**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS**

**ESCUELA DE CIENCIAS GEOGRÁFICAS**

**CARRERA DE CIENCIAS GEOGRAFICAS Y MEDIO AMBIENTE**

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN CIENCIAS GEOGRÁFICAS Y MEDIO AMBIENTE**

# "ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LOS CONTAMINANTES CRITERIO ATMOSFÉRICOS EN LA ZONA URBANA DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES PARA LOS AÑOS 2013, 2014 Y 2015"

**Nombre: TOBAR ZANIPATTINI LUIS DANIEL**

**Dirección: ECHEVERRÍA LLUMIPANTA NEPTALÍ ARMANDO**

**QUITO 2018**

## DEDICATORIA

Dedicada a mis madres, mis amigos y mi familia.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a todos mis profesores y profesoras de la carrera de Ciencias Geográficas y Medio Ambiente, los cuales me guiaron en todo este camino. A mi director de tesis Ing. Armando Echeverría por su tiempo y paciencia, y a mis lectores Olga Mayorga y Jorge Campaña por su apertura y entrega a la realización de la presente disertación.

A mi madre Gina Zanipattini por todo el tiempo que pasó a mi lado y por todas sus enseñanzas, a mi madre Jenny Zanipattini por darme la vida, a mis abuelos María Esther y Victor Hugo que nunca me dejaron dar el brazo a torcer, a mis hermanos Sebastián y Mahatma que siempre creyeron en mí, a mi padre, a mi hermana, a mis tíos, tías y primos que siempre me apoyan en todos los nuevos retos. A mi Ruffo, y en su memoria, por el tiempo que me acompañó.

Agradezco a mis mejores amigos Pablo Andrés, Darwin, William, Diana, Mishell y Mateo que de igual manera hicieron suyo el reto de finalizar éste trabajo. Mis queridos compañeros de clases y de vida: Samuel, Roberto, Kevin, Erick, Paola, Gabriela G., Gabriela O., Alejandra I., Alejandra L., Liseth, Vanessa, Renata, y aquellos sin los cuales no hubiera podido sobrellevar la universidad: Daniel, Bernarda y Karla. A las maravillosas personas que conocí fuera de la universidad y se volvieron parte importante de mi vida: Esteban y Guisella a los que puedo llamar con orgullo amigos; y a todas las personas nuevas y antiguas en mi vida, quienes con unas sonrisas hicieron más llevadero todo el esfuerzo.

Agradezco finalmente a la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito por su apertura en el traspaso de información y pronta colaboración, junto con los estudiantes de la ESPE: David, Michelle y Katherine, quienes aportaron en el proceso de realización de esta investigación.

**TABLA DE CONTENIDOS**

DEDICATORIA ..... ii
AGRADECIMIENTOS ..... iii
TABLA DE CONTENIDOS ..... iv
TABLA DE ILUSTRACIONES: ..... viii
RESUMEN ..... xi
CAPÍTULO I ..... 1
1. ANTECEDENTES ..... 1
2. JUSTIFICACIÓN ..... 4
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 6
4. ZONA DE ESTUDIO ..... 7
5. OBJETIVOS ..... 8
5.1. Objetivo general. ..... 8
5.2. Objetivos específicos. ..... 8
6. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN ..... 9
CAPÍTULO II ..... 10
7. MARCO CONCEPTUAL ..... 10
8. MARCO TEÓRICO ..... 14
8.1. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL ..... 14
8.1.1. Contaminación atmosférica ..... 14
8.1.2. Clasificación y fuentes de contaminantes atmosféricos ..... 14
8.1.3. Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire Ambiente (NECA) ..... 16
8.1.4. Índice Quiteño de la Calidad del Aire (IQCA) ..... 16
8.1.5. Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ) ..... 17
8.1.6. Contaminantes criterio atmosféricos ..... 21
8.2. ESTADÍSTICA ..... 28
8.2.1. Tipos de estadística ..... 28
8.2.2. Conceptualización básica de estadística ..... 28
8.2.3. Tipos de variables ..... 29
8.2.4. Cálculos estadísticos para descripción de datos ..... 30
8.2.5. Regla empírica ..... 32
8.2.6. Teorema del límite central ..... 33

8.2.7. Control estadístico de procesos (CEP) ..... 33
8.2.8. Tipos de variables en la investigación ..... 34
8.2.9. Regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) ..... 35
8.2.10. Análisis de regresión múltiple ..... 35
8.2.11. Error medio cuadrático (RMSE) ..... 38
8.2.12. Geoestadística ..... 39
8.2.13. Software SPSS (Versión 20) ..... 39
8.2.14. Software R (Versión 3.5.1) ..... 40
8.3. TELEDETECCIÓN ESPACIAL ..... 41
8.3.1. Elementos de la teledetección ..... 41
8.3.2. Fundamentos de la captura de imágenes en teledetección espacial ..... 43
8.3.3. Espectro electro-magnético ..... 43
8.3.4. Leyes de la radiación electromagnética ..... 46
8.3.5. Interacciones entre la radiación electromagnética y la atmósfera ..... 47
8.3.6. Tipos de sensores ..... 48
8.3.7. Ventajas de la observación espacial ..... 51
8.3.8. Resolución de los sistemas sensores ..... 52
8.3.9. Misión Landsat ..... 56
8.3.10. Imágenes satelitales ..... 58
8.3.11. Tratamiento digital de imágenes ..... 61
8.3.12. Cálculo de índices ambientales ..... 68
8.3.13. Software ENVI (Versión 5.1) ..... 73
8.4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: ..... 74
8.4.1. Tipos de datos ..... 74
8.4.2. Cartografía ..... 74
8.4.3. ArcGIS (Versión 10.4.1) ..... 76
9. MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN ..... 77
CAPÍTULO III ..... 78
10. RECOPILACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES ..... 78
11. PRE-PROCESAMIENTO ..... 82
11.1. Corrección geométrica y topográfica ..... 82
11.2. Corrección radiométrica ..... 83
11.3. Corrección atmosférica ..... 84

12. CÁLCULO DE ÍNDICES AMBIENTALES ..... 88
12.1. Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) ..... 88
12.2. Cálculo de la proporción de la vegetación (PV) ..... 89
12.3. Cálculo de la emisividad (ε) ..... 90
12.4. Cálculo de la temperatura de brillo (TB) ..... 91
12.5. Cálculo de la temperatura superficial (LST) ..... 92
12.6. Cálculo del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) ..... 93
12.7. Cálculo del índice de diferencia normalizada de suelos (NSI) ..... 93
13. RELACIÓN ESPACIAL ENTRE ÍNDICES AMBIENTALES Y PUNTOS DE MEDICIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS ..... 94
CAPÍTULO IV ..... 97
14. RECOPILACIÓN DE DATOS DE CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO ATMOSFÉRICOS ..... 97
15. ANÁLISIS PREVIO DE DATOS ..... 97
16. VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN ..... 103
CAPÍTULO V ..... 108
17. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE ..... 108
18. SELECCIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO ATMOSFÉRICOS Y TEMPORALIDAD ..... 111
CAPÍTULO VI ..... 115
19. FORMULACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN FUNCIÓN DE ÍNDICES AMBIENTALES ..... 115
20. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE DATOS ..... 117
21. GENERACIÓN DE MAPAS POR INTERPOLACIÓN ..... 119
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 123
22. ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... 123
24. CONCLUSIONES ..... 131
25. RECOMENDACIONES ..... 133
BIBLIOGRAFÍA ..... 134
ANEXOS ..... I
1. Zona urbana del DMQ – estaciones REMMAQ ..... I
2. Parroquias urbanas DMQ – zona de estudio ..... II
3. Solicitud de datos – Secretaría de Ambiente ..... III

4. Carta de compromiso – Secretaría de Ambiente ..... IV
5. Concentración anual de contaminantes por estación ..... V
6. Concentración mensual de contaminantes por estación ..... VI
7. Concentración diaria de contaminantes por estación (mes de julio) ..... VIII
8. Concentración horaria de contaminantes por estación (en los días de las imágenes satelitales) ..... X
9. Gráficos de concentraciones de contaminantes criterio atmosféricos validados..... XII
10. Índice de correlación bivariada de Pearson para todos los datos –SPSS ..... XIV
11. Script base de regresión lineal múltiple – RStudio (Ejemplo $O_3$) ..... XXI
12. Tabla de $R^2$ y $R^2_{adj}$ para contaminantes criterio atmosférico ..... XXII
13. Script base de cálculo de RMSE – RStudio (Ejemplo $SO_2$) ..... XXIII
14. Mapas de interpolación IDW para ozono troposférico y dióxido de azufre (07, 10 y 13 de julio de 2013, 2014 y 2015 respectivamente) ..... XXIV

**TABLA DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1: Límites numéricos de cada categoría del IQCA ([µg/m$^3$]). ..... 17
Ilustración 2: Ubicación de las estaciones de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito. ..... 18
Ilustración 3: Métodos de medida, marcas y ubicación de los equipos de medición de contaminantes atmosféricos - RAUCO. ..... 19
Ilustración 4: Métodos de medida, marcas y ubicación de los equipos de mediciones meteorológicas - REMET. ..... 21
Ilustración 5: Porcentaje de datos válidos capturados – REMMAQ. ..... 21
Ilustración 6: Descripción de los principales contaminantes atmosféricos químicos y sus fuentes. ..... 22
Ilustración 7: Representación de distribución normal (Campana de Gauss). ..... 32
Ilustración 8: Ejemplo de cuadro ANOVA para regresión lineal múltiple. ..... 36
Ilustración 9: Sistema de teledetección. ..... 43
Ilustración 10: Onda electromagnética. ..... 44
Ilustración 11: Espectro electromagnético. ..... 46
Ilustración 12: Radiación directa, difusa y reflejada. ..... 48
Ilustración 13: Sensor de barrido. ..... 50
Ilustración 14: Sensor de empuje ..... 51
Ilustración 15: Diferentes resoluciones espaciales de la misma zona en diferentes imágenes. ..... 53
Ilustración 16: Resolución espectral del sensor OLI/TIRS de la misión Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7. ..... 54
Ilustración 17: Resolución Radiométrica de una imagen. ..... 54
Ilustración 18: Modelo de exploración Landsat en previas misiones. ..... 55
Ilustración 19: Clasificación orbital de satélites. ..... 56
Ilustración 20: Distribución y clasificación de datos - imagen satelital digital. ..... 59
Ilustración 21: Corrección geométrica de una imagen. ..... 62
Ilustración 22: Atmospheric Correction Parameter Calculator. ..... 67
Ilustración 23: Diagrama e flujo para el cálculo de LST. ..... 70
Ilustración 24: Visualizador EarthExplorer – “Search Criteria”. ..... 79
Ilustración 25: Visualizador EarthExplorer – Data Sets. Fuente: ..... 79

Ilustración 26: Máscaras “Área de Estudio” (verde) y “Área de Corrección” (Roja). ..... 81
Ilustración 27: Comparación de capacidades visuales entre imágenes. ..... 81
Ilustración 28: Imagen satelital 2015/07/13 - comparación Geométrica y Topográfica. .... 83
Ilustración 29: Imágenes combinadas multiespectrales y enmascaramiento. ..... 84
Ilustración 30: Cálculo de radiancia y reflectancia - ENVI 5.1. ..... 84
Ilustración 31: Herramienta “Compute Statistics” – Histograma básico de imagen satelital. ..... 85
Ilustración 32: Herramienta Dark Subtraction – Corrección Atmosférica OLI. ..... 85
Ilustración 33: Datos resultantes en el “Atmospheric Correction Parameter Calculator”... 87
Ilustración 34: Herramienta “Band Math” - Corrección Atmosférica TIRS. ..... 88
Ilustración 35: Cálculo de NDVI - bandas del sensor OLI. ..... 89
Ilustración 36: Cálculo Pv - OLI ..... 89
Ilustración 37: Cálculo emisividad – OLI ..... 90
Ilustración 38: Emisividad - Raster e Histograma. ..... 90
Ilustración 39: Cálculo de TB - TIRS. ..... 91
Ilustración 40: TB en grados Celsius - raster. ..... 92
Ilustración 41: Cálculo LST - OLI/TIRS. ..... 92
Ilustración 42: LST en celcius - Raster e Histograma. ..... 93
Ilustración 43: Cálculo SAVI - OLI - Raster. ..... 93
Ilustración 44: Cálculo NSI - OLI - Raster. ..... 94
Ilustración 45: TB, LST, NDVI, SAVI y NSI formato tiff - AcrGIS 10.4.1. ..... 94
Ilustración 46: Herramienta “Project” - ArcGIS 10.4.1. ..... 95
Ilustración 47: Herramienta “Extract Values to Point” e “Intersect” - ArcGIS. ..... 95
Ilustración 48: Análisis de datos anual - ejemplo CO. ..... 100
Ilustración 49: Análisis de datos mensual - ejemplo CO. ..... 101
Ilustración 50: Análisis de datos diario - ejemplo CO. ..... 102
Ilustración 51: Análisis de datos horario - ejemplo CO. ..... 103
Ilustración 52: Cálculo y ejemplo de reemplazo de datos –$O_3$. ..... 104
Ilustración 53: Concentraciones de CO por estación - 07/07/13. ..... 106
Ilustración 54: Matriz de datos conjunta SPSS. ..... 109
Ilustración 55: Importación de datos RStudio. ..... 110
Ilustración 56: Script y parámetros estadísticos calculados por modelo. ..... 111

Ilustración 57: Gráficos de modelo predictivo $SO_2$. 1- Valores de predicción versus residuales. 2- Valores teóricos versus residual. ..... 113
Ilustración 58: Gráficos de modelo predictivo $O_3$. 3- Valores de predicción versus residuales. 4- Valores teóricos versus residual. ..... 114
Ilustración 59: Herramienta “Create Fishnet” - ArcGIS 10.4.1. ..... 115
Ilustración 60: Herramientas “Extract Values to Point” e “Intesect” - ArcGIS 10.4.1. .... 116
Ilustración 61: Creación de campos y herramienta “Field Calculator” - ArcGIS 10.4.1. . 116
Ilustración 62: Parámetros estadísticos para valores de modelados de $O_3$. ..... 118
Ilustración 63: Parámetros estadísticos para valores de modelados de $SO_2$. ..... 118
Ilustración 64: Herramienta “IDW” - ArcGIS 10.4.1. ..... 119
Ilustración 65: Herramienta “Extract by Mask”, formato batch - ArcGIS 10.4.1. ..... 119
Ilustración 66: Herramienta “Extract Values to Points”, formato batch - ArcGIS 10.4.1. 120
Ilustración 67: Mapas de interpolación IDW en modelamiento de $O_3$. a) 07/07/13, b) 10/07/14, c) 13/07/15. ..... 121
Ilustración 68: Mapas de interpolación IDW en modelamiento de $SO_2$. d) 07/07/13, e) 10/07/14, f) 13/07/15. ..... 122
Ilustración 69: Histograma de datos estimados - $O_3$. ..... 125
Ilustración 70: Índice de correlación de Pearson - variables del modelo $O_3$. ..... 126
Ilustración 71: Sectores de mayor concentración de $O_3$ - IQCA. ..... 127
Ilustración 72: Histograma de datos estimados - $SO_2$. ..... 129
Ilustración 73: Índice de correlación de Pearson - variables del modelo $SO_2$. ..... 129
Ilustración 74: Sectores de mayor concentración de $SO_2$ - IQCA. ..... 130

**RESUMEN**

Por medio de análisis geoestadísticos, la presente disertación determinó modelos matemáticos de dispersión de los compuestos presentes en aire: dióxido de azufre ($SO_2$) y el ozono troposférico ($O_3$), referidos en la lista nacional de contaminantes criterio atmosféricos, mediante una densificación de información, y para las parroquias urbanas del Distrito Metropolitano de Quito en tres temporalidades correspondientes a los días 07, 10 y 13 del mes de julio de los años 2013, 2014 y 2015 respectivamente.

El proceso realizado consto de cuatro partes, siendo la primera referente al cálculo de parámetros meteorológicos de temperatura superficial terrestre, temperatura de brillo e índices ambientales como: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de proporción de la vegetación (PV), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), e índice de diferencia normalizada de suelos (NSI), con sus respectivas correcciones necesarias en imágenes satelitales de uso libre pertenecientes a la misión Landsat 8; por otro lado, la recopilación, análisis y validación de la información de concentraciones de los contaminantes criterio atmosféricos, proporcionados por la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito; de igual manera, el cálculo de la correlación estadística entre los conjuntos de información mencionados por ecuaciones de regresión lineal múltiple que buscó densificar los datos de las concentraciones de contaminantes en función de los parámetros calculados por las imágenes satelitales; y finalmente, la generación de mapas interpolados con los nuevos datos para las temporalidades escogidas.

Los modelos generados resultantes fueron ecuaciones de predicción de ozono troposférico con un error medio cuadrático de ± 7.05 [µg/m3] y de dióxido de carbono con un error medio cuadrático de ± 0.65 [µg/m3], estadísticamente representativos en menor grado del 50% debido a los parámetros escogidos, más con concordancia hacia investigaciones similares.

**Palabras clave**: ozono troposférico, dióxido de azufre, contaminantes criterio atmosféricos, imágenes satelitales, geoestadística, regresión lineal múltiple, densificación de datos.

# CAPÍTULO I
# INTRODUCCIÓN

## 1. ANTECEDENTES

El comportamiento de diferentes contaminantes en la atmósfera ha sido objeto de interés en numerosos estudios los cuales pretenden recopilar datos de sus concentraciones, analizarlos y modelar su comportamiento para poder predecir zonas propensas a sufrir de sus efectos adversos en ámbitos como la salud humana, la eficiencia industrial o el deterioro de bienes y servicios. Por todo lo anterior, la presente disertación expuso una serie de documentos en los cuales basó su metodología de trabajo, mismos que estuvieron encaminados a objetivos similares o de los cuales se puedo inferir una relación con el propósito expuesto.

Primeramente Burgos & Copo (2017), en su estudio deniminado "Estimación de la Concentración de Ozono Troposférico ($O_3$), Mediante Análisis Geoespacial de Imágenes Satelitales y Mínimos Cuadrados Parciales (PLS), para las parroquias urbanas del Cantón Quito", realizaron el análisis del ozono troposférico como contaminante de aire, bajo datos proporcionados por la red metropolitana de monitoreo atmosférico del Distrito Metropolitano de Quito e imágenes satelitales de la misión Landsat 8, con análisis estadístico de mínimos cuadrados parciales entre el año 2013 y 2015 . La investigación resultó en modelos predictivos del contaminante mediante la utilización de software especializados como ENVI, ArcGIS y R (Burgos & Copo, 2017).

Por otro lado, se tomó el estudio denominado "Correlación entre la fragmentación ambiental y degradación ambiental del manglar con la reducción en las capturas de Pinchagua (Opisthonema Spp)" realizado por Velasco (2017), donde se indagó el proceso de degradación y fragmentación ambiental en los manglares de la isla Puná en relación con la captura de la Pinchagua para los años 2002 y 2015. La metodología consistió en la designación de cinco áreas de estudio bajo la recopilación y tratamiento de imágenes de los satélites QuickBird, RapidEye, WorldView-2 y GeoEye-1, y cálculo de parámetros ambientales como NDVI. De igual manera que el estudio anterior, bajo la utilización de software especializados como ArcGIS, ATCOR e IBM SPSS, el estudio derivó en la

determinación de una correlación nula entre la fragmentación y degradación del manglar con la disminución en las capturas de la especie mencionada (Velasco, 2017).

Igualmente, se basó en la investigación "Modelación de dispersión espacial de contaminantes del aire en la ciudad de Cuenca" de Marcelo Astudillo Romero (2012), realizada en conjunto con el Centro de Estudios Ambientales (CEA) y la Municipalidad de Cuenca, que resultó en un estudio de la capacidad de modelamiento de la dispersión de contaminantes criterio atmosféricos. Bajo simulaciones de datos meteorológicos y fotoquímicos validados por puntos reales de medición, el estudio realizó modelos de comportamiento de ozono, y concluyó que debido a problemas por la falta de disponibilidad de inventarios de emisiones es necesario que se establezcan otras metodologías de obtención de datos de fenómenos meteorológicos así como de emisión de contaminantes en el aire (Astudillo, 2012).

De igual manera, el estudio "Análisis de la concentración de contaminantes atmosféricos de origen primario y mixto en relación a la variación de las condiciones meteorológicas en el Distrito Metropolitano de Quito" realizado por Paul Bazante (2015), interpretó las dinámicas de contaminantes atmosféricos como el monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y material particulado menor a 2.5 micras, bajo variables meteorológicas en el Distrito Metropolitano de Quito entre los años 2006 y 2012. Del estudio se destaca que la dispersión de los contaminantes cambia de acuerdo a una interacción compleja de variables meteorológicas, con resultados en la reducción de concentraciones de $NO_2$ bajo condiciones de radiación solar y destacando varios errores en las mediciones por parte de la estación "Belisario" (Bazante, 2015).

Finalmente, el estudio "Modelación de la dispersión de las emisiones de $SO_2$ y $NO_x$ de las termoeléctricas de la ciudad de Quito en el Software Calpuff" de Soraya Ruiz (2013), representó de igual manera la dispersión de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Quito causado por las empresas termoeléctricas, enfatizándose en sus interrelaciones y analizando estadísticamente los resultados. Entre los puntos destacables concernientes a la presente disertación, cabe mencionar la importancia de la disponibilidad de información en el Distrito Metropolitano de Quito, y que las concentraciones de $NO_2$ y $SO_2$ son más bajas durante las épocas de "verano", además la necesidad que presenta el Programa Nacional de

Reducción de Emisiones, al requerir más modelos de dispersión de contaminantes para optimizar su campo de acción en base a la evaluación de impactos ambientales (Ruiz S. E., 2013).

## 2. JUSTIFICACIÓN

La disertación se presenta como una iniciativa hacia mejorar el aprovechamiento de la cantidad limitada de datos cuantitativos de concentraciones de contaminantes criterio atmosféricos en el Distrito Metropolitano de Quito, mismos que son registrados por estaciones de monitoreo pertenecientes a la Secretaría de Ambiente. Para esto, el estudio se valió de información derivada de imágenes satelitales disponibles en la zona de estudio, las cuales aportaron a un proceso de densificación de información, es decir, el cálculo de posibles concentraciones de contaminantes comunes en el aire por medio de índices ambientales.

