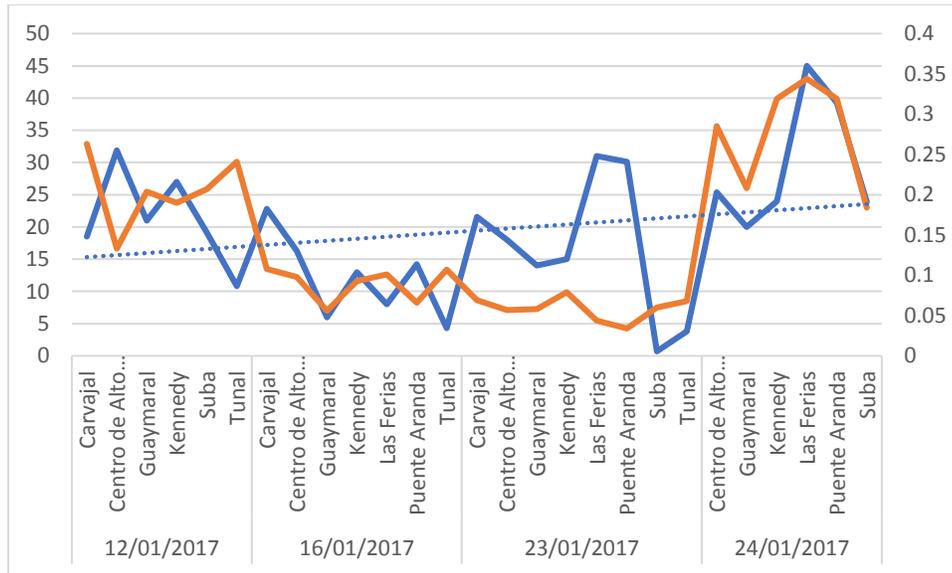


Figura 22. Ubicación estaciones calidad del aire con imagen MODIS.

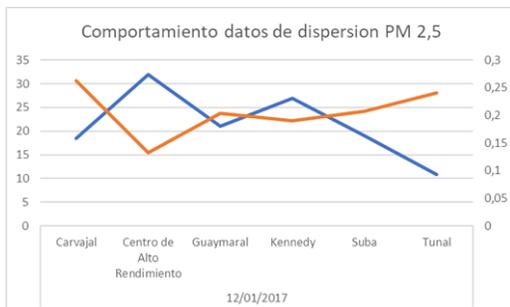
Para el presente análisis se inició con una representación gráfica de dispersión de los datos, por día, donde se podrá observar el comportamiento de las lecturas tanto de los índices de calidad del aire PM_{2,5} tomadas de la red de estaciones RMCAB como de los valores MODIS, a continuación, se socializan resultados de los datos de dispersión:

Grafica 1 Comportamiento de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS – Enero 2017.

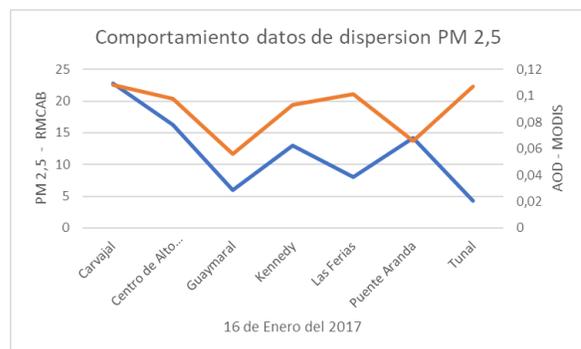


En la gráfica 1, se presenta el comportamiento de los contaminantes PM2,5 captados por las estaciones y el comportamiento frente a los valores de los pixeles que componen la imagen ráster del producto MODIS - AOD sobre aerosoles. Se puede observar un comportamiento parecido, mas no indica que se comparta la misma información con el material PM2,5 pero puede describir el comportamiento de los contaminantes contenidos en el aire al momento de la captura de la imagen.

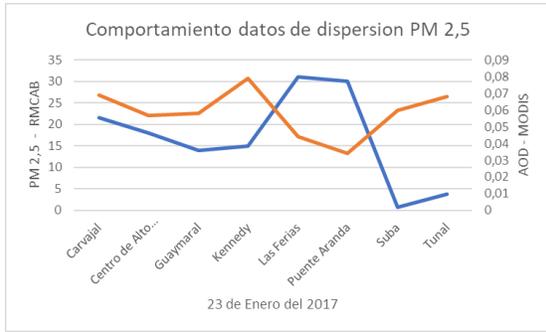
Grafica 2 Comportamiento de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS – 12 de enero 2017.



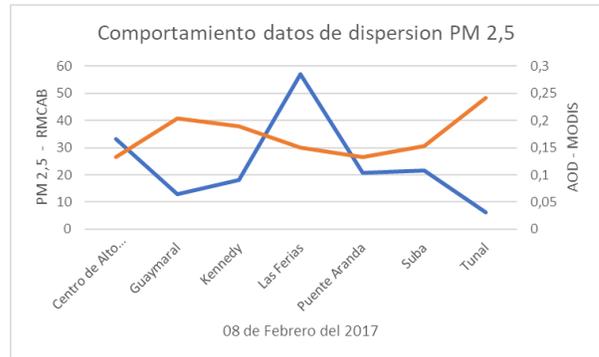
Grafica 3 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 16 de enero del 2017



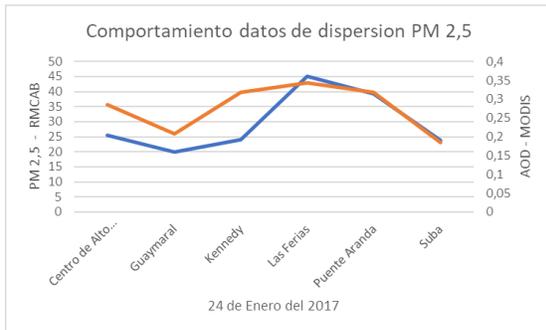
Grafica 4 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 23 de enero del 2017



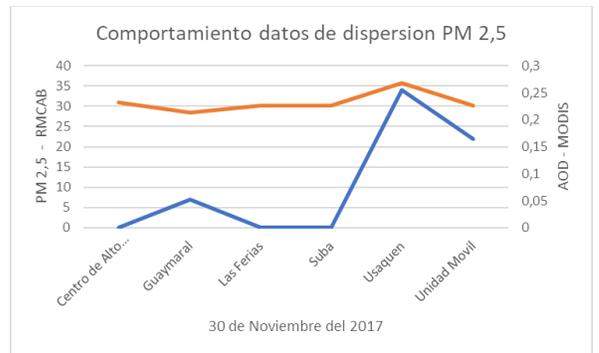
Grafica 7 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 08 de febrero del 2017



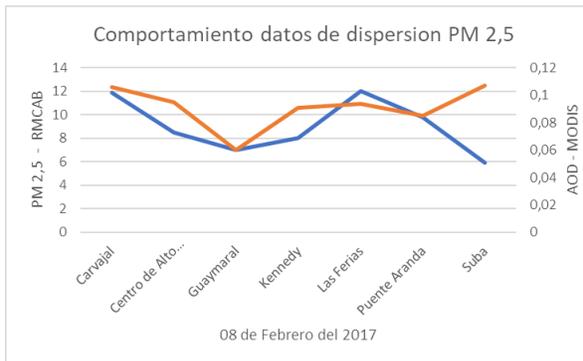
Grafica 5 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 24 de enero del 2017



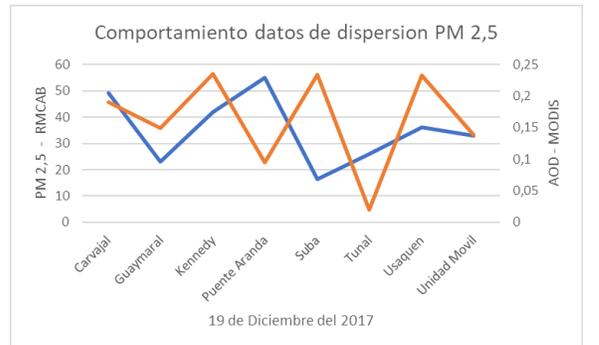
Grafica 8 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 30 de noviembre del 2017.