Partiendo por un contexto legal, la investigación aportó al cumplimiento de postulados como lo expuesto en: la Constitución de la República del Ecuador (2008), que en su art. 14 reconoce el "derecho de la población a vivir en un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado[1]", y en su art. 276, numeral 4, sobre los "objetivos del régimen de desarrollo", expone la necesidad de "recuperar y conservar el medio ambiente, manteniendo un ambiente sano y sustentable" (Consitución de la República del Ecuador, 2008); el Objetivo de Desarrollo Sostenible N° 11, el cual busca "lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles" basado en la capacidad de los asentamientos humanos de afrontar sus necesidades junto a un sentido de cuidado hacia el medio ambiente y sus recursos (ONU, s.f.); el Plan Nacional de Desarrollo 2017 – 2021, desarrollado por la SENPLADES[2] (2017), que en su Objetivo 3 "Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones", expone políticas como "3.1 Conservar, recuperar y regular el aprovechamiento del patrimonio natural y social, rural y urbano (…) que asegure y precautele los derechos de las presentes y futuras generaciones" y "3.4 Promover buenas prácticas que aporten a la reducción de la contaminación, la conservación, la mitigación y la adaptación a los efectos del cambio climático, e impulsar las mismas en el ámbito global" (Plan Nacional de Desarrollo 2017 - 2021. Toda una Vida., 22); la Ley de Gestión Ambiental, publicada en el Registro Oficial Suplemento N° 418 del 10 de septiembre de 2004, que en su art. 9 reconoce como competencias de ministerios la

[1] Espacio donde las condiciones del entorno definirán la buena salud y bienestar de sus pobladores (Consitución de la República del Ecuador, 2008).

[2] Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo.

verificación del cumplimiento de las normas de calidad del aire; el Acuerdo Ministerial 097-A, que reemplaza varios anexos del Texto Unificado de Legislación Ambiental en el cual se encuentran los valores máximos de concentraciones de contaminantes permitidos a nivel nacional; y en la Ordenanza Metropolitana N° 404, Reformatoria de la Ordenanza Metropolitana No. 213, Sustitutiva Del Título V, "Del Medio Ambiente", que en su art. 11.380.6, sobre la Autoridad Ambiental Distrital, reconociendo a la Autoridad Ambiental de Aplicación Responsable la competencia de formular y difundir la política local de gestión ambiental integral para la prevención y control de la contaminación de los recursos como el aire, siendo complementaria al análisis de concentraciones.

En el cumplimiento de lo expuesto se utilizó bases de datos de la Secretaría de Ambiente de Quito (REMMAQ[3]), elegidos por su confiabilidad en la toma y validación de la información, pero que poseen una espacialidad limitada por la necesidad de más puntos de medición con capacidades óptimas. Asimismo, se empleó tecnologías geoespaciales como los son las imágenes satelitales, en este caso de la misión Landsat 8, que por su multiespectralidad, disponibilidad y resolución espacial, permitieron la obtención de valores atmosféricos de temperatura superficial, temperatura de brillo y varios índices ambientales que sirvieron al propósito central de la disertación.

El interés investigativo por tanto se centró en la necesidad de aumentar la cantidad de datos cuantitativos de concentraciones de contaminantes primarios o criterio atmosféricos para en un futuro poder generar modelos predictivos confiables que posean una base sólida de información cuantitativa validada estadísticamente y que sean de fácil reproducción.

[3] Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito.

## 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las crecientes fuentes de contaminación atmosférica en zonas urbanas ha generado preocupación sobre el grado de exposición de los pobladores hacia los efectos adversos de dicha polución, junto con sus posibles repercusiones no solo a nivel de la salud, sino también en ámbitos económicos afectados por el grado de concentración de los contaminantes sobre zonas habitadas o habitables, de producción agrícola o industrial, y sobre ecosistemas vulnerables.

La convergencia de factores como: la creciente incidencia de incendios en épocas secas, el incremento del parque automotor público y privado, y las actividades antrópicas de diferente índole, evidencian una necesidad de modelos de concentraciones de contaminantes atmosféricos, mismos que requieren de la mayor cantidad de datos cuantitativos disponibles para realizar análisis precisos y confiables. Actualmente los valores tomados dentro de las zonas urbanas por parte de la Secretaría del Ambiente en su REMMAQ, no permiten dicho estudio debido a su limitación espacial basada en la cantidad de estaciones adecuadas; motivo por el cual se propone la combinación de tecnologías geoespaciales, como lo son los sensores remotos y procesos geoestadísticos en sistemas de información geográfica, para tener una mejor comprensión espacial del comportamiento de los polucionantes, generando información de fácil acceso e interpretación como mapas, donde que podrán identificar zonas vulnerables a su acumulación, apoyando adyacentemente a sistemas más eficientes de salud ambiental, aprovechamiento territorial o ubicación de servicios de salud pública en puntos vulnerables.

## 4. ZONA DE ESTUDIO

La disertación se limitó a zonas urbanas del Distrito Metropolitano de Quito en la temporalidad de julio de los años 2013, 2014 y 2015, debido a que dicho mes es un punto medio de la denominada época seca (estiaje), correspondiente a los meses de junio hasta noviembre, y misma que se caracteriza por una alta incidencia de incendios, escasez de precipitaciones, fuertes vientos y altas temperaturas.

Asimismo, la zona de estudio solo tomó en cuenta las parroquias categorizadas como urbanas por el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (ver Anexo 1 y 2), que por su relevancia en densidad poblacional, presentaron la mayor cantidad de afectaciones a la salud por exposición a los contaminantes mencionados.

Por último, los datos estuvieron limitados por: los disponibles para la temporalidad escogida tomados por la REMMAQ, que cuenta con 9 estaciones remotas de monitoreo meteorológico y de concentración de contaminantes en el aire que son Belisario, Carapungo, Centro, Cotocollao, El Camal, Guamaní, Jipijapa, Los Chillos y Tumbaco, en tanto se encuentren dentro de los límites urbanos designados (ver Anexo 2); y de igual importancia, imágenes satelitales de uso libre de la misión Landsat 8 en base a su disponibilidad temporal y capacidad de visualización del área de estudio.

# 5. OBJETIVOS

## 5.1. Objetivo general.

Determinar el comportamiento de los contaminantes criterio atmosféricos con mayor correlación hacia los parámetros meteorológicos de temperatura superficial terrestre, temperatura de brillo y parámetros ambientales derivados de las imágenes satelitales, todo en la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito, en el mes de julio de los años 2013, 2014 y 2015, y mediante la aplicación de tecnologías geoespaciales.

## 5.2. Objetivos específicos.

- Calcular datos de temperatura superficial terrestre, temperatura de brillo e índices ambientales derivados de imágenes satelitales de la misión Landsat 8 para el mes de julio de 2013, 2014 y 2015 en la zona urbana del DMQ[4].

- Recopilar, analizar y validar datos de la concentración de contaminantes criterio atmosféricos proporcionados por la REMMAQ, para el mes de julio del 2013, 2014 y 2015 en la zona urbana del DMQ.

- Calcular la correlación estadística entre los datos de tecnologías geoespaciales y los valores alfa-numéricos de la REMMAQ.

- Generar mapas de interpolación de los contaminantes criterio atmosféricos de la mayor correlación estadística con los índices ambientales y meteorológicos, bajo la utilización de sistemas de información geográfica para el mes de julio del 2013, 2014 y 2015 en la zona urbana del DMQ.

[4] Distrito Metropolitano de Quito.

## 6. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Qué disponibilidad de información geoespacial (temperatura superficial, temperatura de brillo e índices ambientales) existe para la zona urbana del DMQ por imágenes satelitales Landsat 8 en la temporalidad seleccionada?

- ¿Qué disponibilidad de información alfa-numérica en concentración de contaminantes criterio atmosféricos existe para la zona urbana del DMQ, que haya sido recopilada de la REMMAQ, en la temporalidad seleccionada?

- ¿Cuál es la correlación estadística entre las variables geoespaciales y los valores alfa-numéricos de concentraciones de contaminantes criterio atmosféricos?

- ¿Qué método de interpolación posee un mejor ajuste al comportamiento de los contaminantes criterio atmosféricos a analizar?

# CAPÍTULO II
# MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

## 7. MARCO CONCEPTUAL

- **Absorvidad (α):** Unidad adimensional, es la "relación entre el flujo incidente y el absorbido por una superficie" (Chuvieco, 2000).

- **Ángulo solar zenith:** Es el "ángulo complementario de observación" (Ariza, 2013).

- **Ángulo sólido (Ω):** Medido en estéro radianes [sr], es el ángulo tridimensional referente a la porción completa de energía transmitida (Chuvieco, 2000).

- **Cirros:** Nubes de aspecto fibroso o con filamentos, delgadas y compuestas por agua cristalizada (Universidad Tecnológica de Monterrey, 2018).

- **Constante de Boltzmann:** Relación entre la temperatura absoluta y la energía, su representación numérica es $1.38 * 10^{-23}$ [$W\ s^2\ K^{-1}$] (Oswaldo, 2010).

- **Constante de Planck:** Relaciones entre la energía y frecuencia relacionadas a una partícula elemental (cuanto), y numéricamente equivale a $6.626 * 10^{-34}$ [$W\ s^2$] (Escobar, s.f.).

- **Constante de Stefan-Boltzmann:** Cantidad de energía que puede emitir un cuerpo negro por tiempo y por área, equivale a $5.67 * 10^{-8}$ [$W\ s^{-2}\ K^{-4}$] (Romero V. , 2010).

- **Contaminación fotoquímica:** Interacción entre elementos con capacidad de oxidación (principalmente contaminantes primarios) presentes en la atmósfera y la radiación solar (Contreras, García, & Icaza, 2013).

- **Corriente posibilista geográfica**: Desarrollada por Vidal de la Blache en 1834, establece el enfoque de la relación entre el medio ambiente y el hombre, donde se

toma al ser humano como agente geográfico, es decir, que este posee la capacidad de modificar su entorno y, al mismo tiempo, elegir entre diversas opciones basadas en el mejoramiento de sus técnicas de aprovechamiento (Delgado, 2006).

- **Cuerpo blanco (Teledetección):** Es el objeto que tiene la capacidad de no absorber nada de energía incidente y la refleja totalmente (Ɛ=0) (Chuvieco, 2000).

- **Cuerpo negro (Teledetección):** Es el objeto que tiene la capacidad de absorber y emitir toda la energía recibida (Chuvieco, 2000).

- **Densidad radiante (W):** Medida en Julios [J] por metro cúbico, es toda la energía radiada en cualquier dirección por volumen (Chuvieco, 2000).

- **Emisividad (Ɛ):** Unidad adimensional, es la relación, bajo características iguales de temperatura, entre la emitancia de un cuerpo analizado y uno negro (Chuvieco, 2000).

- **Emitancia radiante (M):** Medida en vatios por metro cuadrado [$Wm^{-2}$], es toda la energía radiada en cualquier dirección por tiempo y desde una unidad aérea (energía emitida) (Chuvieco, 2000).

- **Energía radiante (Q):** Medida en Julios [J], es toda la energía radiada en cualquier dirección (Chuvieco, 2000).

- **Época seca o de estiaje:** La época seca se entiende como el período de mínima o nula periodicidad de lluvias dentro de una zona especificada. Los períodos de estiaje en el Ecuador, se encuentran definidos concretamente y corresponden a los regímenes hidrológicos de costa, de julio a octubre; sierra, desde junio a septiembre; y Amazonía, de octubre a marzo (Comité Nacional sobre el Clima, 2001).

- **Flujo radiante (ϕ):** Medida vatios [W], es toda la energía radiada en cualquier dirección por tiempo (Chuvieco, 2000).

- **Geografía:** La geografía tomada desde sus inicios como la ciencia que estudia las relaciones del hombre y la sociedad con la naturaleza, pretende hasta hoy en día el responder a la problemática socio-espacial cambiante a través de los años, para lo cual utiliza diferentes líneas de pensamiento, basadas en pensamientos filosóficos distintos, con sus propias técnicas y métodos, por los cuales los estudios geográficos son percibidos, interpretados y estudiados (Santarelli & Campos, 2002).

- **Intensidad radiante (I):** Medida en vatios por estéreo radián [$W*sr^{-1}$], es toda la energía radiada en cualquier dirección por tiempo y por ángulo sólido (Chuvieco, 2000).

- **Irradiancia radiante (E):** Medida en vatios por metro cuadrado [$Wm^{-2}$], es toda la energía radiada en cualquier dirección por tiempo y sobre una unidad aérea (energía incidente) (Chuvieco, 2000).

- **Lluvia ácida:** Proceso en el cual la atmósfera se satura de ácidos basados en contaminantes como el $SO_2$ y $NO_x$ junto con agua, oxígeno ($O_2$) y otros compuestos, siendo estos el ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) y el ácido nítrico ($HNO_3$) (Contreras, García, & Icaza, 2013).

- **Monitoreo atmosférico:** Serie de instrumentos y métodos que permiten percibir el estado de la atmósfera en las diferentes regiones en tiempo real, con el fin de derivar información para diferentes propósitos (Contreras, García, & Icaza, 2013).

- **Píxel:** Puntos de información en los que se divide una imagen considerados como la mínima porción de información que puede ser representada por la misma (Pertusa, 2003).

- **Radiancia (L):** Medida en vatios por metro cuadrado por estéreo radián [$W* m^{-2}*sr^{-1}$], es toda la energía radiada en determinada dirección por tiempo y por ángulo sólido (Chuvieco, 2000).

- **Radiancia espectral ($L_\lambda$):** Unidad adimensional, que comprende toda la energía radiada en determinada longitud por área y por ángulo sólido (Chuvieco, 2000).

- **Reflictividad (ρ):** Es la cantidad de energía reflejada por la superficie del flujo de radiación incidente sobre ella (Sobrino, 2000).

- **Signatura espectral:** Es cantidad de energía electromagnética específica, ya sea emitida, reflejada o transmitida, de cada elemento en términos de longitud de onda (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016).

- **Transmisividad (τ):** Unidad adimensional, es la "relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie" (Chuvieco, 2000).

# 8. MARCO TEÓRICO

## 8.1. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Albert L. (2004), define la contaminación ambiental como la entrada a un entorno de sustancias, de origen tanto natural como antrópico, las cuales no pueden ser asimiladas o degradadas y en su mayoría generadas a finales del siglo XVIII, en la finalización de la Segunda Guerra Mundial y de la denominada revolución industrial, ya que ambos eventos exigieron una excesiva demanda de energía.

Por su parte, la legislación mexicana considera a los polucionantes como toda materia o sustancia que, junto a sus posibles combinaciones, derivados y compuestos, son liberadas generalmente por formas de obtención energéticas térmicas, radiactivas, físicas o por labores que a su vez pueden generar ruido. Dichos compuestos liberados se incorporan a la biósfera o a un elemento ambiental, y lo altera en composición, que a su vez podría deteriorar la salud humana (Solís & López, 2003).

En otras palabras, los contaminantes son considerados como todos los elementos ajenos a un ecosistema los cuales variarían sus interacciones o flujos, de manera nociva o anómala.

### 8.1.1. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica por su parte fue tomada como la presencia en el aire de materia o energía, las cuales produzcan o sean capaces de producir algún daño a la salud de las personas o sus bienes (Aranguéz, et al., 1999); mientras que en el Ecuador igualmente, la contaminación de este tipo se debe a sustancias o materiales en la atmósfera, de fuentes naturales o humanas, que puede producir efectos nocivos a la población o al ambiente (Secretaría del Ambiente, 2011).

### 8.1.2. Clasificación y fuentes de contaminantes atmosféricos

Para Solís y López (2003) la contaminación atmosférica se divide en contaminantes primarios y secundarios, presentes en el aire por fuentes naturales, antrópicas o por

interacciones químicas entre gases, partículas, vapores o aerosoles en condiciones atmosféricas inherentes de una zona (Ballester, Tenías, & Pérez, 2005). Dicha división desde otro punto de vista clasifica los contaminantes atmosféricos en dos grupos como: los contaminantes comunes del aire, y los peligrosos, siendo estos últimos, los compuestos no contemplados por la ley, que amenazan la salud humana o de la naturaleza a su alrededor, destacando los más conocidos como: el benceno, berilio, asbesto, mercurio y cloruro de vinilo; todos desarrollados generalmente por la interacción de los contaminantes comunes y las condiciones meteorológicas en una zona (Ministerio del Ambiente, 2010).

En base a lo dicho anteriormente, Flores (1997) agrupa los contaminantes atmosféricos por sus características químicas, físicas, por sus efectos y por sus fuentes de producción/emisión; dando grupos específicos como: primarios, o emitidos directamente al aire; y, secundarios, que son formados por la transformación de los anteriores.

A nivel mundial, los principales contaminantes primarios son: hidrocarburos (HC), clorofluorocarbonos (CFC), metales pesados, dióxido de azufre ($SO_2$), dióxido de carbono ($CO_2$), dióxido de nitrógeno ($NO_2$), monóxido de carbono (CO), monóxido de nitrógeno (NO), material particulado y compuestos como plaguicidas o ácidos, entre otros (Albert, 2004). Por otro lado Contreras, García, & Icaza (2013), consideran a los contaminantes secundarios a los compuestos como: ácido sulfúrico, ácido nítrico (ambos presentes en la "lluvia ácida"), y compuestos oxidantes, que incluye el ozono troposférico.

#### 8.1.2.1. Fuentes de contaminantes primarios:

Pueden ser tanto de origen natural, que constituye una pequeña parte de los contaminantes presentes en la atmósfera, como de origen antrópico con fuentes: *fijas*, principalmente en zonas alejadas a las zonas urbanas, o en cualquier lugar donde se desarrollan procesos industriales o comerciales en menor medida; y, *móviles*, provenientes de vehículos o instrumentos con motores de combustión (Flores, 1997).

### 8.1.3. Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire Ambiente (NECA)

Es una norma técnica obligatoria, basada en la última actualización de la guía de calidad del aire de la OMS[5] del año 2005, adjunta al Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria en su Anexo 4° - Libro VI referente a la Calidad Ambiental, publicado en el Registro Oficial N° 464 el 07 de junio del 2011 y modificado, a su vez, en el Acuerdo Ministerial N° 028, publicado en el Registro Oficial - Edición Especial N° 270 del 13 de febrero de 2015, donde se sustituye el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, y el Acuerdo Ministerial 097-A, que reemplaza varios anexos del Texto Unificado de Legislación Ambiental (Secretaría de Ambiente, 2018).

La importancia de la NECA radica en el establecimiento de los objetivos de la calidad del aire, límites permisibles de contaminantes, y los métodos y procedimientos para su medición, además de clasificarlos en contaminantes criterio o comunes y contaminantes no convencionales (Secretaría de Ambiente, 2018).

### 8.1.4. Índice Quiteño de la Calidad del Aire (IQCA)

Es un informe anual realizado por el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito bajo la utilización de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ) perteneciente a la Secretaría del Ambiente, que tiene como objetivo la difusión de la información entre las autoridades competentes y la ciudadanía en general, transformando los datos de las estaciones, a diferentes escalas numéricas normalizadas para cada contaminante, que van de 0 a 500 (ver Ilustración 1) y mediante la siguiente clasificación (Secretaría de Ambiente, 2003):

[5] Organización Mundial de la Salud.

| Rango | Categoría | CO[a] | $O_3$[b] | $NO_2$[c] | $SO_2$[d] | $PM_{2.5}$[e] | $PM_{10}$[f] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0–50 | Nivel deseable u óptimo | 0–5000 | 0–50 | 0–100 | 0–62.5 | 0–25 | 0–50 |
| 51–100 | Nivel aceptable o bueno | 5001–10000 | 51–100 | 101–200 | 63.5–125 | 26–50 | 51–100 |
| 101–200 | Nivel de precaución | 10001–15000 | 101–200 | 201–1000 | 126–200 | 51–150 | 101–250 |
| 201–300 | Nivel de alerta | 15001–30000 | 201–400 | 1001–2000 | 201–1000 | 151–250 | 251–400 |
| 301–400 | Nivel de alarma | 30001–40000 | 401–600 | 2001–3000 | 1001–1800 | 251–350 | 401–500 |
| 401–500 | Nivel de emergencia | >40000 | >600 | >3000 | >1800 | >350 | >500 |

Notas: a, concentración máxima de promedio en 8 horas; b, concentración máxima de promedio de 8 horas; c, concentración máxima en 1 hora; d, concentración promedio en 24 horas; e, concentración promedio en 24 horas; f, concentración promedio en 24 horas

*Ilustración 1: Límites numéricos de cada categoría del IQCA ([µg/m$^3$]).*

*Fuente: (Secretaría de Ambiente, Índice Quiteño de la Calidad del Aire IQCA, 2003).*

*De menor a mayor concentración, las categorías son: "*óptima, buena, no saludable para individuos extremadamente sensibles, no saludable para individuos sensibles, no saludable para la mayoría de la población y peligrosa para toda la población*" (Secretaría de Ambiente, 2003).

### 8.1.5. Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ)

Originada gracias al préstamo otorgado al Gobierno de la República del Ecuador en 1994 por parte del Banco Interamericano de Desarrollo, la Red comenzaría su desarrollo bajo la tutela de la Empresa de Desarrollo del Centro Histórico en el 2002, pasando al poder de la Corporación Municipal de Mejoramiento de la Calidad de Aire de Quito (CORPAIRE) en el periodo desde el 2004 al 2010, para finalmente formar parte de la Secretará del Ambiente del Municipio de Quito desde el 2010 (Secretaría de Ambiente, 2018). Operativa al 2003 y con capacidad de validación de datos al 2004, la REMMAQ cumple con lo estipulado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y la Organización Meteorológica Mundial contando con 6 sub-sistemas para registro de datos de concentración de contaminantes, instrumentos meteorológicos y ruido, como son (Secretaría de Ambiente, 2018):

- Red Automática (RAUTO):

Compuesta de 8 estaciones fijas con registro de datos automáticos distribuidas por todo el Distrito Metropolitano de Quito, una estación de respaldo en el sector de Jipijapa y una estación móvil desde el 2011, la RAUTO, tiene la capacidad de medición mínima promedio de 10 minutos (ver Ilustración 2) (Secretaría de Ambiente, 2018).

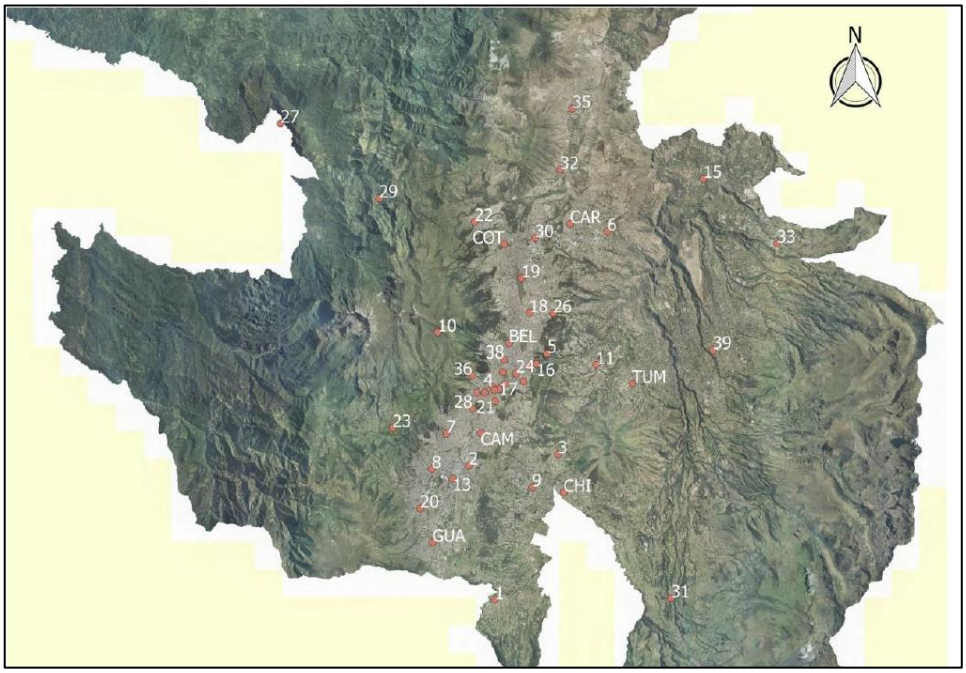



*Ilustración 2: Ubicación de las estaciones de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito. Fuente: (Secretaría de Ambiente, Informe de Calidad del Aire de Quito 2017, 2018).*

Adicionalmente, se destacan las estaciones de Belisario, Carapungo, Centro Histórico, Cotocollao, El Camal, Guamaní, Jipijapa, Los Chillos, y Tumbaco, por ser las ubicadas dentro de los límites de estudio de la disertación (ver Anexo 2) y que se encuentran en las direcciones (ver Tabla 1):

*Tabla 1: Altitud y dirección de estaciones REMMAQ*

| Nombre | Altitud [msnm] | Dirección |
|---|---|---|
| Belisario | 2835 | Terraza del Edificio Administrativo del Colegio San Gabriel (Av. América 3541) |
| Carapungo | 2851 | Edificio Andinatel Carapungo (Super Manzana B, el Verjel S/N) |
| Centro | 2820 | Terraza de la Radio Municipal (ex Hogar Javir, García Moreno 751 y Sucre) |
| Cotocollao | 277 | Museo Cotocollao (Santa Teresa #70-121 entre Ignacio Loyola y Alfonso del Hierro) |

| | | |
|---|---|---|
| El Camal | 2840 | Terraza del Hosp. Patronato Municipal San José del Sur (Adrián Navarro 1660 e Hinostroza) |
| Guamaní | 2887 | Tumbaco |
| Jipijapa | 2781 | Patio de la Dirección Metropolitana Ambiental (Río Coca 1731 e Isla Fernandina) |
| Los Chillos | 2453 | Terraza de Andinatel (Av. Ilaló, Vía a El Tingo) |
| Tumbaco | 2331 | Terraza de Andinatel (Gaspar de Carvajal) |

Fuente: Secretaría del Ambiente, 2017.

Y finalmente, en cuanto a la instrumentación utilizada en la RAUTO, las estaciones remotas cuentan con analizadores de gases y partículas como (ver Ilustración 3) (Secretaría de Ambiente, 2018):

| Contaminante | Número equipos | Ubicación | Método de medida o principio de operación | Marca y modelo |
|---|---|---|---|---|
| Material particulado PM10 | 4 | Tum, Gua, Car, Sap | Atenuación de rayos beta (Método equivalente para PM10 EPA No. EQPM-1102-150) | Thermo Scientific/FH62C14 |
| Material particulado PM2.5 | 6 | Bel, Cam, Cen, Cot, Car, Sap | Atenuación de rayos beta (Método equivalente para PM10 EPA No. EQPM-1102-150) | Thermo Andersen / FH62c14 |
| Dióxido de azufre (SO2) | 7 | Bel, Cam, Cen, Tum, Cot, Car, Chi | Fluorescencia por pulsos de luz ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQSA-0486-060) | THERMO 43C / 43i |
| Dióxido de azufre (SO2) | 2 | Laboratorio Estándares, E. móvil | Fluorescencia ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQSA-0495-0100) | TELEDYNE API / T100 |
| Ozono (O3) | 10 | Bel, Cam, Cen, Tum, Chi, Cot, Car, Gua, Jip*, Lab. Electrónico | Absorción de luz ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQOA-0880-047 | THERMO 49C / 49i |
| Ozono (O3) | 2 | Laboratorio Estándares, E. móvil | Absorción de luz ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQOA-0992-087 | TELEDYNE API / T400 |
| Óxidos de nitrógeno (NOX) | 8 | Bel, Cam, Cen, Cot, Car, Gua, Jip, Chi | Quimiluminiscencia (Método de referencia EPA No. RFNA-1289-074) | THERMO 42C / 42i |
| Óxidos de nitrógeno (NOX) | 2 | Laboratorio Estándares, E. móvil | Quimiluminiscencia (Método de referencia EPA No. RFNA-1194-099) | TELEDYNE API / T200 |
| Monóxido de carbono (CO) | 8 | Bel, Cam, Cen, Cot, Car, Gua, Jip, Lab. Electrónico | Absorción infrarroja no dispersiva (Método de referencia EPA No. RFCA-0981-054) | THERMO / 48C / 48i |
| Monóxido de carbono (CO) | 2 | Laboratorio Estándares, E. móvil | Absorción infrarroja no dispersiva (Método de referencia EPA No. RFCA-1093-093) | TELEDYNE API/ T300 |
| Multicalibrador (SO2, NOX, CO, O3) | 12 | Bel, Cam, Cen, Tum, Chi, Cot, Car, Gua, Jip, Lab. Electrónico, E. móvil | Principio de operación: Dilución de gases, aire cero con un material de referencia certificado (contaminante de concentración conocida). | THERMO/ 146C / 146i |
| Multicalibrador (SO2, NOX, CO, O3) | 1 | Laboratorio Estándares | Principio de operación: Dilución de gases, aire cero con un material de referencia certificado (contaminante de concentración conocida). | TELEDYNE API/ 700E |
| Generador Aire Cero | 12 | Bel, Jip, Cam, Cen, Tum, Chi, Cot, Car, Gua, Lab. electrónico, E. móvil | Principio de operación: Filtración de aire comprimido por medio de carbón activado y purafill, y calentamiento para oxidación. | THERMO / 111 |
| Generador Aire Cero | 1 | Lab. Estándares Jipijapa | Principio de operación: Filtración de aire comprimido por medio de carbón activado y purafill, y calentamiento para oxidación. | ECOTECH / HTO-1000HC |
| Estación portátil para monitoreo de CO, SO2, NO2, 03 , PM2.5, humedad relativa y temperatura del aire | 1 | Lab. Electrónico | Principio de operación: Gas Sensitive Semiconductor (GSS) Gas Sensitive Electrochemical (GSE) | AQM60 |
| Sistema Blade, con 5 servidores físicos | 1 | Centro de Datos | Virtualizado para instalar los servidores de: comunicaciones, bases de datos, web explotación, índice quiteño calidad del aire, proxy, respaldos, correo, envío de alarmas, web. | HP C-3000 |
| Sistema Almacenamiento, con capacidad de 9.6 TB. | 1 | Centro de Datos | Almacenamiento de información de Analizadores de Gases, Meteorología, bases de datos y sistemas que utiliza la REMMAQ y la Secretaría de Ambiente. | HP P2000 |
| Librería Cintas para 24 cintas de (1.5 TB) con tecnología LTO-4 y LTO-5 | 1 | Centro de Datos | Respaldos de información y sistemas | HP M5L2024 |

*Ilustración 3: Métodos de medida, marcas y ubicación de los equipos de medición de contaminantes atmosféricos - RAUCO.*

*Fuente: (Secretaría de Ambiente, Informe de Calidad del Aire de Quito 2017, 2018).*

- Red de Monitoreo Pasivo (REMPA):

En operación desde el 2005, cuenta con 43 puntos de muestreo simultáneo, con 9 puntos coincidentes con la RAUTO y con capacidad de registro de concentraciones de $NO_2$, $O_3$, $SO_2$, Benceno y BTX[6], bajo monitores pasivos elaborados por el personal técnico, y con métodos de medición de difusión pasiva bajo equipos "Metrohm / 940 Professional IC Vario" y "Shimatzu / GC-2014" para BTX (Secretaría de Ambiente, 2018).

- Red de Depósito (REDEP):

Operativa en simultáneo con la REMPA, cuenta con 36 putos de monitoreo para registro de partículas sedimentables, bajo análisis de gravimetría y métodos químicos (Muestreo por el método Bergerhoff), y con el equipo "Horno Thelco / Precision" y "Balanza RADWAG / XA 52.4Y.F" (Secretaría de Ambiente, 2018).

- Red Activa de Material Particulado (RAPAR):

Consta de 4 muestreadores semiautomáticos de alto volumen para material particulado menor a 10µm, bajo el análisis gravimétrico por muestreador de alto caudal y con los equipos "TEI* / 600", "Balanza RADWAG / XA 52.4Y.F", "TISCH, TE-Series 6000" y "Partisol / 2000" para material particulado menor a 2.5µm, todo en operaciones desde el 2003 (Secretaría de Ambiente, 2018).

- Red Meteorológica (REMET):

Formada por 6 estaciones, en los puntos de Carapungo, Cotocollao, Belisario, El Camal, Tumbaco y Los Chillos, la REMET cuenta con los equipos (ver Ilustración 4) (Secretaría de Ambiente, 2018):

[6] Benceno, toluenos y xilenos.

| Parámetro meteorológico / Sensor de calibración | Cantidad | Equipo para medición/calibración | Marca y modelo |
|---|---|---|---|
| Radiación solar global | 6 | Detector tipo termopila / Clase II | Kipp & Zonen / CM3 |
| Presión barométrica | 6 | Sensor capacitivo de silicio / Clase I | Vaisala / PTB101B |
| Temperatura y humedad relativa | 6 | Sensor Pt100 para temperatura y sensor capacitivo para HR / Clase II | Thies Clima / 1.1005.54.161 |
| Precipitación pluvial | 6 | Báscula oscilante / Clase II | Thies Clima / 5.4032.007 |
| Precipitación pluvial | 1 | Báscula oscilante / II | MetOne / 382 |
| Velocidad del viento | 6 | Anemómetro de 3 copas y encoder para generación de pulsos de voltaje de frecuencia proporcional a la velocidad de viento / Clase II | MetOne / 010C |
| Dirección del viento | 6 | Veleta y potenciómetro con señal de voltaje proporcional a la dirección de viento / Clase II. | MetOne / 020C |
| Radiación ultravioleta | 1 | Radiómetro con 6 canales dentro del espectro ultravioleta y un canal en el espectro visible (PAR) | Biospherical Instruments Inc. / GUV 2511 |
| Calibración de sensores meteorológicos | 1 | Estación meteorológica patrón | Vaisala / MAWS100 |
| Calibración de sensor dirección de viento | 1 | Vara de alineamiento de la veleta | Young / 18305 |
| Calibración de sensor dirección / velocidad de viento | 1 | Disco de torque para veleta y copas | Young / 18312 |
| Calibración de sensor velocidad de viento | 1 | Motor para anemómetro / Genera de 20-990 RPM | Young / 18811 |

*Ilustración 4: Métodos de medida, marcas y ubicación de los equipos de mediciones meteorológicas - REMET.*
*Fuente: (Secretaría de Ambiente, Informe de Calidad del Aire de Quito 2017, 2018).*

- Representatividad de los datos:

Dentro de la REMMAQ existe un sub-sistema dedicado enteramente a la validación de datos bajo los criterios de cumplimiento en cuanto a registros aceptables para cada red en sus respectivos períodos de toma de datos y descartando los registros que no cumplan los criterios de cobertura temporal (ver Ilustración 5) (Secretaría de Ambiente, 2018):

| Contaminante | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $SO_2$ | 97.5 | 98.2 | 95.8 | 95.1 | 97.7 | 97.4 | 97.4 | 95.4 | 91.2 | 98.0 | 95.0 | **95.4** |
| CO | 97.4 | 98.1 | 96.2 | 96.7 | 96.9 | 97.3 | 97.1 | 93.0 | 92.6 | 97.5 | 94.4 | **94.4** |
| $O_3$ | 97.5 | 98.0 | 96.2 | 97.4 | 97.7 | 97.1 | 96.8 | 94.8 | 94.1 | 97.8 | 95.2 | **95.3** |
| $NO_2$ | 96.6 | 97.3 | 96.7 | 97.2 | 95.7 | 98.2 | 98.5 | 92.8 | 93.7 | 98.4 | 94.1 | **94.6** |
| $PM_{2.5}$ | 97.0 | 98.0 | 97.0 | 96.9 | 96.9 | 95.3 | 97.9 | 94.7 | 91.5 | 97.4 | 94.5 | **88.6** |

*Ilustración 5: Porcentaje de datos válidos capturados – REMMAQ.*
*Fuente: (Secretaría de Ambiente, Informe de Calidad del Aire de Quito 2017, 2018).*

### 8.1.6. Contaminantes criterio atmosféricos

El Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador (2010), define a los contaminantes criterio o comunes del aire como polucionantes para los cuales existen normativas con valores máximos de concentración en el aire o suelo dependiendo de los diferentes períodos de tiempo.

Los primarios, tambíen llamados comunes o criterio, son procedientes de una fuente, mientras que los secundarios o peligrosos se forman de la interacción o trasformación de los primarios en su composición, ya sea por reaccones químicas o físicas en el aire (ver Ilustración 6) (Ballester, Tenías, & Pérez, 2005):

| Contaminante | Formación | Estado físico | Fuentes |
|---|---|---|---|
| Partículas en suspensión (PM): $PM_{10}$, Humos negros. | Primaria y secundaria | Sólido, líquido | Vehículos<br>Procesos industriales<br>Humo del tabaco |
| Dióxido de azufre ($SO_2$) | Primaria | Gas | Procesos industriales<br>Vehículos |
| Dióxido de Nitrógeno ($NO_2$) | Primaria y secundaria | Gas | Vehículos<br>Estufas y cocinas de gas |
| Monóxido de carbono (CO) | Primaria | Gas | Vehículos<br>Combustiones en interiores<br>Humo de tabaco |
| Compuestos orgánicos volátiles (COVs) | Primaria, secundaria | Gas | Vehículos, industria, humo del tabaco<br>Combustiones en interiores |
| Plomo (Pb) | Primaria | Sólido (partículas finas) | Vehículos, industria |
| Ozono ($O_3$) | Secundaria | Gas | Vehículos<br>(secundario a foto-oxidación de $NO_x$ y COVs) |

$PM_{10}$: partículas con un diámetro inferior a 10 µm
$NO_x$: óxidos de nitrógeno

*Ilustración 6: Descripción de los principales contaminantes atmosféricos químicos y sus fuentes.*
*Fuente: Ballester, Tenías, & Pérez, 2005.*

En Ecuador, la NECA considera como contaminantes criterio del aire a los siguientes compuestos (Secretaría de Ambiente, 2015):

8.1.6.1. Monóxido de carbono (CO):

Gas incoloro y carente de olor, formado por combustión incompleta de materia orgánica en presencia de oxígeno, y es considerado uno de los mayores contaminantes en América Latina (Téllez, Rodríguez, & Fajardo, 2006). En otras palabras, la Secretaría de Ambiente de Quito (2017) lo define de igual manera como gas insípido que proviene de la combustión de la gasolina vehicular, en procesos industriales y emisiones naturales por incendios. Sus límites de concentración son: menos de 10000 [µg/$m^3$], medido continuamente en períodos de 8 horas; y, menos de 30000 [µg/$m^3$] en períodos de 1 hora (Secretaría del Ambiente, 2011). El método de análisis del compuesto se denomina "Analizador Infrarrojo No Dispersivo" (NDIR) basado en cambios de absorción de energía infrarroja (Secretaría del Ambiente, 2011).

*8.1.6.1.1. Efectos nocivos de CO:*

Los individuos más vulnerables a los efectos nocivos de este contaminante son personas con previas enfermedades cardiovasculares[7], mujeres en proceso de embarazo o recién nacidos (Secretaría de Ambiente, 2003). Con capacidad de mortalidad, las afecciones médicas varían, teniendo por ejemplo casos de intoxicación aguda del compuesto, ya que el mismo compite con el oxígeno y modifica la curva de disociación de la hemoglobina, desplazando el oxígeno, produciendo hipoxia celular generalizada (Téllez, Rodríguez, & Fajardo, 2006). Los signos de intoxicación por el compuesto son asociados a la disminución de la percepción visual, de la capacidad manual o cognitiva y deficiencia en la capacidad de aprendizaje (Secretaría de Ambiente, 2018). Entre otros efectos adversos adyacentes podemos encontrar: la peroxidación lípida cerebral, inhibidor de síntesis aeróbica de adenosina trifosfato y precursor de la formación de grupos sulfatides[8] en el cerebro (Téllez, Rodríguez, & Fajardo, 2006).

8.1.6.2. Ozono troposférico ($O_3$):

La Secretaría de Ambiente (2017), define al Ozono como un gas carente de color y olor en exteriores, que forma parte de lo que se conoce como smog o contaminación fotoquímica[9]. No posee fuentes fijas en las normas ecuatorianas, ya que es producto de la interacción entre la radiación solar y reacciones fotoquímicas a través de $NO_x$[10] y compuestos orgánicos en la atmósfera (Secretaría de Ambiente, 2015). Siendo altamente reactivo, posee 3 átomos de oxígeno, apareciendo tanto en la estratósfera como en la tropósfera, más la exposición al mismo en la capa más baja es la denominada como contaminante debido a sus efectos, y que por su formación anteriormente descrita, las condiciones más favorables a su formación se encuentran en los meses de verano (Aranguéz, et al., 1999). La NECA (2011), previene la concentración del compuesto al exceder los 100 [$\mu g/m^3$] en períodos de 8 horas, y cuyo

[7] Anginas, fallas congestivas del corazón, enfermedades cerebro vasculares, obstrucciones crónicas pulmonares o anemia (Secretaría de Ambiente, 2003).

[8] Neurotóxicos (Téllez, Rodríguez, & Fajardo, 2006).

[9] Luz solar y compuestos susceptibles a oxidación, siendo una mezcla de contaminantes formados por reacciones de la radiación solar sobre contaminantes primarios (Contreras, García, & Icaza, 2013).

[10] Óxidos de Nitrógeno.

método es la Quimiluminiscencia en Fotómetro ultravioleta, por liberación de luz medida en un tubo fotomultiplicador.

#### *8.1.6.2.1. Efectos nocivos de $O_3$:*

El IQCA[11] (2003), por su parte, destaca como individuos sensibles a sus efectos a tanto niños como adultos que pasan su tiempo en exteriores. Siendo generalmente tratado como el componente más tóxico debido a los efectos de la contaminación fotoquímica, las molestias oculares, nasales y respiratorias, debilidad, nauseas, dolor de cabeza, y junto con síntomas como dificultad de respiración, tos y dolores en el pecho, son atribuidos directamente al compuesto (Ballester, Tenías, & Pérez, 2005). De igual manera, el ozono posee efectos a largo plazo como agente impulsor de asma y de enfermedades infecciosas, además de poder deteriorar el interior pulmonar (Secretaría de Ambiente, 2011).

### 8.1.6.3.Óxidos de nitrógeno ($NO_x$):

Se los considera como la suma del Óxido Nítrico (NO) y el Dióxido de Nitrógeno ($NO_2$), provenientes de la saturación vehicular, dónde en NO constituye aproximadamente el 80% de total, mismo que se transforma de igual manera en $NO_2$ (Secretaría de Ambiente, 2018). Sus fuentes varían entre la combustión vehicular, uso de calderas, incendios, tabacos, producción de fertilizantes y explosivos, o fotodegradación (Contreras, García, & Icaza, 2013).

#### *8.1.6.3.1. Óxido nítrico (NO):*

Es un gas sin color u olor, emitido naturalmente por ciertas bacterias hacia la atmósfera, son precursores de la formación de $NO_2$, y provienen de fuentes antrópicas como plantas generadores de energía por procesos térmicos o emisiones vehiculares (Flores, 1997).

#### *8.1.6.3.2. Dióxido de nitrógeno ($NO_2$)*

Es un gas café-rojizo, con fuerte olor, precursor del ácido nítrico, nitratos y compuestos tóxicos derivados, que se forma por reacción fotoquímica del NO y compuestos volátiles en el aire (Secretaría de Ambiente, 2018). La NECA (2011), pone como límites de

[11] Índice Quiteño de Calidad del Aire.

concentración un promedio aritmético tope con todas las muestras de un año, el cual no deberá exceder los 200 [µg/$m^3$], y a nivel internacional la EPA[12], lo considera como un compuesto altamente toxico si la exposición supera el intervalo de 0.2 a 0.5 ppm por hora de exposición (Flores, 1997). Su medición está basada en el método de Quimiluminiscecia que bajo la producción de luz, permite constatar la presencia tanto de NO como de $NO_2$ (Secretaría del Ambiente, 2011).

*8.1.6.3.3. Efectos nocivos de los $NO_x$, NO y $NO_2$:*

Los individuos propensos a sufrir efectos nocivos son niños y adultos con previas enfermedades respiratorias, ya que los compuestos causan irritación en los pulmones y reducen la capacidad de asimilación de oxígeno, pudiendo derivar en pulmonías o asma (Secretaría de Ambiente, 2003). Asimismo en el ambiente, concentraciones bajas pueden dificultar el crecimiento de ciertas especies de plantas y acelerar la corrosión de metales (Cuesta & Cabrera, 1994).