Grafica 6 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 08 de febrero del 2017



Grafica 9 Comportamiento de PM2,5 estaciones y aerosoles de MODIS 19 de diciembre del 2017.

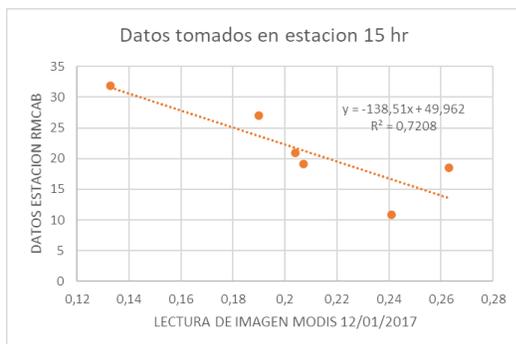


En las Gráficas del 2 al 9, se representa el comportamiento de las partículas de PM2,5 según datos entregados por la RMCAB y las lecturas tomadas por los productos MODIS utilizados para el presente estudio.

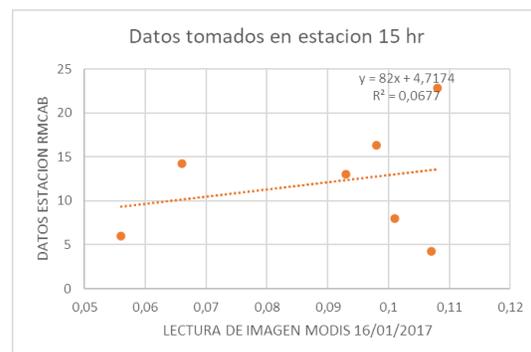
En gran parte de estas representaciones, se encuentran patrones similares en los patrones expuestos por las gráficas, pero esto no quiere decir que exista una relación directa con los valores de PM 2,5, sin embargo si ilustra cómo se comportan las emisiones y aerosoles en la atmosfera, además, con ello se podría determinar que las partículas de 2,5 micrones, efectivamente hacen parte de los registros entregados por las imágenes MODIS, en las grafica 3 la lectura de las estaciones y los valores de los pixeles de la imagen, presentan cierto comportamiento parecido hasta que en la estación de medición del Tunal, se pueden encontrar valores totalmente diferentes, en cada gráfica se presentan estaciones que no coinciden con los valores de las imágenes MODIS, inclusive en la Grafica 8, la mayor parte de la lectura, presentan comportamientos muy distintos, estos patrones pueden ser comunes ya que la ciudad de Bogotá, se ubica en una zona geográfica de alta presencia de nubes(Germán Horacio Rosero, 2007), lo que genera que se pueda ver alterada la lectura de las imágenes satelitales, bien sea por alta nubosidad donde aparecen imágenes sin áreas leídas o con lectura errónea o con baja precisión.

A continuación, se presentan la información acerca del comportamiento de la regresión lineal de los datos ya presentados en la tabla 6:

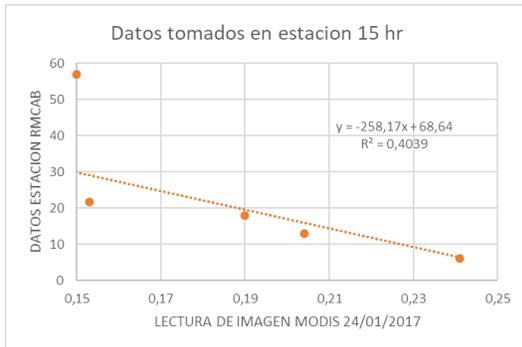
Grafica 10. regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS –12 de enero 2017



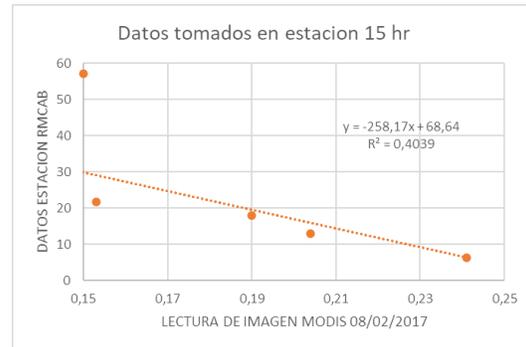
Grafica 11. regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS –16 de enero 2017



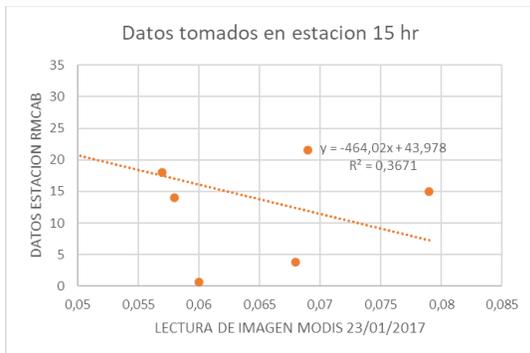
Grafica 12. Regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS –24 de enero 2017



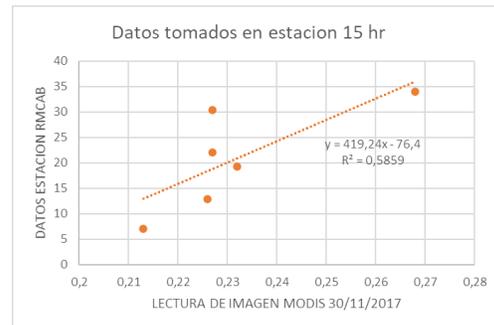
Grafica 14. Regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS –08 de febrero 2017



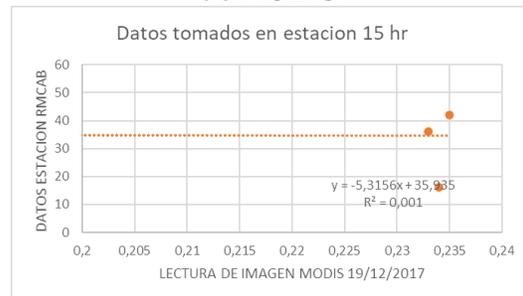
Grafica 13. Regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS –23 de enero 2017



Grafica 15. Regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS –30 de noviembre 2017



Grafica 16. Regresión lineal de PM2,5 estaciones de monitoreo y Aerosoles de MODIS.