8.1.6.4. Dióxido de azufre ($SO_2$):

Para Aranguéz, et al. (1999), el compuesto se prsenta como un gas sin color, con un sabor percibible a altas concentraciones y un olor irritante y cáustico, con facilidad de disolución en agua formando ácido sulfuroso ($H_2SO_3$) y posteriormente sulfúrico ($H_2SO_4$). De la misma manera, Contreras, García, & Icaza (2013), presenta a compuesto como parte del petróleo o el carbón, pudiendo oxidarse hasta formar trióxido de azufre ($SO_3$), e impulsando la generación de sulfatos. Entre sus fuentes princiales se tienen a las plantas eléctricas, termoeléctricas, procesos industriales de metales y uso de fertilizantes, además de fuentes naturales como en erupciones volcánicas (Secretaría de Ambiente, 2015). En el Distrito Metropolitano de Quito, los límites permisibles del compuesto son de: 125 [µg/$m^3$] en períodos de 24 horas, 500 [µg/$m^3$] por cada 10 minutos y 60 [µg/$m^3$] en promedios anuales, siendo muestreada por el método de Pararosanilina basado en absorción dentro de un líquido y posteriormente observando el color (Secretaría del Ambiente, 2011).

[12] United States Environmental Protection Agency.

*8.1.6.4.1. Efectos nocivos del $SO_2$:*

Por sus caracterísiticas el $SO_2$ es fácilmente asimilable por absorcipon de la mucosa respiratoria (Flores, 1997). Al igual en los $NO_x$, el compuesto puede afectar tanto a niños como adultos en tanto posean enfermedades crónicas o realicen actividades al exterior (Secretaría de Ambiente, 2003); causando en varios caoso conjuntivitis, iritación de vías resporatorias o pulmones, bronquitis, traqueitis, bronco espasmos e propiciando el avance de enfermedades cardiorespiratorias que podrían llevar a la muerte (Secretaría de Ambiente, 2018).

8.1.6.5. Material particulado:

Dichas elementos se refieren a pequeñas partículas de tamaño variable tanto de líquidos como de sólidos, destacando dos grandes clasificaciones con fines normativos como lo son el $PM_{2.5}$ y el $PM_{10}$ que se refieren respectivamente a los elementos con diámetro aerodinámico inferior a los 2.5 o 10 micro-metros [µm] (Díaz & Páez, 2006). Sus fuentes más conocidas en el Ecuador son por erosión, procesos de combustión, procesos industriales o de procesamiento de metales, tráfico vehicular, desgaste de insumos públicos como pavimento o aceras, actividades de construcción o demolición, o en fuentes naturales como deslizamientos o incendios forestales (Secretaría de Ambiente, 2018). Por su parte, la NECA limita la concentración de dichas partículas de la siguiente manera: para el $PM_{10}$ el promedio de datos tomados no debe exceder los 50 [$\mu g/m^3$] en período de un año o 100 [$\mu g/m^3$] en períodos de 24 horas; mientras que para el $PM_{2.5}$ los promedios máximos serán de 15 [$\mu g/m^3$] anuales y 50 [$\mu g/m^3$] por cada 24 horas (Secretaría del Ambiente, 2011). Las mediciones de dichas partículas se realizan mediante el método gravimétrico, receptando los elementos en envases abiertos y posteriormente pasadas a muestreadores de alto o bajo caudal que cuentan con filtros separadores de partículas (Secretaría del Ambiente, 2011).

*8.1.6.5.1. Efectos nocivos del material particulado:*

En los casos más favorables, los efectos varían desde irritación en la garganta y mucosas, más los $PM_{10}$ podrían empeorar enfermedades cardiorrespiratorias, cardiovasculares, asma y podría estar en relación con la silicosis, asbestosis y cáncer; por otro lado, los $PM_{2.5}$ pueden depositarse en el espacio alveolar o el torrente sanguíneo causando enfermedades cardiovasculares que pueden derivar en la muerte del paciente (Secretaría de Ambiente,

2018). Díaz & Páez (2006), advierten que estos compuestos tanto orgánicos como inorgánicos pueden incrementar las enfermedades respiratorias en niños, así como modificar desfavorablemente cultivos que posteriormente son ingeridos por la población, afectan la visibilidad temporal de zonas transitadas y fomentan el daño de estructuras.

## 8.2. ESTADÍSTICA

Es la ciencia, que bajo información numérica recolectada, la organiza, estudia, interpreta y presenta, teniendo como objetivo principal la óptima toma de decisiones en respuesta a cualquier tipo de evento (Lind, Marchal, & Wathen, 2012). También se la puede tomar como una rama matemática encargada de estudiar, de manera organizada, analítica y representativa, las características de una población (Barrios, 2005).

Su objetivo central en pocas palabras se basa en su capacidad de observación y formulación de modelos aleatorios en servicio a ciencias ligadas a la variabilidad e incertidumbre en los eventos que estudian, siendo una herramienta que puede deducir las leyes de estos comportamientos y generar conclusiones, recomendaciones y técnicas al respecto (Romero J. , 1967).

### 8.2.1. Tipos de estadística

Lind, Marchal, & Wathen (2012) dividen la estadística en dos grandes grupos que son:

- Estadística descriptiva:

Serie de procesos dedicados a organizar, condensar y derivar información que pueda ser entendida por otras personas.

- Estadística inferencial:

Métodos dedicados a determinar las características de un conjunto total de individuos (población) mediante el estudio de una parte del mismo (muestra).

### 8.2.2. Conceptualización básica de estadística

Barrios (2005), en cambio describe como conceptos básicos a los siguientes:

#### 8.2.2.1. Población:

Denominación del conjunto total de datos, objetos o individuos con características similares, que serán observados en una investigación.

8.2.2.2.Muestra:

Denominación del subgrupo de datos, objetos o individuos con características similares, es decir que fueron tomados de una población, y que serán observados en una investigación.

8.2.2.3.Variable:

Características propias de un conjunto que pueden ser observadas en los datos, objetos o individuos que los conforman.

### 8.2.3. Tipos de variables

Para el estudio de las características de una población o una muestra existen dos tipos de variables:

8.2.3.1.Variable cualitativa:

Son las características no numéricas presentadas por las poblaciones o las muestras, y conocidas también como atributos, estas pueden ser por ejemplo el género de un grupo de personas o su nombre (Cazau, 2006).

8.2.3.2.Variable cuantitativa:

Es la característica de una población o muestra, interpretada de manera numérica (Lind, Marchal, & Wathen, 2012). Estas variables a su vez se dividen en:

- *Discretas:* Que solo toman ciertos valores con vacíos relativos entre ellos, es decir que adoptan valores en números enteros, como el número de estudiantes por clases o el número de automóviles por casa en una ciudad (Ronald, 1998).

- *Continuas:* Que toman valores de forma aleatoria dentro de un intervalo, es decir que pueden adoptar valores decimales, como la cantidad de precipitación en una zona (Ronald, 1998).

### 8.2.4. Cálculos estadísticos para descripción de datos

Para poder describir y comparar los datos cuantitativos de una muestra se destacan: las medidas de ubicación que clasifican los grupos de datos; y, las medidas de dispersión, que se destacan por describir la disgregación de los valores en los conjuntos (Anderson, Sweeney, & Williams, 1999). A pesar de que son posibles los estudios de poblaciones, en términos de la disertación, esta se referirá solamente a los cálculos para estudios de muestras, y por tanto el cálculo de las características muestrales relevantes son (Lind, Marchal, & Wathen, 2012):

#### 8.2.4.1. Media:

Conocida también como media geométrica, es el cálculo donde se divide la suma de los cantidades de los datos en la muestra para el número de total de valores existente en la misma (ver Ecuación 1) (Cazau, 2006).

*Ecuación 1: Cálculo de la Media Muestral.*

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$$

Donde $\bar{X}$ es la media de la muestra; x es cualquier valor; y, n es el número poblacional.

#### 8.2.4.2. Mediana:

Es el valor correspondiente al punto medio de los datos ordenados (Hueso & Cascant, 2012).

#### 8.2.4.3. Rango:

Medida de dispersión que consta de la resta del valor más alto y el valor mínimo en una muestra (Anderson, Sweeney, & Williams, 1999).

#### 8.2.4.4. Varianza y desviación estándar:

Basadas en la media muestral, son los cálculos para representar la dispersión siendo: la variancia, “la media aritmética de las deviaciones de la media elevadas al cuadrado” (ver

Ecuación 2); mientras que la desviación estándar es, "la raíz cuadrada de la varianza" (ver Ecuación 3) (Lind, Marchal, & Wathen, 2012).

*Ecuación 2: Cálculo de Varianza Muestral.*

$$s^2 = \frac{\sum(X - \overline{X})}{n - 1}$$

*Ecuación 3: Cálculo de la Desviación Estándar Muestral.*

$$s = \sqrt{\frac{\sum(X - \overline{X})}{n - 1}}$$

Donde $s^2$ es la varianza muestral; s es la desviación estándar muestral; $\overline{X}$ es la media de la muestra; X es cualquier valor; y, n es el número poblacional.

8.2.4.5.Sesgo (Coeficiente de sesgo de Pearson):

Característica estadística de una muestra poblacional, la cual describe la tendencia o propagación de sus datos. Puede adoptar valores de entre -3 a 3, que se pueden interpretar en términos de tendencias de sesgos, tanto positivas como negativas en el grupo de datos (Díaz M. , 2002).

*Ecuación 4: Coeficiente de Sesgo de Pearson.*

$$sk = \frac{3(\overline{X} - \text{Mediana})}{s}$$

Donde sk es el sesgo del conjunto de datos; $\overline{X}$ es la media de la muestra; Mediana es el valor de la mediana de todos los datos; y, s es la desviación estándar de la muestra.

8.2.4.6.Coeficiente de correlación de Pearson:

Es el número en escala de razón, el cual interpreta la fuerza y dirección de una relación lineal entre dos variables (Lind, Marchal, & Wathen, 2012). Puede tomar valores de entre -1 y 1, indicando respectivamente la relación directa o inversa entre dos conjuntos de datos con requerimientos de información de las medias muestrales y desviaciones estándar de cada población (Díaz M. , 2002).

*Ecuación 5: Coeficiente de Correlación de Pearson.*

$$r = \frac{\sum(X - \bar{X}) * (y - \bar{y})}{(n-1) * s_1 * s_2}$$

Donde r es el coeficiente de correlación de Pearson; $\bar{X}$ es la media de la muestra 1; X es cualquier valor del grupo 1; $\bar{y}$ es la media de la muestra 2; Y es cualquier valor del grupo 2; $s_1$ y $s_2$ son los valores de desviaciones estándar del conjunto 1 y 2 respectivamente; y, n es el igual número poblacional de ambos conjuntos.

### 8.2.5. Regla empírica

Para entender la regla empírica se tiene que partir por la definición del teorema de Chebyshev que dice que la proporción de valores que se encuentran a X desviaciones estándares en una muestra es de tamaño mínimo de $\{1-\frac{1}{x^2}\}$, lo que visto en otras palabras dice que al menos el 75% de los valores en una muestra se encuentran a dos desviaciones estándares del valor de su media (Lind, Marchal, & Wathen, 2012).

Ya que el teorema es aplicable a cualquier tipo de distribución muestral, la regla empírica por su parte asume una distribución normal (ver Ilustración 7), y afirma que el 68% de las variables se encuentran a ±1 desviación estándar de la media, el 95% a ±2 desviaciones y 99.7% a ±3 desviaciones estándar (Cazau, 2006).

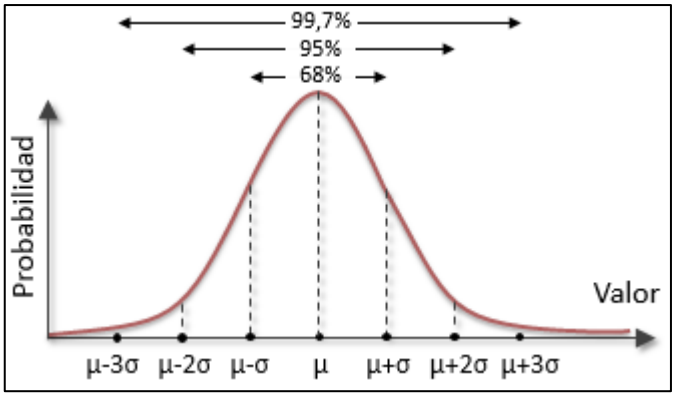



*Ilustración 7: Representación de distribución normal (Campana de Gauss).*

*Fuente: Revista electrónica Matemáticas10, 2018 (URL: https://www.matematicas10.net/2017/02/ejemplos-de-distribucion-normal.html).*

### 8.2.6. Teorema del límite central

Tiene como aplicación la creación de límites de confianza, afirmando que si todas las muestras son tomadas en la misma población, estas deben poseer una distribución que se asemeje a la normal (Campana de Gauss) (Romero J. , 1967).

Una distribución normal por su parte, es el conjunto de datos donde la media y la mediana del grupo tienen el mismo valor, y cada desviación estándar de los datos en sucesión revela información referencial de la distribución de los valores observados. Por esto, el histograma de esta distribución tiene forma de "campana" en términos visuales (ver Ilustración 7) (Minitab 18, 2018).

Entre las afirmaciones más importantes del teorema, y bajo el supuesto de que se conoce la media, mediana y desviación estándar de la población con una distribución relativamente normal, se puede afirmar que (Lind, Marchal, & Wathen, 2012):

- El 95% de las medias muestrales se encuentran dentro del rango de 1.96 errores estándar. Es decir que esto se puede afirmar con un intervalo de confianza[13] de 95%.

- Y que el 99% de las medias muestrales se encuentran dentro del rango de 2.58 errores estándar (intervalo de confianza de 99%).

### 8.2.7. Control estadístico de procesos (CEP)

A breves rasgos, es un proceso que utiliza procesos estadísticos para reducir la continua variación (Universitat Jaume I, 2003). Desarrollado por Shewhart (1931), este método plantea la resolución de problemas numéricos de todo tipo generados por factores aleatorios mediante la reducción de la variabilidad de los datos muestrales (Ruiz A. , 2006).

Existen dos tipos de factores que afectan a la variabilidad en las características de un producto y son: causas comunes que generan pequeñas oscilaciones sin efectos que

[13] Valores derivados de una muestra que explican la posibilidad, con probabilidad específica, de que un parámetro poblacional tenga ocurrencia en el conjunto muestra (Lind, Marchal, & Wathen, 2012).

destaquen entre las variables y causas especiales o asignables, donde existe un factor que incide con efecto preponderante en el análisis de los datos, mismo que debería ser estudiado específicamente (Ruiz A. , 2006). Para la implementación del CEP existen dos casos: el primero donde el proceso posee parámetros constantes en el tiempo, es decir que posee una media constante en la toma de datos; y, el segundo donde la media sufre variaciones en las diferentes muestras temporales de la misma población.

En términos de la disertación se asumió una distribución relativamente normal de los datos, y basados en teorema del límite central, se excluyó por completo los datos fuera de ± 2.58 desviaciones estándar de la media definiéndolo como "Límite de Control" (LC), mientras que se analizó y sustituyó los datos que se encuentren a ± 1.96 desviaciones estándar, definiendo los "Límites de Advertencia" (LA).

### 8.2.8. Tipos de variables en la investigación

Toda investigación tiene una hipótesis que es una afirmación sobre el valor de una característica en la muestra o población (Lind, Marchal, & Wathen, 2012). Para la demostración de dicha declaración se necesita una o más variables las cuales estarán a disposición del investigador, y en el caso de poseer más de una en un experimento, se puede clasificar estas de la siguiente manera (Buendía, Colás, & Hernández, 2001):

- Independientes: Es la que el examinador utiliza para definir su relación con el factor determinante evento estudiado.

- Dependientes: Es el factor que el examinador mide para definir el efecto que tienen las variables independientes sobre él.

- Moderadoras: Variable independiente, utilizada para comprobar si se modifica la relación entre las variables independientes y dependiente.

- De control: Variable controlada por el examinador la cual elimina sus efectos en la variable dependiente.

- Interviniente: Son variables que a pesar de que afecten la variable dependiente, no pueden ser extraídas o controladas.

### 8.2.9. Regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS[14])

Es un método de comprobación de hipótesis estadística, similar al análisis de componentes principales, el cual trasforma las variables independientes en una regresión lineal múltiple en índices que explican la variabilidad de las matrices estimadas o predichas (Gaviria, 2016). El modelo de regresión PLS en otras palabras, genera una ecuación de regresión lineal múltiple mediante el uso de la proyección de variables de predicción y las variables reales en un entorno estudiado, tratando de eliminar la multicolinealidad entre variables por medio de un análisis de componentes principales (Valdez, 2010). El procedimiento del análisis del PLC reduce la capacidad de utilización de variables independientes en base al índice correlación (de Pearson) que estas tengan entre sí, y puedan sesgar los modelos predictivos (Espejo & Pino, 2017).

### 8.2.10. Análisis de regresión múltiple

Lind, Marchal, & Wathen (2012) lo definen como el empleo de varios conjuntos de datos independientes en función de determinar o explicar el comportamiento de otro conjunto que dependerá de los primeros. La ecuación general de una ecuación de regresión lineal múltiple es (ver Ecuación 6) (Cazau, 2006):

*Ecuación 6: Ecuación General de Regresión Múltiple.*

$$\bar{y} = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \cdots + b_kX_k$$

Donde $\bar{y}$ es la variable dependiente; a es el valor de Y cuando las X son 0; b es el valor de variación de Y para cada X; y, k representa la cantidad de variables independientes.

[14] Partial Least Squares Regression.

Y en cuanto a los procesos de evaluación de esta ecuación encontramos los siguientes (Lind, Marchal, & Wathen, 2012):

#### 8.2.10.1. La tabla ANOVA:

Es una matriz utilizada para analizar al mismo tiempo si las medias de diferentes poblaciones son iguales (Uribe, 2017). La tabla ANOVA cuenta análisis de variación mediante el cálculo de características inherentes a los conjuntos dependientes (Y), como el de los conjuntos independientes ($X_0$, $X_1$,…$X_n$). Cabe mencionar que el cálculo en codificación para el software estadístico R de este parámetro es "anova(nombre de la matriz de datos a analizar o de un modelo lineal simple o múltiple)", el cual expone los siguientes parámetros numéricos (Lind, Marchal, & Wathen, 2012):

- *Grados de libertad (gl):* Asociados a cada categoría, dónde su número total es n-1, k el número de variables independientes y n-(k+1) el residual.

- *Suma de cuadrados SS:* Donde se encuentra el cálculo de la $SS_R$ o suma de cuadrados de la regresión ( $SS_R = \sum(\bar{Y}-Y_{media})^2$); $SS_T$ o suma de cuadrados total ( $SS_T = \sum(Y-Y_{media})^2$); y, $SS_{RES}$ o suma de cuadrados del error o residuo ($SS_{RES} = \sum(\bar{Y}-Y_{media})^2$. Donde Y es el dato real; $Y_{media}$ es la media general de los valores Y; y, $\bar{Y}$ es el valor de observación medida por la ecuación de regresión lineal.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado medio | Fo | Valor-P |
|---|---|---|---|---|---|
| Regresión | $SS_R$ | $k$ | $MS_R = \frac{SS_R}{k}$ | $MS_R / MS_{Res}$ | |
| Residual | $SS_{Res}$ | $n-k-1$ | $MS_{Res} = \frac{SS_{Res}}{n-k-1}$ | | |
| Total | $SS_T$ | $n-1$ | | | |

El estadístico $F_0 \sim F_{k,n-k-1}$

$$SS_T = \sum y_i^2 - \frac{\left(\sum y_i\right)^2}{n}$$

$$SS_R = \hat{\beta}^T X^T y - \frac{\left(\sum y_i\right)^2}{n}$$

$$SS_{Res} = SS_T - SS_R$$

*Ilustración 8: Ejemplo de cuadro ANOVA para regresión lineal múltiple.*

*Fuente: Uribe, 2017.*

Prosiguiendo con la comprobación de la ecuación mencionada, y en base a los cálculos de parámetros en la tabla ANOVA, podemos deducir los siguientes índices:

- Error estándar de estimación múltiple:

Es conocido como la desviación estándar de una ecuación lineal múltiple (ver Ecuación 7) (Lind, Marchal, & Wathen, 2012).

*Ecuación 7: Cálculo del error estándar de estimación múltiple.*

$$S_{Y.123\ldots k} = \sqrt{\frac{SSR}{n-(k+1)}}$$

Donde $SS_R$ es la suma de cuadrados de la regresión calculada en ANOVA; Y es el dato real; $Y_{media}$ es la media general de los valores Y; k es el número de variables independientes; n es el número datos muestrales; y, $\bar{Y}$ es el valor de observación medida por la ecuación de regresión lineal. El valor resultante se puede tomar como el error típico en el mismo sistema de medidas de las variables.

- Coeficiente de determinación múltiple:

Es el porcentaje de variación del conjunto dependiente en función de las variables independientes en valores de 0 a 1, donde 0 es una asociación mínima y 1 fuerte (Lind, Marchal, & Wathen, 2012). La ecuación de su cálculo es (ver Ecuación 8) (Uribe, 2017):

*Ecuación 8: Cálculo del coeficiente de determinación múltiple.*

$$R^2 = \frac{SSR}{SS\ t}$$

Donde $SS_R$ es la suma de cuadrados de la regresión y $SS_T$ es la suma de cuadrados total, ambos calculados en ANOVA

- Coeficiente ajustado de determinación:

Cálculo que busca eliminar el error generado por la cantidad de conjuntos independientes en una regresión lineal, ya que mientras estas variables aumenten, aumenta el coeficiente de determinación múltiple. El cálculo está basado en la ecuación (ver Ecuación 9) (Uribe, 2017):

*Ecuación 9: Cálculo del coeficiente ajustado de determinación.*

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{\frac{SS_{RES}}{n-(k+1)}}{\frac{SST}{n-1}}$$

Donde $SS_{RES}$ es la suma de cuadrados del error o residuo y $SS_T$ es la suma de cuadrados total, ambos calculados en ANOVA; n es el número datos muestrales; y, k es el número de variables independientes.

- Prueba general del modelo de regresión múltiple:

Finalmente, para probar la capacidad de estimación de la variable dependiente en base a las independientes, se desarrolla la ecuación (ver Ecuación 10) (Uribe, 2017):

*Ecuación 10: Cálculo de la prueba global del modelo de regresión lineal múltiple.*

$$F = 1 - \frac{\frac{SS_R}{k}}{\frac{SS_{RES}}{n-(k+1)}}$$

Donde $SS_{RES}$ es la suma de cuadrados del error o residuo y $SS_R$ es la suma de cuadrados de la regresión, ambos calculados en ANOVA; n es el número datos muestrales; y, k es el número de variables independientes. F a su vez es un valor que puede adoptar números positivos de 0 al infinito que prueba la hipótesis irreal de que todos los coeficiente de regresión son nulos (Lind, Marchal, & Wathen, 2012).

### 8.2.11. Error medio cuadrático (RMSE[15])

En este caso, el RMSE es el valor que representa la cantidad de error entre dos conjuntos de datos, siendo el primero correspondiente a los datos modelados producto de una ecuación lineal múltiple y el segundo al conjunto de datos reales medidos (Cazau, 2006). También conocido como "Raíz de la Desviación Cuadrática Media", se lo puede definir en otras

[15] Root-Mean-Square Error.

palabras como medida de desempeño, con capacidad de evaluar los modelos predictivos en base a la suma de los errores cuadráticos (resta elevada al cuadrado) entre los valores reales en la muestra ($A_t$) y los datos calculados por el modelo predictivo ($F_t$) (ver Ecuación 11) (Díaz M. , 2002).

*Ecuación 11: Cálculo RMSE.*

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(A_t - F_t)^2}{n}}$$

### 8.2.12. Geoestadística

En otro orden de ideas, la geoestadística es una rama de la estadística que utiliza funciones aleatorias para interpretación y estimación de eventos naturales (Díaz M. , 2002). También se puede afirmar que es el conjunto de procesos e instrumentos que son utilizados para estudiar y predecir datos de variables espaciales, directamente relacionados con los Sistemas de Información Geográficos, y constan de 3 etapas básicas (Moral, 2004):

- Análisis inicial de datos: Referido al estudio d las variables sin tomar en cuenta su distribución en el entorno real.

- Análisis estructural de datos: Referido al análisis de los datos con la inclusión de su continuidad espacial.

- Modelamiento o predicción: Cálculo de datos en puntos ajenos a los muestrales.

### 8.2.13. Software SPSS[16] (Versión 20)

[16] Statistical Package for the Social Sciences.

Es un software estadístico desarrollado por la empresa IBM en 1968, liberado en su versión 20 en 2011, con herramientas incluidas de análisis y alta capacidad de manejo de bases de datos, capaz de realizar: cálculo de parámetros estadísticos básicos, modelos de correlación simples y avanzados, anpalais y validacipon de datos y con extensiones para programadores, entre otras (IBM Analytics, 2018). La adqusición de licencias no es libre y tiene costos variables dependiendo de las regiones donde se lo quiera utilizar.

### 8.2.14. Software R (Versión 3.5.1)

En su versión 3.5.1 liberada el 02 de febrero de 2018, el Software R es un lenguaje de programación libre y con plataforma para computarización de estudios estadísticos junto con sus gráficos. Desarrollado por Bell Laboratories, el software posee una variada disponibilidad de técnicas estadísticas y gráficas bajo una ruta de código abierto (The R Foundation, 2018).

- RStudio:

A manera de complemento, RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE[17]) para R el cual incluye beneficios como : resaltado de sintaxis, finalización de código y sangría, ejecución de código R directamente desde el editor de fuente, salto rápido a definiciones de funciones, gestión fácil de múltiples directorios de trabajo usando “proyectos”, rapida creación y depuración de códigos, depuración interactiva rápida corrección de errores y amplía las herramientas de diferentes desarrolladores. Se encuentra disponible en código abierto (RStudio, 2018).

[17] Integrated Development Environment.

## 8.3. TELEDETECCIÓN ESPACIAL

Es el estudio remoto de la superficie terrestre, desarrollada en los años 60, que comprende todos los procesos concernientes en la obtención, tratamiento y utilización de una imagen proveniente de plataformas satelitales, todo mediante la interacción energética entre la radiación solar o un emisor artificial y el almacenamiento de información (datos del espectro electromagnético ultravioleta, térmica y micro-ondas) en un sensor ubicado en el satélite o en estaciones receptoras (Chuvieco, 2008). Desde otro punto de vista, Lira (2011), describe a la teledetección o percepción remota como el proceso de obtención de información de una escena por medio de una plataforma a cierta distancia del objeto de interés bajo criterios definidos y elementos específicos (radiación electromagnética y análisis automatizados de datos).

Más debido a la complementación de los conceptos se puede resumir que la teledetección es el grupo de sensores que toman la información de la superficie terrestre mediante la captación de energía radiante (tanto visible como no visible), que posteriormente es transformada en datos digitales y transmitida a la tierra para su utilización (Aranguéz, et al., 1999).

### 8.3.1. Elementos de la teledetección

#### 8.3.1.1. Fuente de energía o iluminación:

Es la fuente de la radiación electromagnética captada por el sensor, dividida en: activa, cuando es de origen externo; y, pasiva, cuando el sensor emite la energía (Lira, 2011).

#### 8.3.1.2. Cubierta terrestre o paisaje:

Tanto para Chuvieco (2008), como para Lira (2011), el concepto se refiere al sistema físico objeto de estudio. El conjunto de elementos ambientales que lo componen pueden ser por ejemplo: la composición del suelo, la cantidad y tipo de vegetación, los cuerpos de agua en varios estados o las zonas antrópicas, y elementos que pueden o no estar ligados al objeto de estudio que cuenten con sus respectivas reacciones ante la energía recibida de la fuente.

8.3.1.3.Escena:

Referente a la representación en dos dimensiones de los objetos captados, en función de las diferentes características del sensor (Lira, 2011).

8.3.1.4.Sistema sensor:

Es la capacidad de captación de la energía de la cubierta terrestre, y la codificación de la misma junto con su registro o transmisión a los receptores correspondientes (Chuvieco, 2008). A su vez, este se divide en (Lira, 2011):

- *Sensor:* Detectores electrónicos de radiación electromagnética de las cubiertas de estudio que general información cuantitativa.

- *Plataforma:* Instrumento que se encuentra en la función de su distancia al objeto de estudio, que definen el tamaño de visión disponible y el detalle apreciables de la escena.

8.3.1.5.Sistema de recepción/comercialización:

Es el receptor de la información posterior a la plataforma, dónde se registra en formatos establecidos y se corrige para su distribución (Chuvieco, 2008).

8.3.1.6.Intérprete:

Es el agente transformador de la información en cartografía temática para su fácil interpretación (Chuvieco, 2008).

8.3.1.7.Usuario final:

Agente que aprovecha el documento final (Chuvieco, 2008).

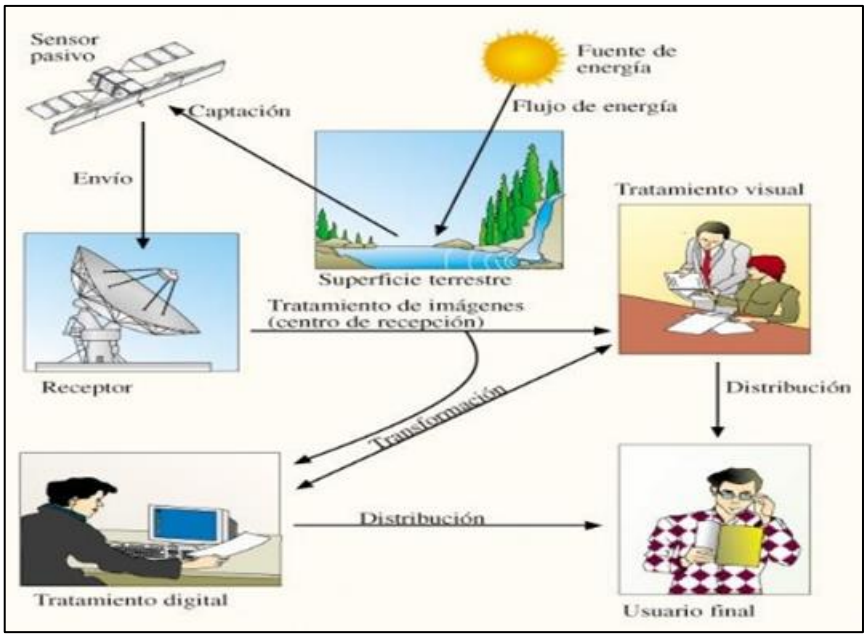



*Ilustración 9: Sistema de teledetección.*

*Fuente: Zamora F., Métodos de Estudio y Origen de la Tierra (URL: https://www.slideshare.net/pacozamora1/tema1-mtodos-de-estudio-y-origen-de-la-tierra)*

### 8.3.2. Fundamentos de la captura de imágenes en teledetección espacial

Chuvieco (2000) y Lira (2011), afirman que debido al carácter remoto de la toma de las imágenes satelitales, la adquisición de la información por parte del sensor se la realiza mediante: reflexión, basada en la respuesta de los elementos de la superficie a la energía emitida por el sol y la atmósfera; emisión, es decir solo la captación de la radiación emitida por un objeto; y, emisión-reflexión, es decir la captación de la respuesta radiativa de un elemento hacia la emisión de energía emitida por el mismo sensor. Del mismo modo, la imagen, conformada por diferentes puntos o píxeles, guarda en cada uno de ellos los datos de intensidad de la radiación de las diferentes cubiertas en la escena.

### 8.3.3. Espectro electro-magnético

Es la sucesión de valores de energía similar emitida de forma continua por todos los cuerpos respectivamente (ver Ilustración 10) (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016). Las propiedades de la radiación electromagnética han sido descritas por teorías desarrolladas por Maxwell &

Hyugens así como por Planck & Einstein, resultando en la aseveración de que dicha energía está formada por fuerzas eléctricas y magnéticas, pasa de un lugar a otro de manera armónica y continúa a la velocidad de la luz (ver Ecuación 12) (Chuvieco, 2008).

*Ecuación 12: Ecuación de la radiación electromagnética.*

$$c = \lambda * F$$

Donde $c$ es la velocidad de la luz (3 * $10^8$ m/s), λ es la longitud de onda medida en micrómetros [µm] y F es la frecuencia (ciclos por segundo) medida en Hertzios siendo estas dos fuerzas correlacionadas inversamente (ver Ilustración 10).

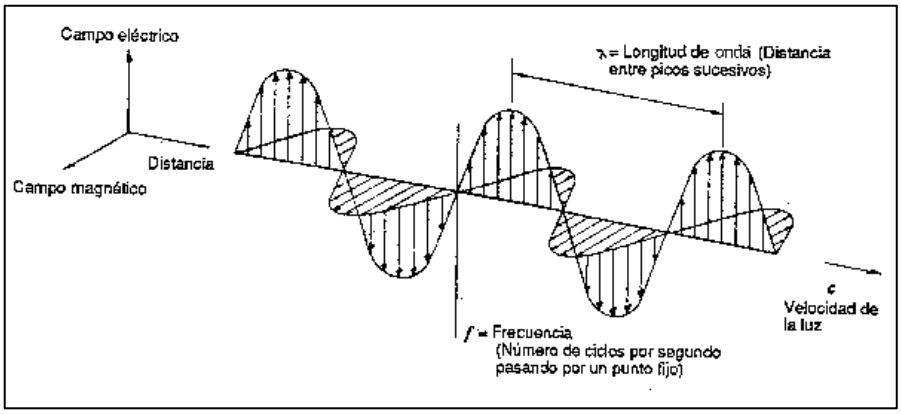



*Ilustración 10: Onda electromagnética.*
*Fuente: FAO (URL: http://www.fao.org/docrep/003/t0355s/T0355S02.htm)*

Asimismo, las longitudes de onda de similar valor, son organizadas por bandas con comportamientos electromagnéticos similares (ver Ilustración 11), que en términos de teledetección se dividen en (Chuvieco, 2008):

- <u>Ultravioleta:</u>

Con una longitud de onda en el rango de 0.004 a 0.400 [µm], se divide en (Peguero, 2012):

  - *UV Vacío:* con rango de 0.010 a 0.004 [µm] (no atraviesa la atmósfera).
  - *UV Lejano:* de 0.280 a 0.010 [µm] (no atraviesa la atmósfera).
  - *UV Medio:* de 0.315 a 0.280 [µm].
  - *UV Cercano:* de 0.400 a 0.315 [µm].

- Espectro visible:

Correspondientes al rango de longitud de onda de los 0.4 a los 0.7 [µm], es la energía que puede ser captada por los ojos humanos dónde se destacan tres bandas de los colores primarios (Chuvieco, 2008):

  - *Azul:* entre los rangos 0.4 a 0.5 [µm].
  - *Verde:* de 0.5 a 0.6 [µm].
  - *Rojo:* de 0.6 a 0.7 [µm].

- Infrarrojo cercano o próximo:

Entre los rangos de 0.7 a 0.13 [µm], de importancia para la eliminación de coberturas vegetales y humedad, es denominado también infrarrojo fotográfico o reflejado (Chuvieco, 2008).

- Infrarrojo medio:

Situados en el rango entre 0.13 a 8 [µm], y necesarios para la estimación de cobertura vegetal y de humedad en la misma, además de altas temperaturas (Chuvieco, 2008).

- Infrarrojo térmico o lejano:

Entre los rangos de 8 a 14 [µm], importante para la detección de calor de los cuerpos en la superficie (Chuvieco, 2008).

- Micro-ondas:

En rangos mayores a 1 [µm], usados por su capacidad de atravesar cubiertas de nubes (Chuvieco, 2008).

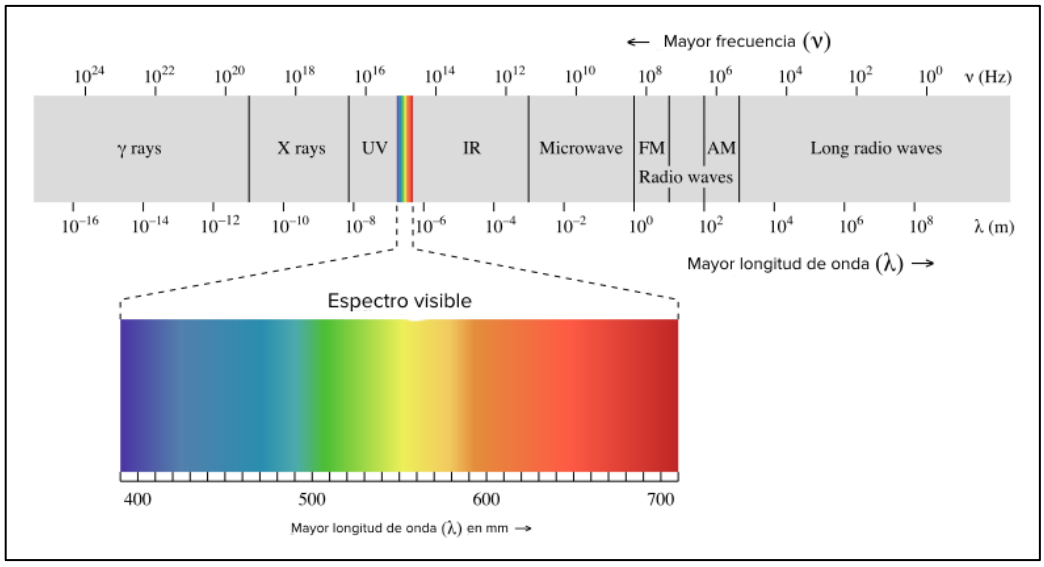



*Ilustración 11: Espectro electromagnético.*

*Fuente: Khan Academy, Introducción a las ondas electromagnéticas (URL: https://es.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum)*

### 8.3.4. Leyes de la radiación electromagnética

Debido al interés de conocer los rangos espectrales de las diferentes cubiertas terrestres, partimos por nombrar las ecuaciones más importantes que representan procesos de la reacción de los elementos en la superficie terrestre con su interacción con la energía emitida por la fuente, y estas son (ver Ecuación 13) (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016):

*Ecuación 13: Emitancia radiativa de un cuerpo negro.*

$$M_{n,\lambda} = \frac{2\pi\, h\, c^2}{\lambda^5 * \left\{exp\left(\frac{h\, c}{\lambda\, k\, T}\right) - 1\right\}}$$

Fórmula basada en la Investigación de Max Planck acerca de la radiación de energía incrementada por la temperatura de todo cuerpo que se encuentre en condiciones superiores al 0 absoluto; donde $M_{n,\lambda}$ es la emitancia radiativa de un cuero negro en una longitud de onda específica, h es la constante de Planck, k es la constante de Boltzmann, c la velocidad de la luz, λ la longitud de onda, y T la temperatura absoluta, la fórmula al ser reemplazada en tanto a los valores de las constantes descritas, resulta en (ver Ecuación 15) (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016):

*Ecuación 14: Emitancia radiativa de un cuerpo negro II.*

$$M_{n,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 * \left\{exp\ \left(\frac{c_2}{\lambda\, T}\right) - 1\right\}}$$

Donde $c_1$ es $3.741 * 10^{-8}$ [W $s^{-2}$ $K^{-4}$], y $c_2$ $1.438 * 10^{-8}$ [W $s^{-2}$ $K^{-4}$].

### 8.3.5. Interacciones entre la radiación electromagnética y la atmósfera

Debido a la estructura química atmosférica de varios compuestos, entre los que se destacan ozono, vapor de agua y el anhídrido carbónico ($CO_2$), se generan repuestas a la radiación electromagnética como (ver Ilustración 12) (Chuvieco, 2008):

- Absorción:

Principalmente por parte de elementos como el $O_2$, el $O_3$, el vapor de agua y el $CO_2$, quienes incapacitan el traspaso de varias longitudes de onda e imposibilitan en varios casos la observación remota y son conocidas como ventanas atmosféricas (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016).

- Dispersión:

Causada por las partículas presentes en la atmósfera y varios gases, estos generan una reflexión extra, generando una disminución de la radiancia directa y un aumento de la difusa, dificultando los procesos de eliminación de dicho error (Chuvieco, 2008).

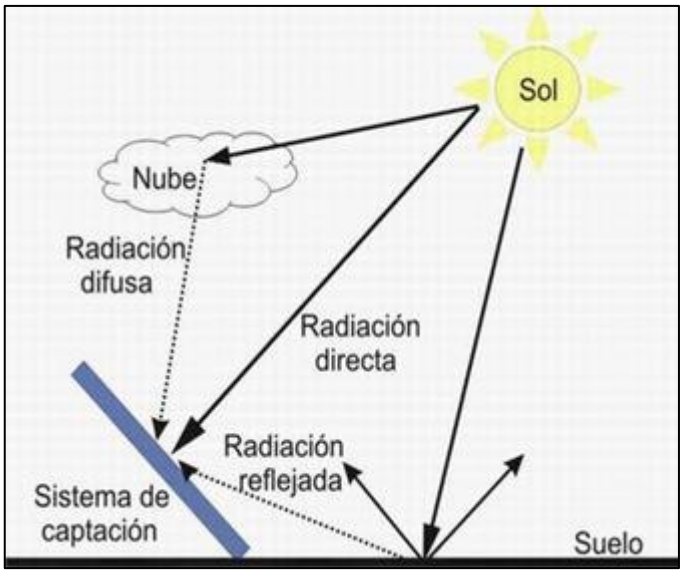



*Ilustración 12: Radiación directa, difusa y reflejada.*
*Fuente: EfiHabitat (URL: https://efihabitat.com/radiacion-directa-difusa-reflejada/).*

- Emisión o transmisión:

Arozarena, Otero, & Ezquerra (2016), y Chuvieco (2008) coinciden en que es un factor utilizado para el cálculo de temperaturas mediante la utilización de las bandas correspondientes al infrarrojo térmico.

### 8.3.6. Tipos de sensores

#### 8.3.6.1. Sensores activos:

Es el conjunto de sistemas sensores que pueden irradiar la energía sobre los objetos de interés en la superficie y a su vez captar la energía de reflexión resultante, caracterizados generalmente por su reducida resolución espectral. Los principales son (Chuvieco, 2008):

- *Radar:* Sensor que trabaja entre longitudes de onda de 0.1 c a 1 m y con baja resolución espacial, se destaca por la posibilidad de trabajar bajo cualquier tipo de condición meteorológica, y se basa operativamente en el efecto Doppler[18].

[18] Variación de la observación por el movimiento relativo entre dos objetos (Chuvieco, 2008).

- *Lidar (Light Detection and Ranging):* Es un sensor capaz de emitir pulsos polarizados láser en longitudes de onda desde el rango UV a Infrarrojo cercano y captando la reflexión esparcida a la atmósfera de los objetos de interés, siendo a su vez un instrumento que puede diferenciar significativamente la información de los elementos estudiados.

8.3.6.2.Sensores pasivos:

Son los sistemas que colectan información electromagnética en la superficie de la tierra en base a la radiación solar reflejada por los objetos de interés o su temperatura (Chuvieco, 2008). Los principales sensores pasivos son:

- *Sensores fotográficos (fotogrametría):* Basadas en la "impresión de un objeto sobre emulsiones fotosensibles en condiciones de exposición específicas", en su gran mayoría utilizan películas en blanco y negro (pancromáticas) para que la diferenciación de los objetos sea más específica, y pueden ser tanto mono o multi-espectrales como ser transportadas en vehículos aéreos o espaciales (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016).

- *Exploradores o rastreadores de barrido:* Dependiendo del número de detectores que posea cada sensor, estos son utilizados principalmente en plataformas espaciales, y se los denomina como sensores óptico-electrónicos por su tipo de detección la cual se vale de espejos móviles en el sensor que captan la radiancia de las cubiertas terrestres, la amplifica y la convierte en señales eléctricas que derivan en valores digitales estructurados (en cada píxel), formando imágenes satelitales (ver Ilustración 13) (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016).