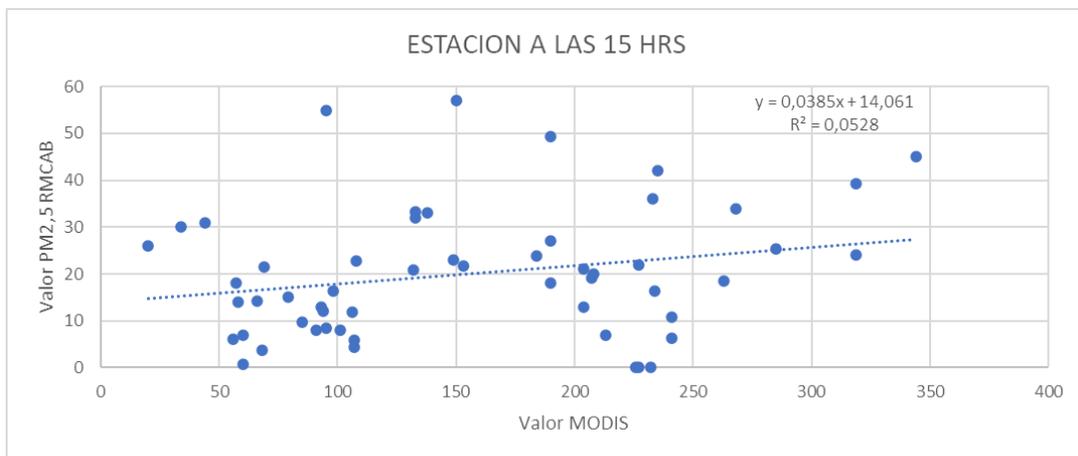
En la información registrada se presenta un comportamiento variado entre la información de los datos de las estaciones de monitoreo de calidad del aire y del registrado por las imágenes MODIS, las gráficas 10,12,13 y 14 tienen una línea de tendencia bajista pero con un R^2 positivo, esto indica que los valores de las estaciones en ambos métodos, tienen una relación débil mientras que las gráficas 11 y 15 contienen una línea de tendencia alcista con un R^2 igualmente débil, finalmente la gráfica 16 no contiene relación alguna entre los datos y su comportamiento pues la línea de tendencia prácticamente se registra casi recta y

el R2 es muy cercano al 0. Dentro del comportamiento de los resultados, se puede identificar un patrón importante y es la diferencia del comportamiento de los valores registrados en diferentes meses, lo que podría interpretarse también como resultado de los cambios presentes en el comportamiento del clima según el periodo en el que se registre la medición de los valores en cuestión.

5.3. Resultados Correlación de los datos.

A continuación, se relacionan los datos analizados del año 2017.

Grafica 17 Correlación MODIS – RMCAB para el PM 2,5 del año 2017



Para la información tomada directamente de las fuentes (Imágenes MODIS y la RMCAB) se encontró un coeficiente de correlación de 0,32, es un valor muy bajo para poder determinar alguna coincidencia entre las imágenes de aerosoles tomadas por el producto MODIS - MCD19A2 y los datos entregados por la Red de Monitoreo de la Calidad del aire de Bogotá, antes de determinar si el producto puede ser utilizado o no para determinar PM2,5, es necesario que se analicen varios factores que pueden determinar la precisión o no de los productos MODIS.

5.3.1. Condiciones externas a la lectura de la imagen

Algunas de las condiciones climáticas y naturales que pueden alterar la correcta lectura de la imagen son:

- Nubosidad: Como ya se mencionó, una de las características climáticas en la ciudad de Bogotá, es la nubosidad, pues la ciudad presenta valores

variados según el mes, pero presenta mayormente cielos ligeramente despejados o parcialmente despejado, en promedio es el 30% de la presencia de nubes en la atmosfera, esto indica que, en la mayoría de las imágenes tomadas, se obtendrá sectores con nubosidad que podría dificultar o alterar la lectura de los aerosoles en la ciudad.(Germán Horacio Rosero, 2007

- Velocidad y rumbo del viento: otra característica de la ciudad de Bogotá es el cambio de la velocidad y el sentido del viento, según lo registrado por otros estudios, la velocidad tiende a tomar la mayor parte de las veces, sentido hacia el Noroeste (17,4%), Este (13,7%) y Norte (11%) tomadas en 1 año, la velocidad de éste, cambia con los meses y dependiendo de la hora en la que se presente (IDEAM, 2007).

HORA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
00-01	21	25	22	25	48	40	49	46	47	33	26	25
01-02	20	31	23	34	50	44	47	47	50	38	6	29
02-03	18	31	31	40	42	48	42	46	33	37	29	24
03-04	29	32	28	36	29	39	54	44	41	33	17	31
04-05	37	33	31	36	36	40	48	43	44	38	19	37
05-06	28	25	28	38	29	37	47	47	41	30	16	30
06-07	29	32	33	38	39	38	48	47	38	40	31	34
07-08	31	44	38	45	45	53	70	72	46	41	36	37
08-09	46	45	49	49	51	67	87	98	73	56	48	42
09-10	56	71	63	79	81	89	113	118	92	65	69	56
10-11	78	80	75	90	111	109	119	132	114	83	70	71
11-12	84	92	96	116	120	125	127	130	117	101	70	84
12-13	197	187	230	173	135	122	126	125	129	170	336	100
13-14	230	227	247	208	128	121	132	132	135	201	270	200
14-15	238	247	253	237	148	120	129	128	132	224	271	231
15-16	253	252	253	245	94	120	130	127	137	224	269	247
16-17	258	257	263	257	125	109	128	128	127	224	266	262
17-18	258	271	289	280	109	99	123	123	121	257	275	269
18-19	295	255	310	329	75	84	113	116	100	24	301	328
19-20	1	26	9	2	57	69	93	97	62	34	338	16
20-21	2	33	16	21	34	52	69	77	50	26	13	17
21-22	9	31	18	33	45	45	66	56	43	28	22	27
22-23	13	19	18	34	38	45	48	54	41	28	26	40
23-00	25	33	22	23	37	42	52	47	37	31	20	27



Tabla 7. Promedio Velocidad del Viento durante el año. – IDEAM 2007.

En la Tabla7, se observa el horario en el que más se presenta velocidad del viento, las imágenes MODIS se generan entre las 14 y 16 horas para la composición de las imágenes MCD19A2 indica que la dispersión de los contaminantes es relativamente rápida y entre la hora de la captura de la imagen y la toma de la lectura de los datos en estación de monitoreo, por lo que se deben tener en cuenta estos factores para un mejor análisis, pues al presentarse estas variaciones en el comportamiento de la velocidad del viento, mientras MODIS captura la información frente a los datos que

se registran en la estación, se puede presentar cambios debido a las diferencias de horario entre la lectura de la estación y el registro de la imagen, el viento arrastra una gran cantidad de contaminantes a sectores aledaños al punto de la ubicación de la estación de monitoreo, generando diferencias considerables entre la data generada.

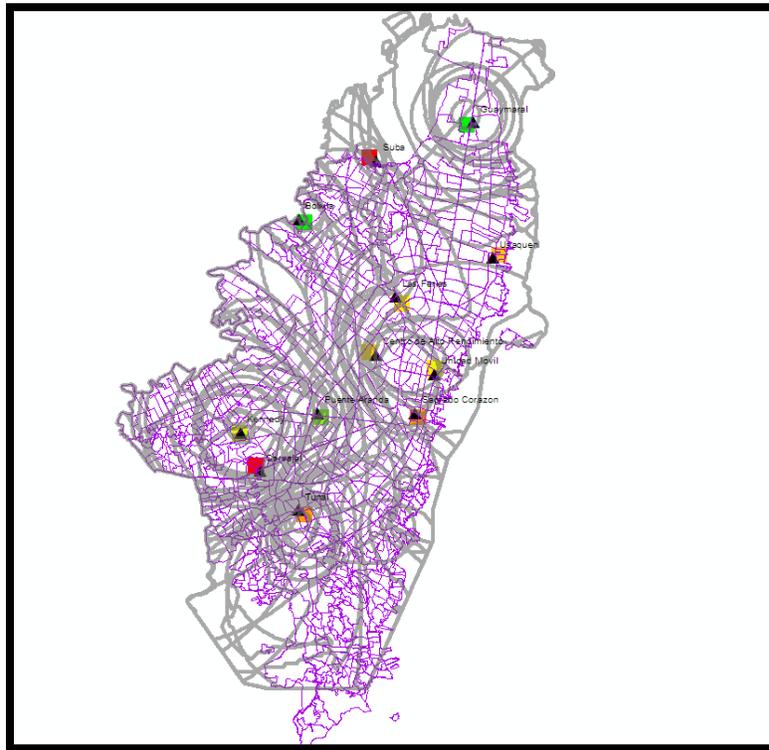
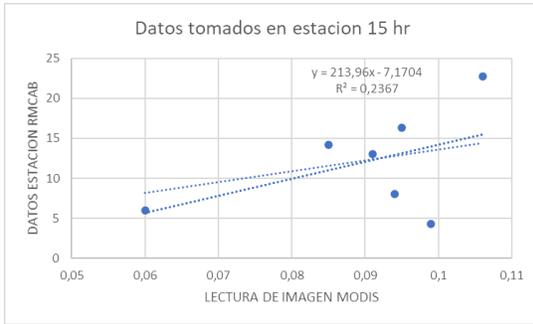


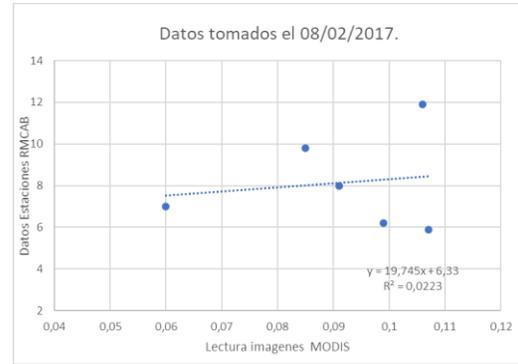
Figura 23. Dirección del viento - IDEAM 2019.

5.3.2. Análisis estadístico zonal.

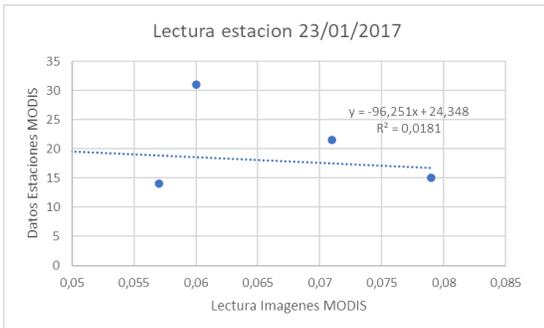
**Grafica 18 Correlación entre datos
RMCAB/ Imágenes MODIS 16/01/2017.**



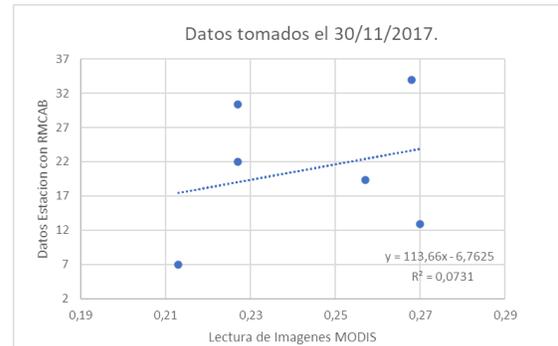
Grafica 19 Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 23/01/2017



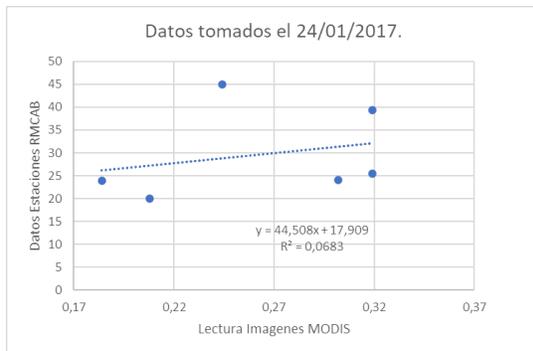
Grafica 22. Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 30/11/2017.



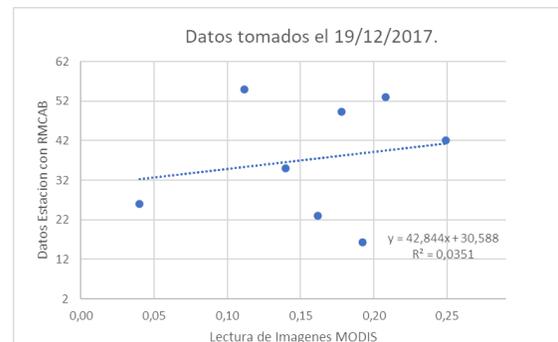
Grafica 20. Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 24/01/2017.



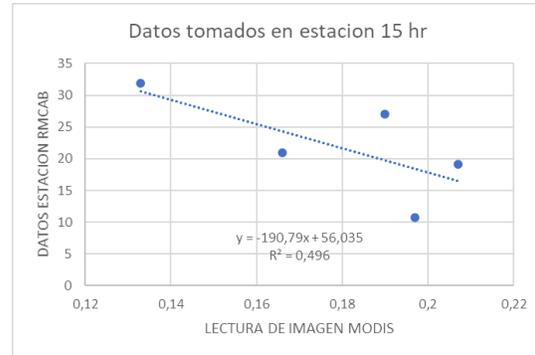
Grafica 23. Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 19/12/2017.



Grafica 21. Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 08/02/2017.



Grafica 24. Correlación entre datos RMCAB/ Imágenes MODIS 12/01/2017



Al aplicar la herramienta de “estadística zonal”, La mayoría de las gráficas presentan un coeficiente de correlación positivo con datos generalmente dispersos en algunas grafica más que en otras donde presentan una línea de tendencia positiva, pero con R^2 alejada del 1, excepto en la gráfica 24 donde se encuentra que la recta esta con una tendencia negativa, este comportamiento solo se observa en análisis con los datos registrados en días específicos.

Tabla 8. Coeficiente de Correlación de estadísticas zonales del 2017.

Grafica	Coeficiente de Relación
16/01/2017	0,49
24/01/2017	0,41
23/01/2017	-0,13
8/02/2017	0,26
30/11/2017	0,15
19/12/2017	0,36

Los coeficientes de correlación entregados por la aplicación de las estadísticas zonales, presentan algunos cambios, en su mayoría incrementan los valores del coeficiente de correlación en comparación con los encontrados con los datos entregados directamente por los pixeles de la imagen MODIS.

En cada grafica se observan comportamientos diferentes, pues en la mayoría de los datos hay un espacio considerable de tiempo y con ellos se presentan cambios del comportamiento del clima, desafortunadamente para la ciudad de Bogotá, la mayor parte del tiempo y de las imágenes evaluadas, presentan altos niveles de nubosidad en los últimos 5 años verificados, impidiendo que se hubiese logrado obtener registros continuos en un mismo periodo; solo se tomó el año 2017 debido a que es el que mayor número de días y estaciones registró en días con baja o

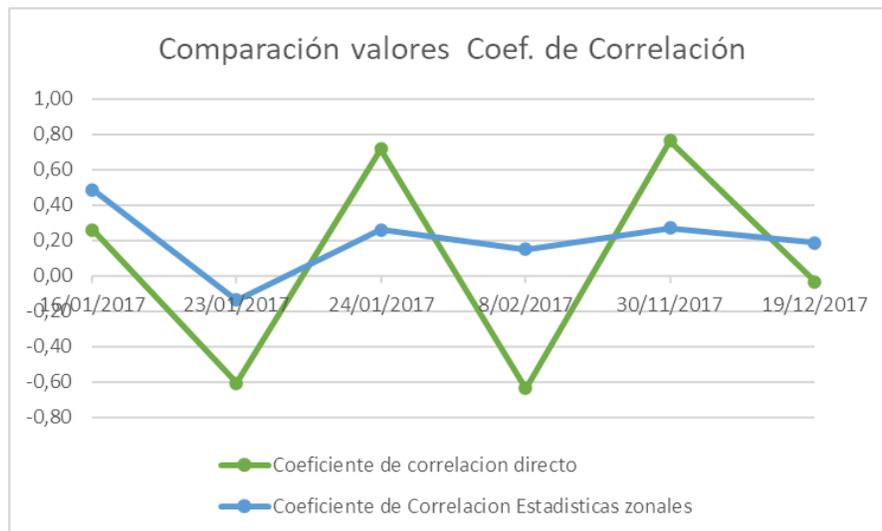
media nubosidad, además que la RMCAB solo tiene en sus bases, registros disponibles abiertos desde el año 2016, lo que imposibilita realizar análisis de años anteriores a éste.