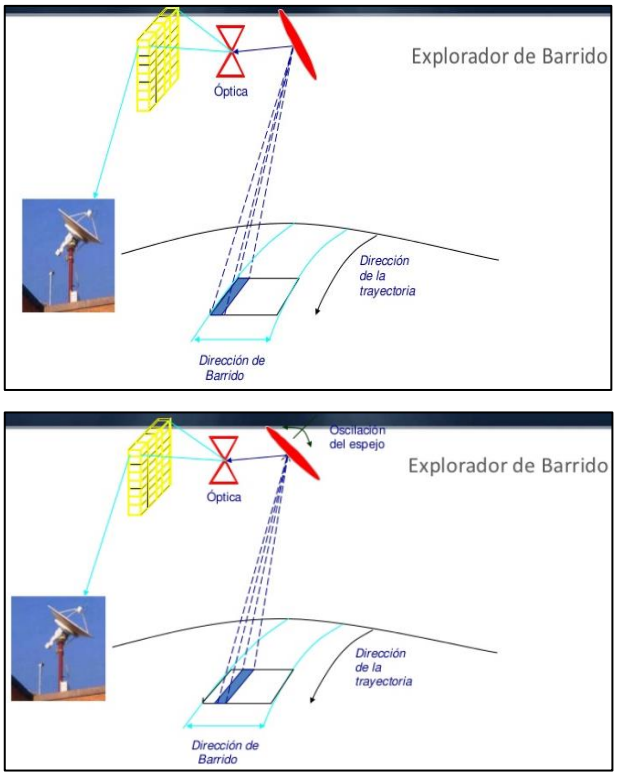



*Ilustración 13: Sensor de barrido.*

*Fuente: Royero G, 2011. Plataformas Satelitales: Procesamiento Digital (URL: https://es.slideshare.net/groyero/mdulo-3-parte-1b)*

- *Exploradores de empuje:* Formando parte igualmente de los sensores óptico-electrónicos, estos excluyen la utilización de espejos móviles sustituyéndolos por cadenas de detectores que cubren todo el campo visual, y posteriormente realizan los mismos procesos de los exploradores de barrido para generación de imágenes satelitales (ver Ilustración 14) (Chuvieco, 2008).

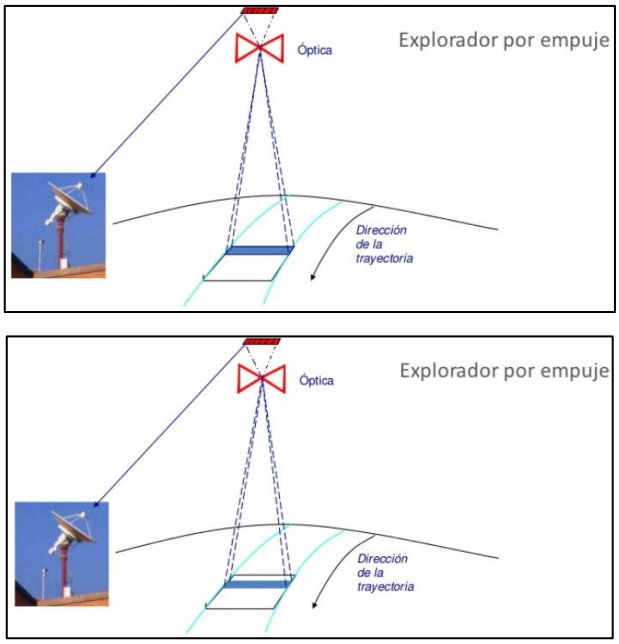



*Ilustración 14: Sensor de empuje.*

*Fuente: Royero G, 2011. Plataformas Satelitales: Procesamiento Digital (URL: https://es.slideshare.net/groyero/mdulo-3-parte-1b)*

- *Cámaras de video:* Utilizada en las primeras misiones de Landsat, es un sensor con capacidad de captación multiespectral o pancromática, donde mediante un foto conductor se crea un duplicado de la imagen original derivada de los haces de electrones de retorno no utilizados en un explorador de barrido, permitiendo calibraciones de imágenes satelitales (Chuvieco, 2008).

- *Radiómetros de micro-ondas:* Sensor con abertura circular que se compone de un receptor (detecta y aumenta las señales), un detector y un elemento direccional, trabajando en longitudes de onda largas (1 – 100 mm) y que descarta las condiciones meteorológicas del entorno, con aplicaciones variadas y específicas como humedad a nivel del suelo o estrés hídrico en plantas (Chuvieco, 2008).

### 8.3.7. Ventajas de la observación espacial

Tomado como complemento a las observaciones con fotografías aéreas o trabajos de campo, la teledetección espacial ofrece ventajas en cuanto a: la periodicidad en la que las imágenes son tomadas, teniendo una cobertura global que permiten el estudio de eventos naturales o

antrópicos dinámicos; una visión más amplia de la superficie, junto con la relativa facilidad de la captación de la información; la capacidad de estudio de información electromagnética en rangos no visibles (resaltando los casos de las temperaturas y radiación de elementos en la superficie); y, que estas poseen un formato digital que puede ser manipulado y estudiado de manera más sencilla (Arozarena A. , 2010).

### 8.3.8. Resolución de los sistemas sensores

Estes & Simonett (1975), citados por Chuvieco (2000), definen el término como la capacidad del conjunto de componentes de un sistema sensor de excluir información de detalle, todo en base a los contrastes entre las signaturas espectrales de los objetos de interés en la superficie, los elementos circundantes y las características inherentes del sistema en sí, dividiendo la resolución en 4 factores que son:

#### 8.3.8.1. Resolución espacial:

Es la expresión que determina el objeto más pequeño distinguible en una imagen exponiendo su nivel de detalle, denominado píxel, que se mide en términos de milímetros en la imagen, equivalentes a metros sobre el terreno. En sensores óptico-electrónicos depende de variables como la altura orbital, la velocidad del instrumento medidor y el número de sensores; por ejemplo, en la misión Landsat 8, cada píxel del canal térmico tiene un tamaño de 100 * 100 metros capturados del terreno (Arozarena A. , 2010). Del mismo modo se puede decir que la resolución espacial se encentra en función del tamaño del pixel (ver Ilustración 15), y debe ser seleccionada por el objeto de estudio de un trabajo de investigación, puesto que en casos de píxeles mixtos (que contengan información de más de una cubierta), el análisis de los límites será errado (Lira, 2011).

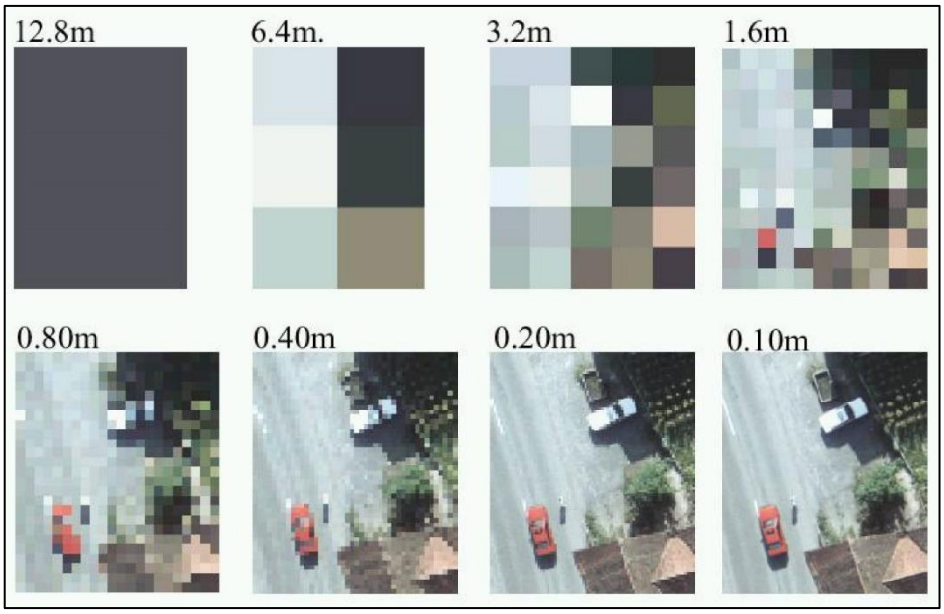



*Ilustración 15: Diferentes resoluciones espaciales de la misma zona en diferentes imágenes. Fuente: Telecentro Regional en Tecnologías Espaciales (URL: http://geoservice.igac.gov.co/contenidos_telecentro/fundamentos_pr-semana2/index.php?id=2).*

8.3.8.2.Resolución espectral:

Es el número y tamaño de bandas espectrales (en base a la porción de longitud de onda que son capaces de captar) que son registradas por un sensor. La información multiespectral es la que mejor podría diferenciar los objetos de interés en la superficie, ya que en tanto el número de bandas disponibles sea mayor y su anchura menor, la combinación de las mimas podrían dilucidad de mejor manera la diferencia de los elementos en la superficie (Chuvieco, 2000). Dicha resolución varía dependiendo del tipo de sensor, siendo los óptico-electrónicos los que tienen resoluciones más altas como es el ejemplo de las 9 bandas disponibles del sensor OLI en la misión Landsat 8 (ver Ilustración 16) (U.S. Geological Survey, Landsat 8, 2018).

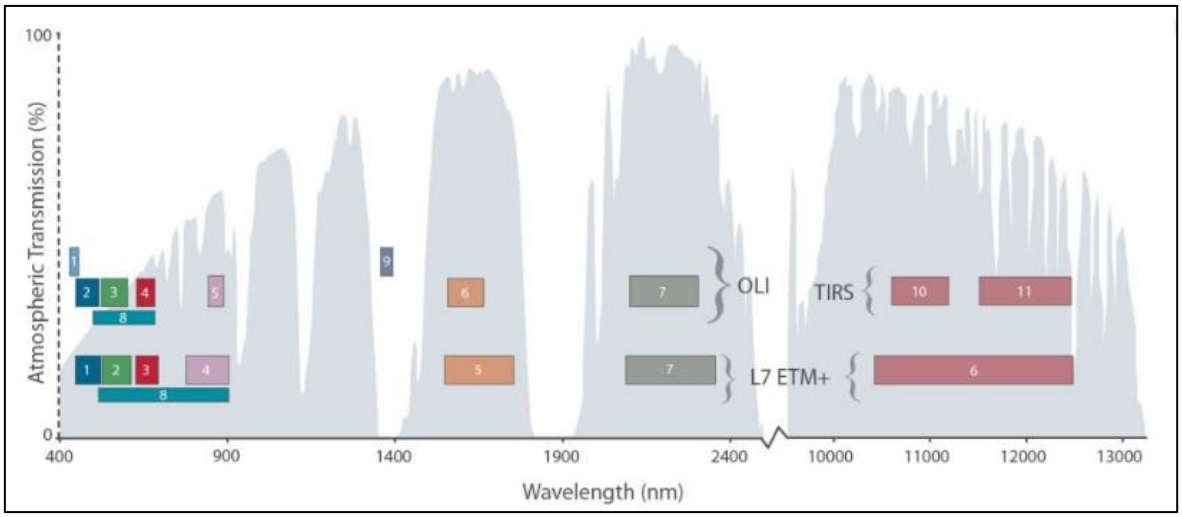



*Ilustración 16: Resolución espectral del sensor OLI/TIRS de la misión Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7. Fuente: (U.S. Geological Survey, Landsat 8, 2018).*

8.3.8.3.Resolución radiométrica (ver Ilustración 17):

Se refiere a la capacidad de un sensor (relativa al objeto de estudio) de detectar las diferentes signaturas espectrales de los objetos observados, todo mediante su codificación en un rango de valores estandarizados, mismos que son asignados a cada píxel de una imagen (Lira, 2011). Los valores de cada píxel varían en función del número de bits disponibles de los píxeles en la imagen, pasando desde el sistema más utilizado de 8 bits con 256 niveles por píxel (rango de 0 a 255 ND[19]), a 4096 niveles para el caso de las imágenes de la misión Landsat 8 (Chuvieco, 2000).

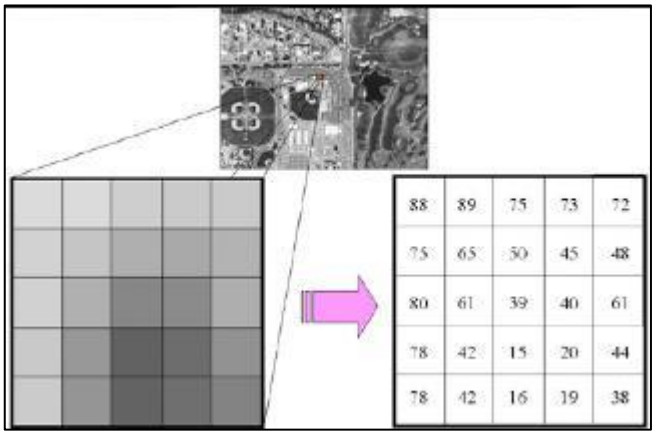



*Ilustración 17: Resolución Radiométrica de una imagen.*

[19] Niveles Digitales.

*Fuente: Revista electrónica "La Otra Opinión" (URL: http://s438316481.onlinehome.us/tecnologia/teledeteccion/poder-de-resolucion-radiometrica/)*

8.3.8.4.Resolución temporal:

Es la frecuencia de captura de información (periodicidad o frecuencia de visita) de un sensor. Esta resolución se encuentra en función del diseño del sistema y de sus características orbitales como la inclinación velocidad y altura en relación a la superficie (ver Ilustración 18) (Chuvieco, 2000).

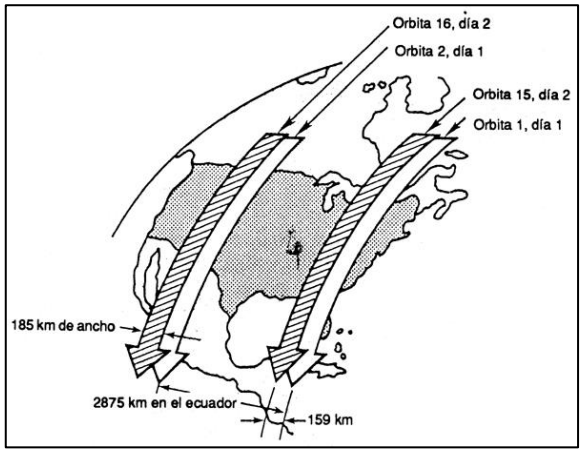



*Ilustración 18: Modelo de exploración Landsat en previas misiones.*
*Fuente: Taranik, 1978. La Telepercepción como fuente de datos. (URL: http://www.fao.org/docrep/003/t0446s/T0446S04.htm).*

A manera de complemento, Arozarena, Otero, & Ezquerra (2016) clasifican los satélites según su tipo de órbita en (ver Ilustración 19):

- *Geoestacionarios (geosíncronos):* Generalmente a alturas de 36000 km, son los que poseen períodos orbitales sincronizados a la velocidad rotativa del planeta, consiguiendo una apariencia relativamente fija. Orbitando bajo ejes ecuatoriales, generan observaciones repetitivas y de resolución espacial baja, destacando los satélites meteorológicos como GOES[20] y ATS[21].

[20] Geostationary Operational Environmental Satellite.

[21] Applications Technology Satellite.

- *Polares (heliosíncronos):* Poseen órbitas generales de dirección norte-sur (circumpolares), a alturas aproximadas de 1000 km, y que gracias a su relación angular entre el sol y el plano orbital, asemejan una órbita en sincronización con el sol. Se caracterizan por poseer períodos pequeños y altas resoluciones espaciales (menos de 100 * 100 m de tamaño de píxel), entre lo que destacan SPOT[22], JERS[23] y Landsat.

- *Órbita general:* A alturas e inclinaciones orbitales relativas a fines específicos y que son utilizados para estudios puntuales, teniendo como ejemplo a Seasat perteneciente a Estados Unidos.

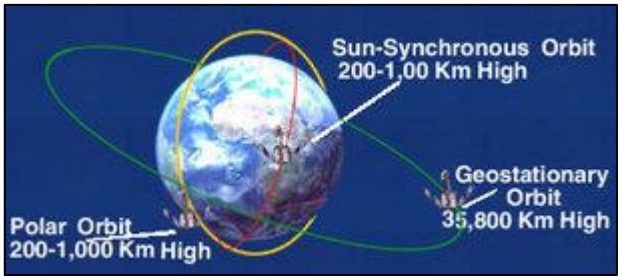



*Ilustración 19: Clasificación orbital de satélites.*
*Fuente: European Space Agency, 2018. (URL: https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Transportation/Types_of_orbits).*

### 8.3.9. Misión Landsat

Sensor pasivo de tipo explorador de barrido que surge gracias a la idea desarrollada en 1965, donde el entonces director de la USGS[24], quien propuso el comienzo de programas satelitales de recopilación de datos de recursos naturales, basándose en los programas Mercury y Gemini. En 1966 finalmente se empezaron los estudios y búsqueda de fondos necesarios para que en 1970 el programa Landsat comience sus operaciones lanzando el primer satélite en 1972 , todo en colaboración con la NASA[25] (Irons, Taylor, & Rocchio, History, 2018).

[22] Satellite Pour l'Observation de la Terre.

[23] Japan Earth Resources Satellite.

[24] U.S. Geological Survey.

[25] National Aeronautics and Space Administration.

#### 8.3.9.1. Misión Landsat 8:

Puesta en órbita en febrero del 2013 a bordo de un cohete Atlas-v401, el satélite toma imágenes alrededor del planeta cada 16 días con un área de barrido de 185 km, ofreciendo: continuidad en la toma de datos. La información a su vez se entrega en formato de 16 bits, con una pronta y sistemática actualización, es gratuita, e incluye calibración geométrica y radiométrica con un margen de error del 5% en términos de reflectancia en la parte superior de la atmósfera (TOA[26]) (Zanter, 2018). Finalmente, el satélite Landsat 8 tiene la capacidad de generar coberturas estacionales de resolución espacial de 30 metros para las bandas visibles NIR[27] y SWIR[28], 100 metros para la banda térmica y 15 metros para la pancromática, (ver Tabla 2) (Irons, Taylor, & Rocchio, Landsat 8, 2018).

*Tabla 2: Bandas y Longitud de Onda - Misión Landsat 8.*

| N° | Nomenclatura de Bandas | Longitud de Onda [µm] |
|---|---|---|
| 1 | Aerosol Costero | 430 – 450 |
| 2 | Azul | 450 – 510 |
| 3 | Verde | 530 – 590 |
| 4 | Rojo | 640 – 670 |
| 5 | Infrarrojo Cercano (NIR) | 850 – 880 |
| 6 | SWIR 1 | 1570 – 1650 |
| 7 | SWIR 2 | 2110 – 2290 |
| 8 | Pancromática | 500 – 680 |
| 9 | Cirrus | 1360 – 1380 |
| 10 | Infrarrojo Térmico (TIRS) 1 | 10600 – 11190 |
| 11 | Infrarrojo Térmico (TIRS) 2 | 11500 – 12510 |

Fuente: (Zanter, 2018)

Como información adicional, varias mejoras y actualizaciones tanto en la respuesta ante los datos "ruido" y una mejora en la cuantificación del rendimiento radiométrico (pasar de 256 niveles de gris a 4096) en un rango dinámico de 12 bits, fueron incluidas en el satélite de la

[26] Top of Atmosphere.

[27] Near-Infrared.

[28] Short-wavelenght infrared.

misión Landsat 8, que cuenta con dos sensores científicos, que comparados con sus previas misiones, son (Irons, Taylor, & Rocchio, Landsat 8, 2018):

- *Operational Land Imager (OLI):* Añade dos bandas espectrales adicionales como la b1 (canal visible azul profundo) para investigación de recursos hídricos y zonas costeras, y la b9 (canal infrarrojo de onda corta) para detección de Cirros (U.S. Geological Survey, 2018).

- *Thermal Infrared Sensor (TIRS):* Sensor que colecta dos bandas para longitudes de onda corta denominados TM y ETM+ (U.S. Geological Survey, 2018).

Por su parte, cada producto adquirido de esta misión incluye los parámetros (U.S. Geological Survey, 2018):

- Formato de salida: GeoTIFF.
- Método de remuestreo: Cubic Concolution (CC).
- Poyección: Universal Transverse Mercator (UTM).
- Datum: World Geodetic System 1984 (WGS84).

E incluidos en el algoritmo de tratamiento de los productos de nivel 1 (Zanter, 2018):

- Procesamiento de datos auxiliares.
- Sensor de generación y proyección LOS.
- Cuadrícula de corrección de entrada y de salida de espacio.
- Remuestreo sistemático de la imagen corregida del terreno.
- Corrección geométrica mediante puntos de control.

### 8.3.10. Imágenes satelitales

Son matrices conformadas por píxeles ordenados en filas y columnas, donde cada uno representa un espacio geográfico en la realidad (Jiménez, 2015). A manera de complemento, Chuvieco (2008) afirma que las imágenes son el resultado de la adquisición de información

radiante de las cubiertas terrestres por un sensor óptico-electrónico y su registro por medio de píxeles; en otras palabras, es una representación visual electrónica de las signaturas espectrales de los elementos que componen una escena.

Cada píxel posee valores numéricos enteros que representan la radiancia detectada para cada banda espectral, que son conocidos como *Niveles Digitales* (ND), visualizados generalmente en niveles de intensidad de color (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016).

Los datos dentro de una imagen se organizan en dimensiones como: coordenadas geográficas, con información tanto en latitud (o norte-sur denominadas *row*) como en longitud (o este-oeste denominadas *column*), y dimensión espectral, todo en formato "Raster" (ver Ilustración 20) (Chuvieco, 2008).

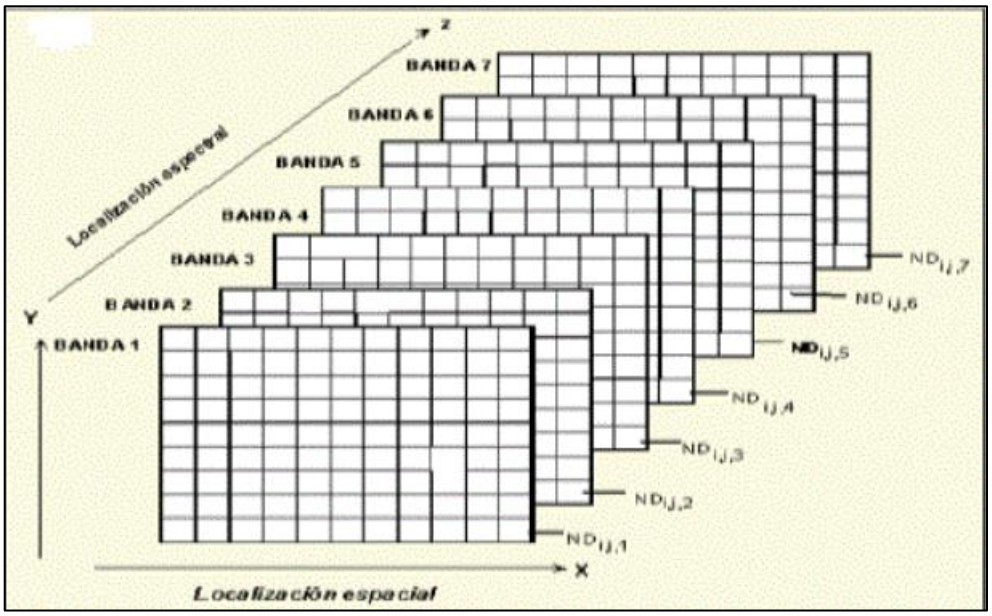



*Ilustración 20: Distribución y clasificación de datos - imagen satelital digital.*

*Fuente: Ramos M, 2017. Tratamientos estadísticos en imágenes de satélite, realces y mejoras visuales, realces radio métrico, espacial y espectral. (URL: http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S0102-03042017000200012&script=sci_arttext&tlng=es)*

8.3.10.1. Tipos de imágenes satelitales:

Según Sánchez (2012), las imágenes se dividen en:

- *Pancromáticas:* La cuales captan un banda en la parte visible del canal infrarrojo cercano y representadas en escala de grises, estas podrían servir para: identificar y medir accidentes geográficos, objetos en la superficie, infraestructuras y sobre todo

en la actualización de mapas al delimitar zonas, medir crecimiento urbano y generar modelos digitales de elevación.