Tabla 9. Diferencias entre correlación aplicando método de estadísticas zonales y valores entregados por MODIS.

Grafica	Coefficiente de Correlacion Estadísticas zonales	R cuadrado
12/01/2017	-0,70	0,49
16/01/2017	0,49	0,2367
23/01/2017	-0,13	0,0181
24/01/2017	0,26	0,068
8/02/2017	0,15	0,022
30/11/2017	0,27	0,073
19/12/2017	0,19	0,035

Los datos de las imágenes MODIS - MCD19A2 sin tratamiento, frente a aquellas a las que se les aplicó un proceso presentan diferencias considerables entre una imagen y la otra al modificar estos valores, donde se elimina uno de los datos con tendencia negativa, otras bajan el porcentaje de la correlación y aumenta considerablemente el valor de la correlación del día 16 de enero.

Grafica 25. Representación de las correlaciones analizadas.



El comportamiento de los valores, se puede verificar como la información se reduce de amplitud de rango en comparación con las imágenes que se obtuvieron directamente del producto MODIS – MCD19A2, se debe recordar que esta es una composición de dos imágenes capturadas por los satélites Aqua y Terra por lo que es difícil determinar una hora exacta, según la variación de la hora, puede influir en la similitud de los datos y por consiguiente se podrán observar datos muy diferentes a otros, las estadísticas zonales pueden contribuir a reducir estas diferencias, aumentando en algunas ocasiones el coeficiente de correlación del periodo analizado.

El Coeficiente de correlación datos MODIS con estadísticas zonales, es igual a 0,41. Mientras que el Coeficiente de correlación de datos directos es de 0,24.

Para obtener los datos expresados anteriormente, se debe contar con los datos de cada estación captada por la RMCAB y las imágenes MODIS - MCD19A2, en el lugar referenciado de este sistema, los datos directos corresponden con los datos de los píxeles y efectuar una correlación entre estas dos variables, mientras que para los datos con estadísticas zonales, es necesario iniciar varios pasos en el que se obtiene un área más amplia de la ubicación de la estación y donde se promedian los valores que en ese punto se encuentran, es así como se pudo generar una diferencia entre la imágenes con y sin procesamiento, los datos de correlación de ambos procesos, como se puede observar, en la imagen procesada se aumentó a 0,41 o 41% la efectividad de la correlación entre la estación y las imágenes utilizadas por MODIS - MCD19A2, en comparación con el 0,21 o 21% de la imagen original, esto se puede explicar en los cambios de la calidad del aire entre el tiempo que fue generada la imagen y la hora en la que se registraron los valores de calidad del aire por parte de la estación.

Esta metodología se divide en dos partes, para la primera parte se toma información de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y con los valores de los píxeles de las imágenes MODIS – AOD, provenientes de los productos MCD19A2, estos permiten identificar dentro de sus bandas, la lectura de los aerosoles en el aire, donde se encuentra también las evaluaciones de la contaminación atmosférica por varios componentes. (by Alexei Lyapustin & Wang, 2018).

Al ordenar estos productos, se aplica un análisis de correlación de Pearson; En la Tabla 11, se observa los valores del coeficiente de relación entre los datos obtenidos por el producto MODIS ya mencionado, y los datos entregados por la RMCAB.

Tabla 10. Correlación AOD - RMCAB, datos sin manipular

FECHA CAPTURA DE LA INFORMACION - DATOS SIN TRATAMIENTO	COEFICIENTE DE CORRELACION POR DIA	COEFICIENTE DE CORRELACION
12/01/2017	-0,85	0,24
16/01/2017	0,26	
23/01/2017	-0,61	
24/01/2017	0,72	
8/02/2017	-0,64	
30/11/2017	0,77	
19/12/2017	-0,03	

Dentro de los datos que se lograron obtener por días, la información del día 12 de enero, 23 de enero, 8 de febrero y 19 de diciembre, muestran un valor alto inverso en todos los días excepto el 19 de diciembre, donde la correlación es débil, sin embargo, al ser inverso, se interpreta que los valores de las imágenes MODIS son inversas u opuestas a los datos entregados por la red de monitoreo, esto según la teoría del coeficiente de correlación (Morales Vallejo Pedro, 2011).

Es por esta relación y por el valor débil del coeficiente de correlación de todo el conjunto de datos que se logró obtener del año 2017 (0,24), se propone adicionar un procedimiento, buscando eliminar el “ruido” en las imágenes AOD, pues la presencia de nubes y otros factores ambientales, pueden distorsionar la lectura efectiva de los píxeles de las imágenes.

En otros proyectos de investigación se buscan utilizar métodos estadísticos donde con los valores promedios y algunos procesos con software SIG, se busca identificar la correlación entre productos (Pulluquitín Taipe, 2019).

Para realizar el presente estudio y plantear una metodología donde se pueda generar una correlación entre los datos. Se realizó una estadística zonal en la que se obtuvieron los resultados de la tabla 9 y la gráfica 25, tomando como base parte de los procedimientos de otros proyectos de investigación y la aplicación de una herramienta SIG. Los resultados obtenidos con el procedimiento planteado, modifica los valores quedando más cercanos entre sí, eliminando los extremos.

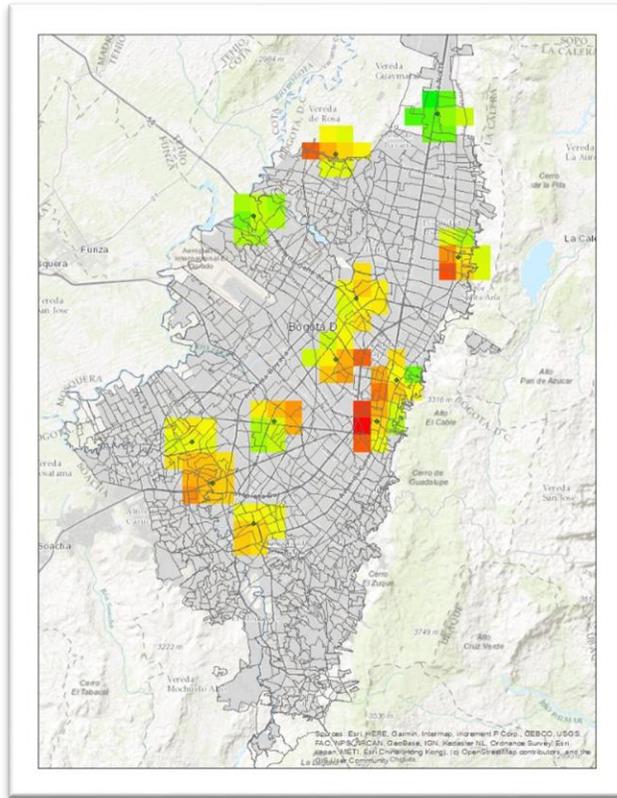


Figura 24. Estadísticas Zonales RMCAB - AOD

En la ilustración 24, se representa la ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, y la información que entregan las imágenes MODIS, la función de estadísticas zonales toma los pixeles que se encuentran cerca a cada estación y realiza una operación donde entrega tanto en interfaz gráfica como en una tabla, los valores promediados de cada zona, esto se hace con el fin de ampliar el análisis a la zona que abarca cada estación de monitoreo, pues en el momento de la captura de la imagen y la del registro puede existir diferencias de 10 minutos y en otras ocasiones de 30 minutos, pues como ya se mencionó, estas imágenes se producen en este caso, por la unión de los registros de los satélites Aqua y Terra, según los metadatos de estas imágenes, Terra toma la imagen sobre las 15 horas, mientras que Aqua lo efectúa sobre las 15:30 horas (by Alexei Lyapustin & Wang, 2018) .

Al obtener la imagen con los respectivos promedios, reflejados en la gráfica 25 y al tomar los datos numéricos y realizar el respectivo coeficiente de correlación, se observa un cambio en estos valores.

Tabla 11. Diferencias entre correlación de estadísticas zonales y de imágenes sin procesamiento.

Grafica	Coefficiente de correlacion directo	Coefficiente de Correlacion Estadisticas zonales
12/01/2017	-0,84	-0,70
16/01/2017	0,26	0,49
23/01/2017	-0,61	-0,13
24/01/2017	0,72	0,26
8/02/2017	-0,64	0,15
30/11/2017	0,77	0,27
19/12/2017	-0,03	0,19

La primera modificación es al valor de los datos, no solo en sus cantidades, también las correlaciones inversas que pasan de 4 a 2, pero la mayoría de los datos se ven reducidos, lo que según se explica en este tipo de relaciones de datos, la relación entre los datos, es más débil, lo que podría determinarse como una desventaja para la aplicación de esta herramienta en el análisis de las imágenes espaciales, pero al revisar los datos generales de los registros tomados en el año 2017, se observa como lo muestra la tabla 10, la correlación general, aumenta su valor de 0,24 a 0,41, si bien siguen siendo datos débiles, esto implicaría una notable fluctuación entre los datos al momento de ser capturada la imagen y el tiempo de toma de la muestra del PM2,5 en la estación de monitoreo, pues este método se plantea como complemento a la revisión del coeficiente de correlación de los datos sin ningún tipo de procesamiento más que el de ordenar la información y operarla, buscando encontrar alternativas para el uso de este tipo de herramientas tan importante y su interpretación.

De las estaciones de la RMCAB se encuentra que cada una según los datos registrados tanto en la estación, como en la imagen del producto MODIS, contienen sus propios valores de correlación:

Tabla 12. Correlación de Pearson por cada estación

ESTACION	Coefficiente de Correlación por estación.
Suba	0,74
Usaquén	0,69
Guaymaral	0,51
Las Ferias	0,50
Unidad Móvil	0,36
Centro de Alto Rendimiento	0,30

Kennedy	0,27
Puente Aranda	0,12
Carvajal	-0,10
Tunal	-0,14

Se encontró que la correlación se encuentra clasificada en tres niveles; los primeros (Carvajal y Tunal) son correlaciones negativas débiles, las estaciones de Puente Aranda, Kennedy, Centro de alto rendimiento, unidad móvil y Las Ferias, se encuentran en un nivel de correlación media y las estaciones de Guaymaral, Usaquén y Suba tienen una correlación positiva considerable, según clasificaciones encontradas en otros estudios (Hernández Sampieri et al., 1991).

Dentro de los motivos por los que probablemente se presenta este comportamiento es por la falta de datos en varias de las estaciones, en otras investigaciones realizadas con imágenes MODIS, se presentan algunas condiciones favorables para obtener una base más amplia de datos para poder realizar análisis estadístico de las imágenes, a diferencia de otros trabajos realizados con el producto MCD19A2 (Pulluquitín Taipe, 2019).

En la localidad de Suba solo se cuenta con una estación, esto no permite obtener la información necesaria para poder determinar de manera clara las áreas con mayor riesgo a la salud por el deterioro de la calidad del aire, pues este punto de monitoreo se encuentra en el extremo noroccidental de la zona urbana de Suba, pero los casos con mayor incidencia en ERAS son los barrios cercanos a las avenidas principales, según información de la Secretaria Distrital de salud en la plataforma de Salud data.

Este trabajo considera que es necesario realizar diferentes procedimientos estadísticos y experimentales donde se puedan comprobar las relaciones entre las imágenes MODIS y los datos de las diferentes redes de monitoreo con las que se pueda trabajar, preferiblemente en lugares con menos cantidad de nubosidad en el día; además, que se deben tener en cuenta otros factores externos ya mencionados como es el caso de la evaporación, los índices de vegetación y el comportamiento del viento en la zona de estudio.

Parte de los procedimientos ejecutados, buscan por medio de herramientas estadísticas generar un método para consolidar la correlación entre los valores de las estaciones de la RMCAB y las imágenes MODIS - MCD19A2 sobre aerosoles, estos procesos han sido planteados en otros trabajos de investigación (Wang et al., 2019) . A diferencia de algunos de ellos, en la ciudad de Bogotá, no se cuenta con la cobertura del sistema AERONET desde el año 2015 dependiendo solo de la base de datos entregados por la RMCAB la cual se cuenta disponible con información histórica desde el año 2016.

6. CONCLUSIONES

Se busca comprobar la correlación que existe entre los datos entregados por las imágenes MODIS – MCD19A2 (AOD) con la información entregada por la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá, esta se verifica por medio de la ecuación de coeficiente de correlación (Anexo 1), donde se puede conocer si existe una regresión lineal o relación directa entre los datos.

Se entrega datos de correlaciones débiles y moderadas, esto por consecuencia de la reducida información con la que se cuenta por parte de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad y las pocas imágenes que contienen registros completos de los aerosoles captados por los satélites Aqua y Terra, por lo que es difícil encontrar una correlación fuerte y directa, es necesario procesar los datos para poder obtener una asociación entre los datos, la información analizada pertenece a registros del año 2017. Los datos trabajados entre PM_{2,5} y el AOD son insuficientes para poder encontrar una correlación considerable o muy fuerte, pues de las estaciones activas en la ciudad en el año 2017, solo 2 presentan correlación positiva considerable, para las otras estaciones se presentan datos variados con cierta correlación débil y media.

Una constante en la lectura de las imágenes satelitales frente a la ubicación de las estaciones de monitoreo son los constantes reportes sin datos, es decir de 12 estaciones, solo se encontraba lectura en las imágenes MODIS - AOD de 6 a 8 estaciones por lo que dificulta tanto el manejo de la información como de las posibilidades de generar coincidencias entre los dos orígenes de los datos.

Para poder obtener un patrón de coincidencia del comportamiento entre las dos fuentes de la información, es necesario aplicar ciertos métodos estadísticos y ubicar un conjunto de datos de las imágenes de MODIS, con la frecuencia necesaria para poder obtener la cantidad de información suficiente con la que se pueda encontrar correlación entre las imágenes AOD de MODIS y los registros entregados por la RMCAB.

Dentro de los procesos ejecutados, se encuentra un patrón de comportamiento entre el promedio hora a hora registrado por las estaciones de monitoreo de calidad del aire RMCAB y las interpretadas por las imágenes MODIS – AOD (Anexos 2 y 3) lo que podría indicar una relación entre el PM_{2,5} y las imágenes registradas por MODIS – AOD.

Al aplicar la herramienta estadística zonales, se observa que, al trabajar con todos los datos de las estaciones, este presentó un incremento en el valor del R^2 , por lo que permite tomar dentro del cálculo, varias áreas cercanas del pixel con diferentes valores, lo que permite identificar el valor promedio de calidad del aire en la zona.