- *Multiespectrales:* Imágenes tomadas por sensores que captan la reflectancia en diferentes longitudes de onda y que posteriormente son combinadas para crear un producto con "color", que dependiendo de su combinación puede distinguir y realzar las diferentes composiciones y límites de los objetos de interés.

- *Hiperespectrales:* Al igual que las multiespectrales, son captadas por sensores que captan la reflectancia en diferentes longitudes de onda, pero en anchos mucho más pequeños y de mayor número, utilizadas para detectar tenues diferencias entre los objetos de interés.

8.3.10.2. Gestión de imágenes satelitales (tratamiento o pre-procesamiento):

Son procesos que pretenden atenuar o eliminar errores presentes en la imagen, en sus coordenadas o en sus niveles digitales, al aproximarlos a condiciones de adquisición adecuados al objeto de estudio (Arozarena A. , 2010). Del mismo modo, Chuvieco (2008), menciona que las principales fuentes de error pueden ser:

- *Distorsiones satelitales:* Producidas por variaciones de altitud, velocidad u orientación de un sistema sensor.

- *Distorsiones terrestres:* En base a la rotación y la curvatura de la tierra.

- *Distorsiones por el sensor:* Debido al movimiento de barrido perpendicular por medio de los espejos móviles, generando desfases panorámicos en los extremos de la imagen, o por falta de calibración.

- *Distorsiones atmosféricas:* Basadas en los componentes químicos estructurales en la atmósfera y sus interacciones con la radiación emitida por el sol, aumentando o atenuando las señales recibidas.

### 8.3.11. Tratamiento digital de imágenes

En respuesta a los factores expuestos anteriormente, existen correcciones básicas para las imágenes satelitales obtenidas, como:

#### 8.3.11.1. Corrección geométrica:

Álvarez & Padilla (2014) la definen como el proceso en el cual se trata de solucionar los errores causados por la georeferenciación en cambios de altitud en la imagen, y se recomienda utilizar cartografía base de escalas iguales o inferiores para solucionarlo. En los últimos años los proveedores de las imágenes incluyen el proceso en el conjunto de datos entregados. El proceso a breves rasgos es realizado en dos pasos: transformación de los píxeles según modelos de deformación, y re-asignación de radiometría optima a cada uno (ver Ilustración 21). Entre los métodos mas utilizados están (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016):

- *Vecino próximo:* Que sustituye el valor por el del píxel más cercano de la imagen previa.

- *Bilineal:* Método que interpola de forma lineal los valores de los píxeles más cercanos de la previa imagen, con riesgo de alteraciones geométricas.

- *Bicúbica:* Siendo el de mejor resultado visual, utiliza generalmente cálculos entre polinomios de 16 píxeles circundantes (4*4) del que se quiere asignar un nuevo valor.

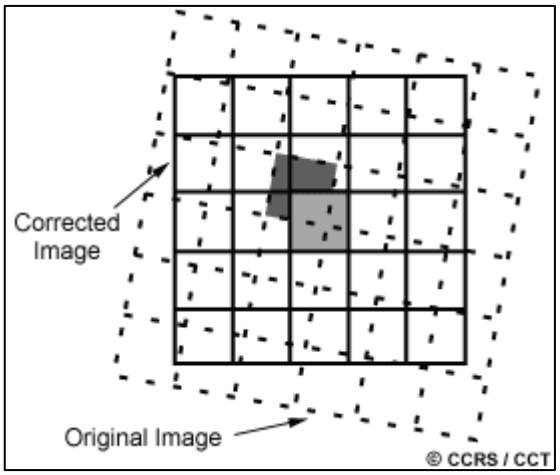



*Ilustración 21: Corrección geométrica de una imagen.*
*Fuente: Williams A, 2016. Geometric Correction. (URL: http://anneliwilliamsgeog338.blogspot.com/2016/04/lab-6-geometric-correction.html).*

8.3.11.2. Corrección radiométrica:

Proceso por el cual se pretende eliminar errores derivados de perturbaciones meteorológicas o malfuncionamientos del sensor (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016). El método general consiste en convertir los niveles digitales de la imagen original a valores de radiancia o reflectancia en el techo de la atmósfera (TOA), y considerando que para el estudio se utilizarán los productos de Landsat 8 OLI/TIRS en 16 bits, las ecuaciones de conversión son (ver Ecuación 15) (Ariza, 2013):

*Ecuación 15: Cálculo de Radiancia Espectral TOA.*

$$L_\lambda = M_L * Q_{CAL} + A_L$$

Donde $L_\lambda$, es dato de radiancia espectral (TOA) [W*m$^{-2}$*srad*µm]; $M_L$, el dato de escalado específico multiplicativo (referido en los metadatos como RADIANCE_MULT_BAND_x[29]); $A_L$, es el dato de escalado específico aditivo (referido en los metadatos como RADIANCE_ADD_BAND_x); y, $Q_{CAL,}$ referente a cada banda, es el producto estándar cuantificado y calibrado en niveles digitales.

Del mismo modo, los niveles digitales bandas del sensor OLI pueden transformarse en valores de reflectancia TOA, mediante la ecuación (ver Ecuación 16):

[29] Número de banda.

*Ecuación 16: Cálculo de Reflectancia TOA - OLI*

$$\rho\lambda' = M_\rho * Q_{CAL} + A_\rho$$

Donde ρλ´, es el dato de reflectancia TOA; $M_\rho$, es la magnitud de escala específica multiplicativa de cada banda (referida en los metadatos como REFLECTANCE_MULT_BAND_x); $A_\rho$, es la magnitud de escala específica aditiva de cada banda (referida en los metadatos como REFLECTANCE_ADD_BAND_x).

Por su parte, la reflectancia real depende del comportamiento atmosférico y el ángulo de observación, por lo que se recomienda una corrección angular al cálculo, basados en la ecuación (ver Ecuación 17):

*Ecuación 17: Cálculo de Reflectancia TOA con corrección angular.*

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos\theta_{SZ}} = \frac{\rho\lambda'}{\sin\theta_{SE}}$$

Donde ρλ es el dato de reflectancia TOA con corrección del ángulo solar; $\theta_{SE}$, es el ángulo de elevación solar (referido en los metadatos como SUN_ELEVATION); y, $\theta_{SZ}$, es el ángulo zenith (90° - $\theta_{SE}$).

Finalmente, al reemplazar la Ecuación 6 en la 5, el valor de reflectancia real TOA con ajuste angular solar de la escena es (ver Ecuación 18):

*Ecuación 18: Cálculo final de Reflectancia TOA con corrección angular.*

$$P\lambda' = \frac{M_\rho * Q_{CAL} + A_\rho}{sin(\theta_{SE})}$$

Donde Pλ´ es el dato definitivo de reflectancia TOA con corrección del ángulo solar; $M_\rho$, es la magnitud de escala específica multiplicativa de cada banda; $Q_{CAL}$, referente a cada banda, es el producto estándar cuantificado y calibrado en niveles digitales; $A_\rho$, es la magnitud de escala específica aditiva de cada banda; y, $\theta_{SE}$, es el ángulo de elevación solar.

8.3.11.3. Corrección topográfica:

Es la disminución de las variaciones causadas por factores topográficos del terreno mediante la utilización de modelos digitales de elevación (Álvarez & Padilla, 2014). Es utilizado principalmente para áreas escarpadas, con fuerte influencia topográfica sobre la señal captada y sobre superficies con datos de reflectancia (posterior a la corrección atmosférica). Existen diferentes métodos desarrollados para eliminar este problema, donde se destacan (Richter, Kellenberger, & Kauffmann, 2009):

- *Método Lambertiano de normalización topográfica.*
- *Método de normalización Minnaert.*
- *Método de normalización C,* relacionado al método Lambertiano pero que considera el ángulo de iluminación local (C).
- *Método Gamma,* que es una modificación del método Lambertiano en función del ángulo solar y del terreno, además del ángulo de vista del sensor sobre un terreno plano.
- *Índice MM,* cuya ecuación modifica al método Minnaert.

8.3.11.4. Corrección atmosférica:

Arozarena, Otero, & Ezquerra (2016) mencionan que previo a la utilización de las imágenes satelitales, existe la nencesidad de disminuir las variaciónes de energía electromagnetica captada debido a factores atmosféricos (causados por ejemplo por nubes, particulas suspendidas, vapor de agua, aerosoles, ozono, oxígeno y $CO_2$). En respuesta a este hecho, existen métodos de corrección atmosférica que evalúan y descartan las distorsiones que son generadas por la atmósfera mediante la utilización de los valores de radiancia o reflectancia de la escena (Chuvieco, 2010). Siendo necesaria para estimaciones biofísicas como la biomasa o volumen del bosque, los métodos de corrección atmosférica pueden ser clasificados en: modelos basados en componentes físicos (Physically based models), métodos de calibración relativos, y substracción el píxel negro basado en la imagen (image-based DOS[30]) (Cui, et al., 2014).

Los modelos basados en componentes físicos (o de corrección atmosférica absoluta) ofrecen alta precisión de reflectancia en la superficie, pero tienen un alto nivel de complejidad,

[30] Dark Object Subtraction.

además de la necesidad de datos tanto medidos en el campo como atmosféricos del momento de captura de la imagen; entre estas metodologías se destacan (Cui, et al., 2014):

- *6S* (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum).
- *MODTRAN* (Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model).
- *LOWTRAN* (atmospheric absorption extinction, scatter and irradiance model).

Por otro lado, los modelos de calibración relativa son menos complejos, pero por consiguiente se consideran más inexactos y no tan recomendados para análisis cuantitativos; entre ellos se destacan (Mausel, Brondizio, & Moran, 2002):

- *Ajuste del histograma* (Histogram Adjustement).
- *Substracción del píxel negro* (Dark-pixel subtraction)
- *Normalización multi-temporal con enfoque de regresión* (Multi-date normalisation with regression model approach).

Finalmente, Cui, et al.(2014) describen el modelo DOS como un proceso confiabilidad intermedia el cual asume que el impacto de la atmósfera es uniforme sobre toda el área de estudio además de la existencia del "objeto negro[31]". Entre los requerimientos de la ecuación DOS, basados en los metadatos y medidas de la imagen son: fecha de adquisición de la imagen, ángulo de elevación solar, y datos de ganancia y sesgo (gain and bias) (Cui, et al., 2014). Teniendo varias posibilidades de interpretación, tomamos como ejemplo una ecuación DOS, basada en las máximas y mínimas radiancias espectrales de cada banda siendo esta (ver Ecuación 19) (Mausel, Brondizio, & Moran, 2002):

*Ecuación 19: Corrección Atmosférica OLI - DOS.*

$$L_{\lambda Sensor} = \frac{(L_{\lambda max} - L_{\lambda min})}{L_{\lambda range}} * DN_{\lambda} + L_{\lambda min}$$

[31] Píxeles con valores de reflectancia mínimos o de 0 (Gilmore, Saleem, & Dewan, 2015).

Donde $L_{\lambda Sensor,}$ es el valor de la radiancia espectral corregida de una banda específica; $L_{\lambda rmax,}$ es el valor de radiancia espectral máximo escalado de los niveles digitales de la banda (ND o DN); $L_{\lambda min,}$ es el valor de radiancia espectral mínimo escalado de los niveles digitales de la banda (ND o DN); y, $DN_{\lambda,}$ es el nivel digital original de la banda.

*8.3.11.4.1. Corrección atmosférica para bandas OLI – Landsat 8:*

Para términos de la disertación, y gracias a la capacidad del software ENVI 5.1 y los productos de Landsar 8 de convertir los niveles digitales de las bandas capturadas por el sensor OLI directamente a datos de reflectancia TOA, se optó por la utilización del método "Dark-pixel subtraction", mismo que no requirió de información atmosférica de la escena y se basó en la eliminación del valor mínimo de reflectancia de las bandas combinadas OLI (Aguilar, Mora, & Vargas, 2014).

Álvarez & Padilla (2014), resumen la ecuación como (ver Ecuación 20):

*Ecuación 20: Corrección Atmosférica OLI - Dark-pixel subtraction.*

$$R_{atm\ i,j,k} = \rho TOA_{i,j,k} - \rho TOA_{min,k}$$

Donde $R_{atm\ i,j,k}$, es el valor de reflectancia corregido atmosféricamente; $\rho TOA_{i,j,k}$, es el dígito de reflectancia de cada banda, resultante de la previa corrección radiométrica realizada; y, $\rho TOA_{min,k}$, es el dato de reflectancia mínima de cada banda, mismo que es obtenido en el análisis del histograma de las imágenes combinadas.

*8.3.11.4.2. Corrección atmosférica para bandas TIRS (Termales) – Landsat 8:*

Por otra parte, la señal emitida por las cubiertas en la escena es distorsionada al ser capturada por el sensor termal debido a las interferencias atmosféricas, por lo que es necesario un proceso de corrección de las bandas que capturan estas longitudes de onda.

La disertación utilizó el método de transferencia radiativa desarrollado por Barsi, Schott, Palluconi, & Hook (2005) para los productos de Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+, donde la ecuación tuvo requerimientos de información como: el valor de la emisividad de la superficie analizada o el objeto de interés, la radiancia de las bandas térmicas (resultantes de la corrección radiométrica), y datos en función del momento de la captura de la imagen como los de la radiancia ascendente y descendente de la atmósfera y su transferencia radiativa

(transmisividad). La ecuación de corrección atmosférica termal es (ver Ecuación 21) (Barsi, Schott, Palluconi, & Hook, 2005):

*Ecuación 21: Corrección Atmosférica bandas TIRS - Landsat 8.*

$$L_{TOA} = \tau * \varepsilon * L_{\lambda} + L_{\uparrow} + \tau(1 - \varepsilon) * L_{\downarrow}$$

En donde $L_{TOA}$ es el dato resultante corregido atmosféricamente de radiancias TOA para bandas termales; $\tau$ es el valor de transmisividad atmosférica; $\varepsilon$ es el valor de emisividad específica de los objetos de interés en la escena; $L_{\lambda}$ es la radiancia relativa de las bandas térmicas; y, $L_{\uparrow}$ & $L_{\downarrow}$ son los valores de la radiancia atmosférica ascendente y descendente del momento de la captura de la imagen respectivamente.

Los valores de transmisividad y radiancia ascendente y descendente de la atmósfera son calculados por la "calculadora de parámetros de corrección atmosférica" (Atmospheric Correction Parameter Calculator) desarrollada por la NASA principalmente para productos de Landsat 5, 7 y 8; mediante la entrada de varios parámetros (ver Ilustración 22) propios de cada imagen satelital (Markam, 2018).

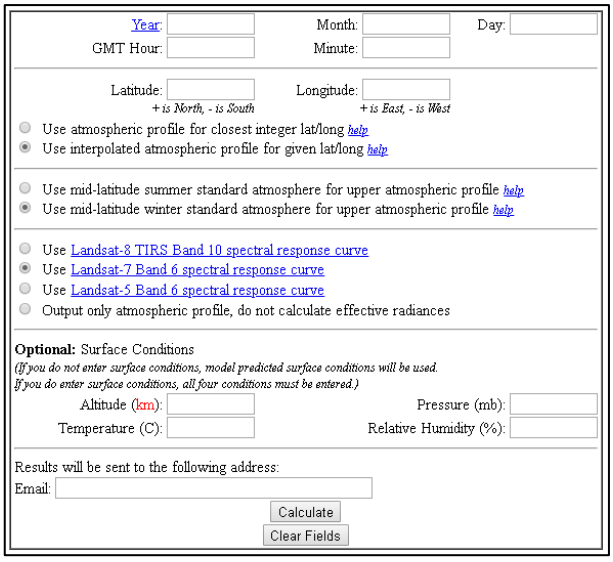



*Ilustración 22: Atmospheric Correction Parameter Calculator.*
*Fuente: NASA (2018) (URL: https://atmcorr.gsfc.nasa.gov./ ).*

8.3.11.4.2.1. Emisividad (ε):

Para realizar la corrección atmosférica de las bandas termales se necesitó calcular la emisividad de la escena, la cual es el grado de similitud entre la emitancia de un objeto y la que tendría un cuerpo negro, si estos estuvieran en las mismas condiciones de temperatura (Chuvieco, 2008). En otras palabras es la porción de energía radiada por superficies naturales dividido para la energía emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura (Thi, Xuan, & Yhi, 2017).

Existen tres ecuaciones diferentes para el cálculo de la emisividad, más gracias a que la zona de estudio posee superficies tanto de tierra como de vegetación, se tomó en cuenta solo la siguiente fórmula. Siendo la emisividad la eficiencia de transmisión de energía térmica a través de la superficie hacia la atmósfera, la ecuación condicionada es (ver Ecuación 22) (Avdan & Jovanovska, 2016):

*Ecuación 22: Cálculo de emisividad de la superficie terrestre.*

$$\varepsilon = \varepsilon_{V\lambda} P_V + \varepsilon_{S\lambda} * (1 - P_V) + C_\lambda,$$

Donde:

- ε representa al valor de la emisividad en la superficie terrestre.
- $\varepsilon_{V\lambda}$, es la emisividad de la vegetación. A nivel general esta posee valores promedio de 0.952 para pasto seco, 0.983 para árboles, 0.985 para pasto verde y arbustos, y 0.985 de manera global (Chuvieco, 2010).
- $\varepsilon_{S\lambda}$ es la emisividad del suelo. A nivel general esta posee valores promedio de 0.968 para suelo arenoso, 0.972 suelo calizo y 0.974 para arcillas, y 0.96 de manera global (Chuvieco, 2010).
- $P_V$ es la proporción de la vegetación. Calculada posteriormente (ver Ecuación 26).
- $C_{\lambda'}$ es la constante de rugosidad de la superficie. Puede tener valores de 0 para superficies homogéneas y planas y de 0.005 de manera general si no se conoce el factor (Avdan & Jovanovska, 2016).

### 8.3.12. Cálculo de índices ambientales

Una vez corregidas las imágenes satelitales, existen varios datos que pueden ser derivados de las imágenes satelitales, siendo los concernientes a la presente disertación, los siguientes:

8.3.12.1. Temperatura superficial (LST[32]):

Definido por Avdan & Jovanovska (2016) como la temperatura de la superficie del suelo que podría ser percibida con las piel. La LST es un aspecto muy importante ya que de él se pueden derivar esudios de clambio climático, hidrológicos, de agricultura, entre otros. En otras palabras es la temperatura radiativa de la superficie terrestre medida en la dirección del sensor remoto, y se calcula a partir de la temperatura de brillo de la parte superior de la atmósfera (de los canales infrarrojos), y dependiendo del albedo, la humedad del suelo y la cobertura vegetal (Copernicus Global Land Service, 2017).

El cálculo del LST posee varios métodos de medición, pero el elegido para la disertación fue el método descrito por Avdan & Jovanovska (2016) que requirió tanto correcciones radiométricas como atmosféricas y varios parámetros necesarios (ver Ilustración 22), y la ecuación es:

*Ecuación 23: Cálculo de Temperatura Superficial.*

$$LST = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda * \frac{T_B}{\rho}\right) * ln\,(\varepsilon)}$$

Donde:

- LST es la temperatura superficial medida en grados Kelvin [K].
- $T_B$ es la temperatura de brillo calculada por una banda termal (ver Ecuación 27).
- $\lambda$ es el valor de radiancia corregido atmosfpericamente de la banda termal utilizada en el cálculo de la temperatura de brillo longitud de onda medida de la banda termal considerada.
- $\varepsilon$ es la emisividad calculada de la superficie (ver Ecuación 22).
- $\rho$ es factor considerado en la ecuación (ver Ecuación 24) (Avdan & Jovanovska, 2016):

.

[32] Land Surface Temperature.

*Ecuación 24: Cálculo del factor p.*

$$\rho = h * \frac{c}{\sigma}$$

Donde c es la velocidad de la luz ($2.998*10^{8}$ [m/s]); h es la constante de Planck ($6.626*10_{-34}$ [J s]); y, σ es la constante de Boltzmann ($1.38*10^{-23}$ [J/K]); resultando en un factor ρ de $1.438*10^{-2}$ [m K], o en otros términos 14380 [µm K] (usado en el cálculo).

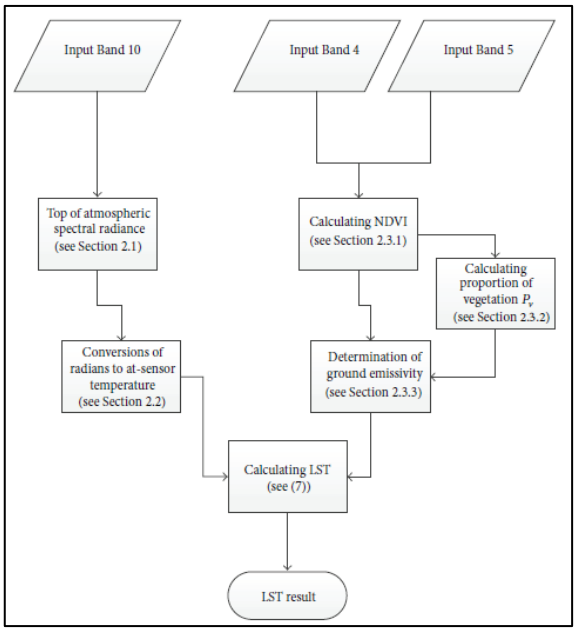



*Ilustración 23: Diagrama e flujo para el cálculo de LST.*
*Fuente: (Avdan & Jovanovska, 2016)*

8.3.12.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI[33]):

Es un índice o indicador utilizado para inferir condiciones de desarrollo de la vegetación importantes como su proporción y calidad. Se lo realiza bajo la utilización de bandas tanto el espectro visible como en el infrarrojo cercano (Chuvieco, 2008). La ecuación para su cálculo es (ver Ecuación 25) (Avdan & Jovanovska, 2016):

*Ecuación 25: Cálculo de NDVI*

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

[33] Normalized Difference Vegetation Index

Donde NIR corresponde a los valores de reflectancia corregidos atmosféricamente de la banda del infrarrojo cercano (Banda 5); y, VIS son los valores de reflectancia corregidos atmosféricamente del canal rojo visible (Banda 4).