7. RECOMENDACIONES

- Se requiere aumentar el número de estaciones de calidad de aire en la zona urbana de Bogotá D.C. ya que con la existente se cuentan con bastantes áreas sin cobertura, esto ayudaría a identificar de mejor forma, el comportamiento de los contaminantes en el aire de la ciudad y con ellos, complementar la información para las investigaciones con sensores remotos.
- El presente proyecto de investigación puede ser utilizado como apoyo para continuar con las respectivas pruebas para determinar la mejor manera de encontrar la correlación entre las imágenes satelitales MODIS del producto MCD19A2 y la información entregada por las redes de monitoreo de calidad del agua, especialmente para la ciudad de Bogotá.
- Las imágenes generadas por MODIS o cualquier otro producto de percepción remota que tenga la capacidad de detectar aerosoles, puede ser de gran ayuda para monitorear el comportamiento de calidad del aire, pero se requiere más investigación en estas temáticas y que sean adoptadas por las entidades que realizan estudios y seguimientos, en este caso, a la calidad del aire de la ciudad, con el fin de cubrir todas las zonas de Bogotá D.C.
- Es necesario continuar con propuestas de investigación y recolección de datos acerca del comportamiento de este material suspendido en el aire y que afecta la salud de cientos de personas al año en la ciudad de Bogotá, como lo revelan los estudios de caso realizados por la secretaria Distrital de Salud, pues con estas herramientas tecnológicas, se podría comprender de una manera más clara, el comportamiento de la calidad del aire de la ciudad de Bogotá.
- Los productos MODIS podrían ser utilizados como complementos a la lectura de las redes de monitoreo, pues una de sus desventajas es que solo se cuenta con una lectura por día y a veces, día de por medio por parte de los satélites Aqua y Terra, esta no se presenta a la misma hora todos los días, pues tiene algunas fluctuaciones en el horario, lo que también puede estar en contra de las posibles relaciones entre los datos, pues en los minutos de diferencias entre la captura de la imagen y de la toma de la muestra de la estación, se presentan variación en la lectura de los datos, pues factores como el clima, la dirección y velocidad de los vientos o el día/fecha en la que se analiza la información, permite que existan factores que permitan cambie las condiciones de la calidad del aire entre el tiempo transcurrido por la captura de datos de ambas fuentes de información.

- La NASA propone varios métodos para la conversión de los valores de los píxeles de las imágenes, a unidades con las que se miden el $PM_{2,5}$ pero así mismo son conscientes de que los resultados pueden variar según la región donde se lleve a cabo el estudio, por lo que dejan abierta la posibilidad a que los investigadores propongan sus métodos y resultados, para este caso, se utiliza una herramienta de estadísticas zonales, donde se busca promediar los valores de los píxeles en las áreas alrededor de la ubicación de cada estación, si bien, no entrego una correlación considerable, es necesario considerar que la información disponible era relativamente escasa y requiere evaluarse en áreas donde las imágenes MODIS permitan una mejor captura de la información, así como la posibilidad de contar con una red de monitoreo que permita el respectivo análisis de los datos captados en tierra.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aragón, Serna y Solano. (2019). Estudio climatológico de los vientos para la ciudad de Bogotá en el periodo 2010 – 2016. de Universidad libre Sitio web:
- Autor. (2018). Calidad del aire y salud. Organización Mundial de la Salud Sitio web: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Autor. (2021). Índice Bogotano de Calidad del Aire. SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE Sitio web: <http://iboca.ambientebogota.gov.co/index.php>
- Autor. (2021). Prevalencia de sibilancias en adultos mayores de 60 años en Bogotá D.C. Secretaría Distrital de Salud Sitio web: <https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/prevalencia-de-sibilancias-en-adultos-mayores-de-60-anos-en-bogota-d-c>
- Castro Coca, G. (2019). METODOLOGIA PARA DETERMINAR LA CANTIDAD DE MATERIAL PARTICULADO.
- Cristina Linares y Julio Díaz. (2008). Las PM2,5 y su impacto sobre la salud. El caso de la ciudad de Madrid. Revista Ecologista, 35, 32-37. EPA. (2021). Particulate Matter (PM) Pollution. EPA Sitio web: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- Francisco Sacristán Romero. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. Revista AquaTIC, 24, 13 - 41.
- Germán Horacio Rosero, M. C. C. M. C. M. J. E. (2007). Estudio de la caracterización climática de Bogotá. In Estudio de la caracterización climática de Bogotá (pp. 22–25).
- GIOVANNA DEL CARMEN FERNANDEZ ORJUELA. (2021). ¿Qué es el IBOCA? secretaria distrital de Ambiente Sitio web: <http://iboca.ambientebogota.gov.co/publicaciones/175/que-es-el-iboca/>
http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=18241&shelfbrowse_itemnumber=19239
<https://www.ecologistasenaccion.org/17842/que-son-las-pm25-y-como-afectan-a-nuestra-salud/>
- IDEAM. (2005). ESTUDIO DE LA CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE BOGOTÁ Y CUENCA ALTA DEL RÍO TUNJUELO. IDEAM Sitio web: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+C LIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>

- LEONORA ROJAS BRACHO Y VERÓNICA GARIBAY BRAVO. (2003). Las partículas suspendidas, Aero partículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer algo? Gaceta Ecológica, 69, 29 - 44.
- Linares Gil, C. (2008). Qué son las PM2,5 y cómo afectan a nuestra salud. Revista Ecologista, 35, 32–37.
- Lyapustin, A., Wang, Y. (2018). MCD19A1 MODIS / Terra + Aqua Superficie terrestre BRDF Daily L2G Global 500m y 1km SIN Grid V006 [Conjunto de datos]. Procesos terrestres EOSDIS de la NASA DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD19A1.006>
- Lyapustin, P., & Wang, Y. (2018). MODIS Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) Data User's Guide Collection 6 (ver. of June 2018) Version 2.0.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Contaminación Atmosférica. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Sitio web: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-del-aire/contaminacion-atmosferica>
- Morales Vallejo Pedro. (2011). Correlación y regresión, simple y múltiple. <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/Regresion.pdf>
- Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. https://www.who.int/phe/health_topics/AQG_spanish.pdf
- Pawan Gupta, and Melanie Follette-Cook. (2017). Conjuntos de datos anuales de PM2.5 obtenidos por satélites en apoyo de los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU. NASA Sitio web: <http://arset.gsfc.nasa.gov>
- Rolle y Farrow. (2021). La niñez, la salud y la calidad del aire en el suroccidente de Bogotá. Greenpeace Sitio web: <https://www.greenpeace.org/colombia/noticia/uncategorized/la-ciudadania-desconoce-el-aire-que-se-respira-al-transitar-por-bogota/>
- Víctor Puente. (2007). Teledetección: la técnica de la observación remota. Xataka Web Media Sitio web: <https://www.xatakaciencia.com/tecnologia/teledeteccion-la-tecnica-de-la-observacion-remota>
- Wang, Q., Zeng, Q., Tao, J., Sun, L., Zhang, L., Gu, T., Wang, Z., & Chen, L. (2019). Estimating PM 2.5 concentrations based on MODIS AOD and NAQPMS data over beijing–tianjin–hebei. Sensors (Switzerland), 19(5). <https://doi.org/10.3390/s19051207>

ANEXOS

Anexos 1. Ecuación de Correlación de Pearson

Ecuación 1. Coeficiente de correlación de Pearson para una muestra

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Este análisis se realiza aplicando estos valores donde:

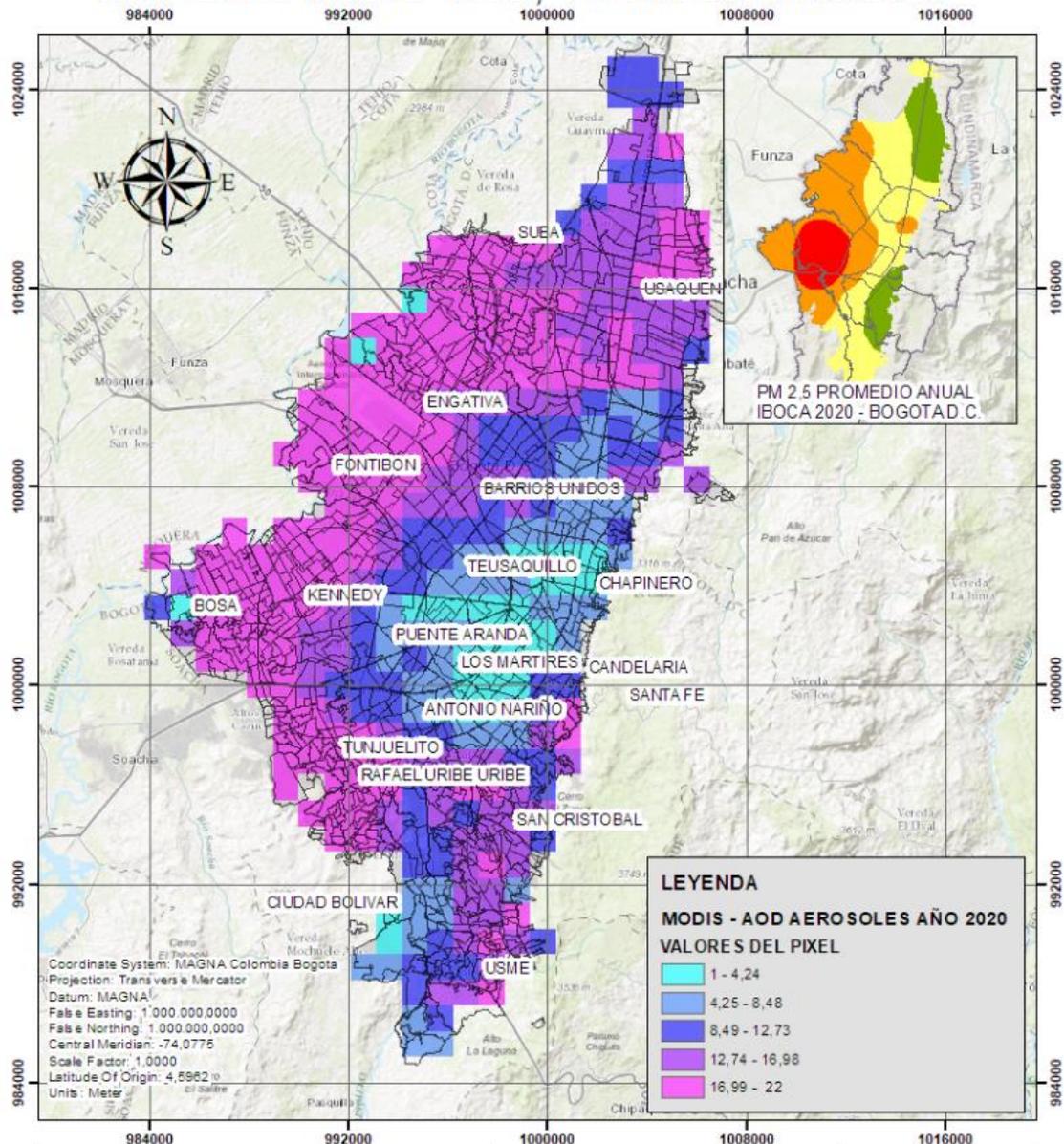
n : es el tamaño de la muestra

x_i, y_i : son los puntos muestrales individuales

$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$: Es la media muestral.

Anexos 2. Cartografía Calidad del aire RMCAB – AOD

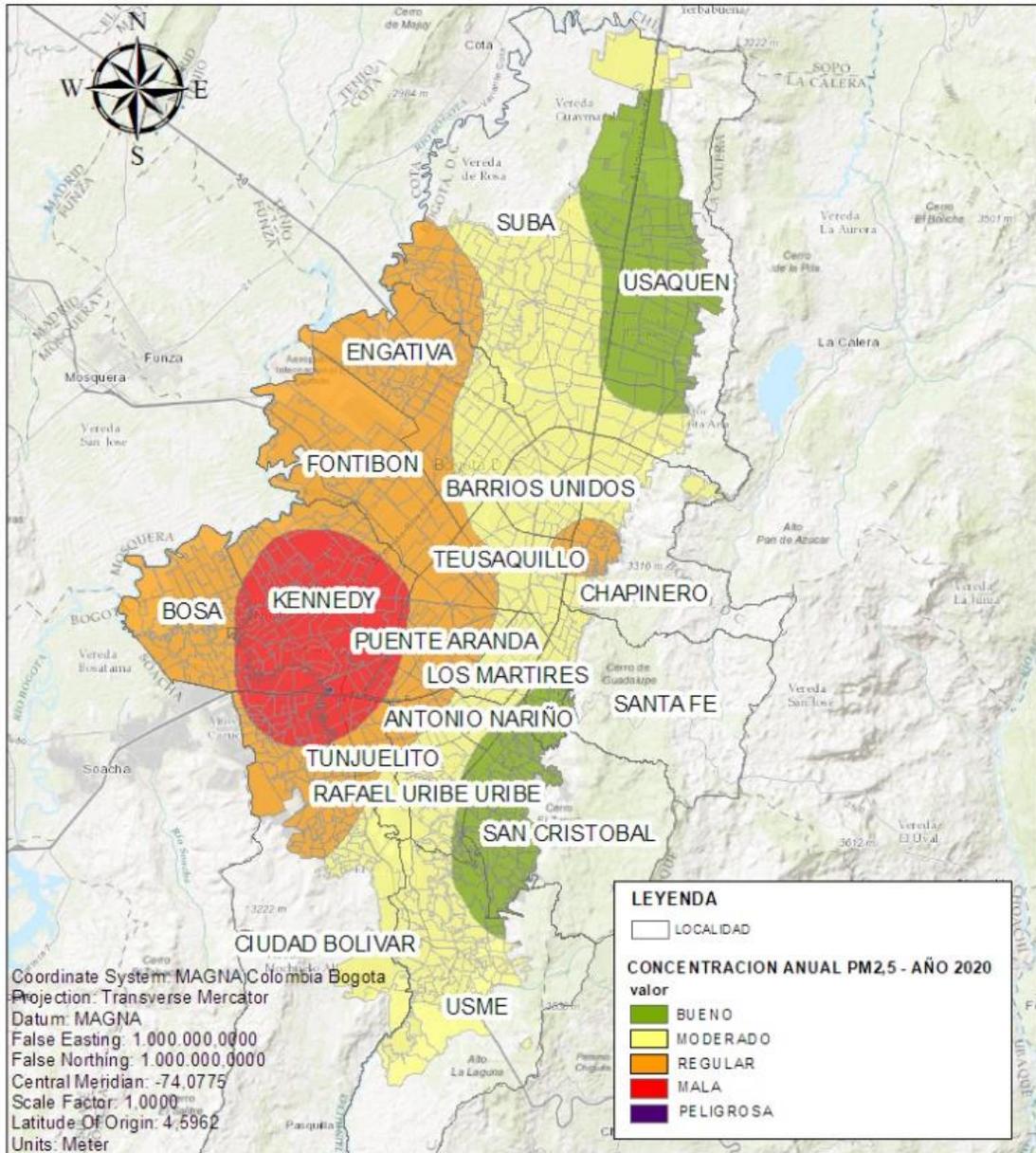
IMAGENES MODIS - AOD, PROMEDIO AÑO 2020



	ESCALA: 1:200.000	MAPA No 1
ELABORADO POR: Juan David Pulido	FUENTE: NASA - USGS	

Anexos 3. Imágenes estaciones de monitoreo RMCAB.

CONCENTRACION PM 2,5 HORARIO HISTORICO - 2020



	<p>ESCALA: 1:200.000</p>	<p>PLANO No 1</p>
<p>ELABORADO POR: Juan David Pulido</p>	<p>FUENTE: Secretaria Distrital de Ambiente - RMCAB</p>	