#### 8.3.12.3. Índice de proporción de la vegetación ($P_V$):

Es el índice utilizado para medir la fracción de vegetación y se modifica dependiendo del clima y el uso del suelo (Burgos & Copo, 2017). El cálculo de la Pv se lo realiza mediante la ecuación (ver Ecuación 26) (Avdan & Jovanovska, 2016):

*Ecuación 26: Cálculo de la Proporción de la vegetación - Pv.*

$$PV = \left[\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s}\right]^2$$

Donde $NDVI_S$ es el valor de NDVI correspondiente a la vegetación; y, $NDVI_V$ es el valor de NDVI correspondiente al suelo. Avdan & Jovanovska (2016), sugieren tomar valores estandarizados correspondientes a 0.5 para vegetación y 0.2 para suelo.

#### 8.3.12.4. Temperatura de brillo (TB):

Es una medida del resplandor de la radiación de microondas que viaja hacia arriba desde la parte superior de la atmósfera terrestre (Remote Sensing Systems, 2017). En base al estudio realizado, las bandas del sensor TIRS fueron convertidas directamente de valores de radiancia a temperatura de brillo en grados Kelvin [K], bajo la fórmula (ver Ecuación 27) (Ariza, 2013):

*Ecuación 27: Cálculo de la Temperatura de Brillo.*

$$TB = \frac{K_2}{ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Donde TB es la temperatura de brillo en grados Kelvin [K]; $L_\lambda$, es la reflectancia TOA corregida radiométricamente; y, $K_1$ y $K_2$ son constantes de calibración de las bandas térmicas 10 y 11 (referidas en los metadatos como K1_CONSTANT_BAND_x y K1_CONSTANT_BAND_x).

- Tanto la temperatura de brillo resultante como la temperatura superficial fueron calculadas en grados Kelvin, para lo cual se realizó en calculadoras de mapas la suma del "0 absoluto" (−273.15 ∘C), que transformó los resultados a grados Celsius.

#### 8.3.12.5. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI[34]):

Ya que existe una inestabilidad de las estimaciones del índice NDVI, el presente índice se presenta como un mejoramiento que contabiliza la disminución diferencial de energía en los canales rojo e infrarrojo cercano debido al dosel de la vegetación , mediante la minimización de la influencia del brillo del sol en base al NDVI (Huete, 1988). El cálculo es (ver Ecuación 28) (Álvarez & Padilla, 2014):

*Ecuación 28: Cálculo del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo – SAVI.*

$$SAVI = \left[\frac{NIR - R}{NIR + R + L}\right] * (1 + L)$$

Donde NIR es la banda de reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al canal infrarrojo cercano (Banda 5); R es la banda de reflectancia corregida atmosféricamente del canal rojo visible (Banda 4); y, L es el coeficiente de ajuste de la vegetación, equivalente a 0,5 (Huete, 1988).

#### 8.3.12.6. Índice de Diferencia Normalizada de Suelos (NSI):

Referido por Álvarez & Padilla (2014) como el índice o indicador que resalta áreas antropogénicas y suelos sin cobertura, su cálculo se basa en la ecuación (ver Ecuación 29):

*Ecuación 29: Cálculo del Índice de Diferencia Normalizada de Suelos – NSI.*

$$NSI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR1 + NIR}$$

Donde SWIR es la banda de reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al canal infrarrojo de onda corta 1 (Banda 6); y, NIR es la banda de reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al canal infrarrojo cercano (Banda 5).

[34] Soil-Adjusted Vegetation Index.

### 8.3.13. Software ENVI (Versión 5.1)

Es un programa capaz de visualizar, manipular, estudiar y derivar información temática de imágenes digitales (tanto multiespectrales, hiperespectrales como de radar) bajo herramientas avanzadas capaces de realizar: análisis espectrales y de terreno, correcciones geométricas, capacidad de manipulación de raster y vector; todo bajo el lenguaje de programación IDL (Interactive Data Language) (Unidad Ejecutora: Gestión de Proyectos Sectoriales, 2018). La versión 5.1 en función de los productos de la misión Landsat 8, añade a sus funciones la capacidad de (Alonzo, 2013):

- Leer los coeficientes de las bandas de infrarrojo térmico (K1 y K2) directamente de los archivos de metadatos asociados.
- Las bandas Cirrus y de calidad (Quality) se listan como dos bandas separadas en el Administrador de datos y de capas.
- Las ganancias y compensaciones de reflectancia se corrigen automáticamente en cuanto a la elevación solar.
- La herramienta de corrección atmosférica FLAASH®[35] trabaja con datos Landsat 8.

[35] Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes.

## 8.4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA:

Es una solución tecnológica que, de manera visual, permite capturar, analizar, gestionar e interpretar datos con un componente geográfico para descubrir las relaciones o tendencias que ayudan a tomar mejores decisiones en el espacio (ESRI España, 2017). En otras palabras, es un sistema informático automatizado para la manipulación y estudio de datos relacionados a coordenadas en la superficie terrestre (National Geographic, 2018).

El objetivo principal de los SIG se centra en la resolución de los problemas socio-espaciales de intereses interdisciplinarios (Buzai, 2008).

### 8.4.1. Tipos de datos

#### 8.4.1.1. Vectorial (formato):

Objetos tipo punto, línea o polígono que poseen información sobre elementos reales tales como tamaño, localización y relaciones espaciales del mismo (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016).

#### 8.4.1.2. Raster (formato):

Elementos de la superficie representados en una o varias celdas encadenadas y sin espacios entre ellas con diferentes valores digitales (píxeles) (Buzai, 2008).

### 8.4.2. Cartografía

Es el conjunto de información y procesos científicos tanto artísticos como técnicos que pretenden representar tanto zonas de interés como fenómenos visibles e invisibles por medio de la recolección de información visual o de la exploración documental (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016).

En otras palabras la cartografía se define como una ciencia que representa y describe eventos naturales por medio de modelos simbólicos que permitan comprender de una mejor manera los fenómenos (Suárez, 2014).

8.4.2.1..Sistemas de referencia:

*8.4.2.1.1. Astronómicos y geodésicos:*

Son los que se encuentran basados en requerimientos estructurales de la información como lo son las coordenadas (puntos físicamente estables) inherentes de cada objeto de estudio, aspecto que se vale de las diferentes redes geodésicas mundiales para su normalización (Arozarena, Otero, & Ezquerra, 2016).

*8.4.2.1.2. Datos referenciales:*

Arozarena, Otero, & Ezquerra (2016) consideran acomo término de interés a:

- Geoide: Superficie ideal terrestre bajo criterios matemáticos independiente de la escena real de la superficie.

- Elipsoide: Aparente forma matemática de la Tierra.

- Datum: Red de vértices donde coinciden los puntos de los diferentes modelos de Geoide y Elipsoide.

8.4.2.2.Elementos cartográficos:

Para facilitar el entendimiento y traspaso de la información, la cartografía temática debe poseer elementos básicos como (Buzai, 2008):

- *Título.*
- *Extensión del área de estudio.*
- *Norte.*
- *Proyección.*
- *Escala.*

### 8.4.3. ArcGIS (Versión 10.4.1)

Es un sistema que organiza, gestiona, analiza y distribuye información geográfica que será utilizada en diferentes propósitos tanto técnicos como interactivos, apoyando la resolución de dificultades espaciales, toma de decisiones, planificación, control de cambios, y rapidez en el traspaso de información (ESRI, 2018).

#### 8.4.3.1. Herramientas:

- *Spatial Analyst:* Herramientas para el análisis espacial de datos que permite derivar información nueva de las variables analizadas, como ubicaciones óptimas e interpolaciones (ESRI, 2016).

- *3D Analyst:* Herramienta tridimensional de análisis de datos SIG (ESRI, 2016).

- *Geostatistical Analyst:* Herramientas que constan de las diferentes metodologías estadísticas aplicadas a la geografía (ESRI, 2016).

- *Network Analyst:* Herramienta que une análisis en rutas (ESRI, 2016).

#### 8.4.3.2. Métodos de interpolación:

Son los conjuntos de procesos geoestadísticos que buscan predecir nuevos valores para las celdas de una archivo tipo Raster georreferenciado, en función de una determinada cantidad de puntos con datos reales (ESRI, 2016).

##### *8.4.3.2.1. Ponderación de distancia inversa (IDW):*

Es un método de interpolación que calcula datos de las celdas bajo el promedio de los datos contenidas en las celdas adyacentes y su cercanía (ESRI, 2016).

##### *8.4.3.2.2. Kriging:*

ESRI (2016) lo describe como proceso avanzado geoestadístico el cual genera un modelamiento en base a un conjunto de puntos dispersados con valores z que requiere un análisis profundo de fondo del comportamiento espacial del objeto de estudio en base los valores z.

## 9. MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN

La investigación se direccionó bajo la corriente Posibilista Geográfica, desarrollada por Vidal de la Blache en 1834, que establece el enfoque de las investigaciones hacia la relación entre el medio ambiente y el hombre, donde se toma al ser humano como agente geográfico, es decir, que este posee la capacidad de modificar su entorno y, al mismo tiempo, elegir entre diversas opciones basadas en el mejoramiento de sus técnicas de aprovechamiento (Delgado, 2006). Por su parte, la disertación se definió como un estudio de caso, debido a su carácter puntual en un área de estudio donde se realizó el modelamiento de ciertos contaminantes criterio atmosféricos dentro de la zona urbanas del DMQ pretendiendo brindar metodologías de análisis válidos ante posibles eventos futuros (Tecnológico de Monterrey, s.f.). Finalmente, utilizó métodos cuantitativos, haciendo uso de técnicas estadísticas para llegar a la comprensión del comportamiento de un aspecto de interés en la zona estudiada (Hueso & Cascant, 2012).

# CAPÍTULO III
# CÁLCULO DE ÍNDICES AMBIENTALES – IMÁGENES SATELITALES

Primeramente, el área de estudio seleccionada fue la zona urbana del DMQ, determinada por las parroquias en las cuales confluyen factores como: área urbana clasificada bajo los parámetros descritos en el PUOS[36] del DQM al 2016; y la cercanía a las estaciones de la REMMAQ (ver Anexo 2). Por su parte, el mes de julio fue tomado en cuenta por ser parte de la época de estiaje, que cuenta con un alta incidencia en incendios forestales[37], es decir eventos que liberan contaminantes como dióxido de carbono ($CO_2$), monóxido de carbono (CO), metano ($CH_4$), hidrocarbonos (HC), y partículas de diferente diámetro.

## 10. RECOPILACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

Para iniciar la disertación se utilizó la plataforma en línea denominada EarthExplorer[38], misma que se basa en datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Dentro de ella se especificaron puntos de ubicación visual de la zona urbana del DMQ (ver Ilustración 24), que correspondieron a la sección path 10 y row 60 en los parámetros del sistema de referencia mundial (WRS[39]) con el que trabaja la USGS, siendo WRS-2 la correspondiente a las misiones 1 y 8 de Landsat.

La temporalidad seleccionada tuvo un inicio el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2015, dónde a su vez se tomó en cuenta los meses de abril a noviembre correspondientes a la época de estiaje en el Ecuador, con especial interés en el mes de julio de cada año. No se especificaron criterios de nubosidad en la recopilación de datos inicial debido a que la zona de estudio podría o no tener una visualización óptima dentro de una imagen con un porcentaje total de nubosidad alto.

[36] Plan de Uso y Ocupación del Suelo.

[37] Proceso de combustión de biomasa, con un factor de emisión de gases y partículas con un alto grado de dificultad de estimación debido a la complejidad de la composición química de la vegetación.

[38] https://earthexplorer.usgs.gov/

[39] Worldwide Reference System.

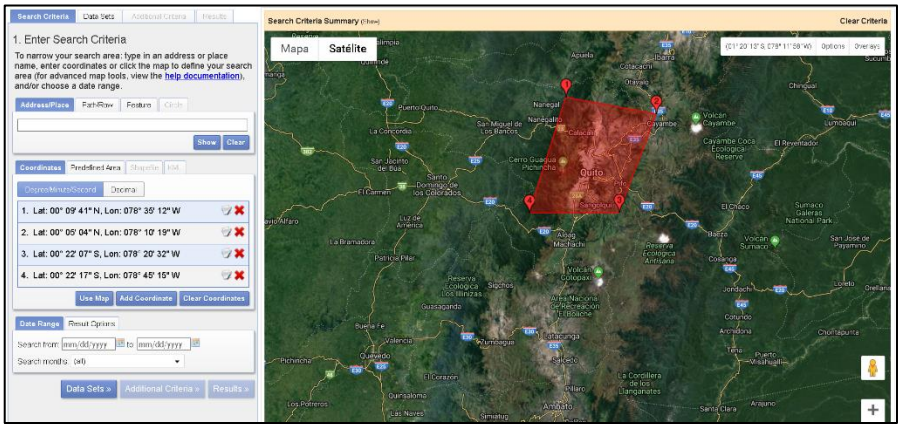



*Ilustración 24: Visualizador EarthExplorer – "Search Criteria".*
*Fuente: Earth Explorer, 2018. (URL: https://earthexplorer.usgs.gov/).*

Posteriormente, las imágenes seleccionadas fueron las disponibles en los set de datos (Data Sets) de la pestaña "Landsat", sección "Landsat Collection 1 Level 1" y subsección "Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1" (ver Ilustración 25).

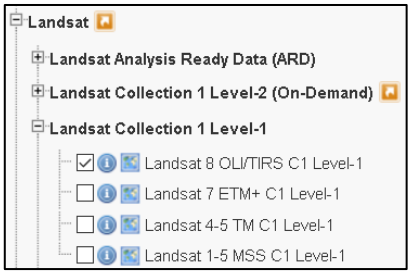



*Ilustración 25: Visualizador EarthExplorer – Data Sets. Fuente: Earth Explorer, 2018. (URL: https://earthexplorer.usgs.gov/).*

Mediante una clasificación visual inicial básica, se seleccionó 6 imágenes en la zona de estudio en la temporalidad correspondiente (ver Tabla 3).

*Tabla 3: Imágenes Satelitales disponibles.*

| Nomenclatura de la Imagen | Fecha de la toma | Hora de toma | Latitud del punto central | Longitud del punto central |
|---|---|---|---|---|
| *LC08_L1TP_010060_20130707_20170504_01_T1* | 7/7/2013 | 15:28:17 | 0.00012 | -78.48087 |
| *LC08_L1TP_010060_20130723_20170503_01_T1* | 23/7/2013 | 15:28:16 | -0.00013 | -78.47138 |
| *LC08_L1TP_010060_20140710_20170421_01_T1* | 10/7/2014 | 15:26:09 | -0.00018 | -78.48091 |
| *LC08_L1TP_010060_20140726_20170420_01_T1* | 26/7/2014 | 15:26:12 | 0.00001 | -78.46818 |
| *LC08_L1TP_010060_20150713_20170407_01_T1* | 13/7/2015 | 15:25:50 | 0.00008 | -78.49204 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| *LC08_L1GT_010060_20150729_20170406_01_T2* | 29/7/2015 | 15:22:21 | 0.00016 | -78.47935 |

Luego, para la manipulación de las imágenes satelitales, se descargó el software ENVI en su versión 5.1, junto a sus licencias correspondientes, además del software ArcGIS en versión 10.4.1. En este último, se realizó la delimitación de la zona de estudio, basados en el uso de capas vectoriales y de puntos (ver Tabla 4).

*Tabla 4: Shapefiles base.*

| **Capas** | **Fuentes** | **Tipo** |
|---|---|---|
| Concentración de Contaminantes | Geoportal del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito | Puntos |
| Zonas Urbanas PUOS | Geoportal del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito | Líneas |
| División Cantonal Pichincha | Instituto Nacional de Estadística y Censos | Líneas |
| Estaciones REMMAQ | Realizado en base a la capa "Concentración de Contaminantes" seleccionando las estaciones principales de la REMMAQ (RAUTO). | Puntos |
| Modelo Digital de Terreno del Ecuador !:50000 | Instituto Nacional de Estadística y Censos | Raster |

*Las coordenadas base para todo el estudio a partir de ahora serán WGS 1984, Zona 17 norte en el sistema Universal Transverse Mercator (*WGS1984_UTM_17N*), y del mismo modo para todo cálculo e ingreso de datos se seleccionará la opción de punto flotante (*Float Point*), la cual considera resultados con todos los números decimales disponibles, en función de conservar los resultados lo más cercanos posibles a la realidad.

En cuanto al área de estudio total y área para correcciones atmosféricas, se escogieron primeramente parroquias que: contengan zonas urbanas dentro de ellas (ver Anexo 1), y también que se encuentren cerca de las 9 estaciones de la REMMAQ (ver Anexo 2) mediante el uso de la herramienta “Select by Attributes”, resultando en 40 parroquias alrededor del DMQ.

El área total (ver Ilustración 26) fue de 97,23 [$km^2$], y posterior a su delimitación bajo la herramienta “Union”, las ahora denominadas parroquias urbanas, formaron una máscara que sirvió de base para los análisis posteriores.

Asimismo, para la corrección de imágenes satelitales, la cual necesitó de un área un poco mayor a la zona de estudio (para evitar dejar de lado datos valiosos que puedan ser modificados por las correcciones), se digitalizó un área circundante en forma de rectángulo,

denominada “área de corrección”, que fue tomada como máscara para las etapas posteriores de pre-procesamiento (ver Ilustración 26).

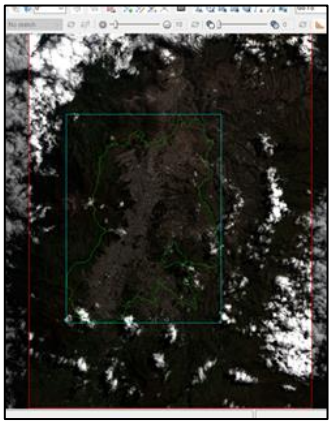


*Ilustración 26: Máscaras “Área de Estudio” (verde) y “Área de Corrección” (Roja).*

Como último paso, y mediante la utilización de las máscaras mencionadas, se descartó las imágenes satelitales que puedan tener una cobertura nubosa alta sobre la zona de interés (Ver Ilustración 27), preponderando condiciones de capacidad visual de por lo menos el 75%. Las imágenes resultantes fueron las de los días 07 de julio de 2013, 10 de julio de 2014 y 13 de julio de 2015 (ver Tabla 5).

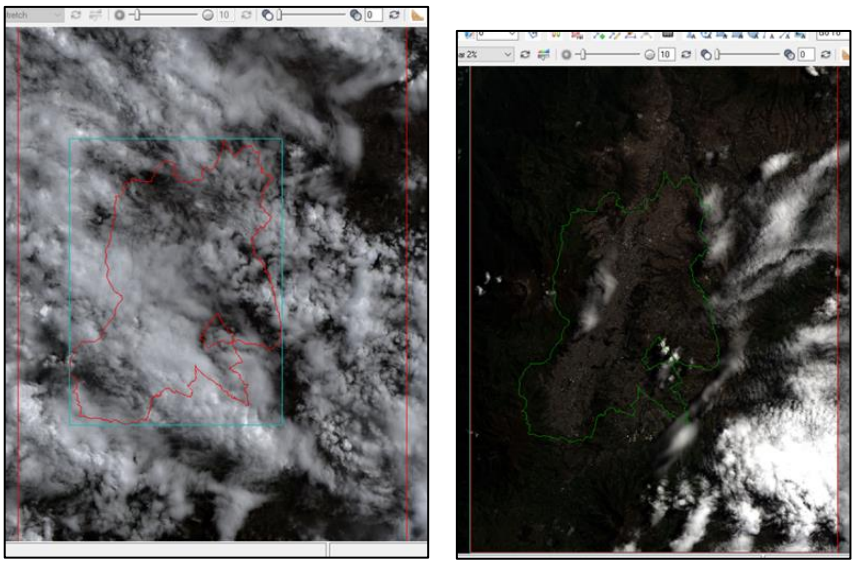


*Ilustración 27: Comparación de capacidades visuales entre imágenes.*

*Tabla 5: Selección de imágenes por capacidad visual.*

| | ***Cobertura Nubosa [%]*** |
|---|---|

| Nomenclatura de la Imagen | Imagen Completa (Earth Explorer) | Área de estudio | Capacidad Visual |
|---|---|---|---|
| *LC08_L1TP_010060_20130707_20170504_01_T1* | 59.64 | 10.00 | 90.00 |
| *LC08_L1TP_010060_20130723_20170503_01_T1* | 80.91 | 20.00 | 80.00 |
| *LC08_L1TP_010060_20140710_20170421_01_T1* | 48.93 | 12.00 | 88.00 |
| *LC08_L1TP_010060_20140726_20170420_01_T1* | 30.34 | 32.00 | 68.00 |
| *LC08_L1TP_010060_20150713_20170407_01_T1* | 38.95 | 22.00 | 78.00 |
| *LC08_L1GT_010060_20150729_20170406_01_T2* | 86.17 | 93.00 | N/A |

## 11. PRE-PROCESAMIENTO

Una vez seleccionadas las 3 imágenes satelitales en cada uno de los años en los que la disertación realizó el estudio, se procedió con el tratamiento previo necesario de las mismas como se estipuló en la sección anterior. El procedimiento es el siguiente:

### 11.1. Corrección geométrica y topográfica

Primero, las imágenes satelitales de Landsat 8 del nivel 1 – c 1 OLI7TIRS, categoría L1TP, ya contienen correcciones geométricas y topográficas pre calculadas, de Datum WGS 84 (USGS, 2015). Es decir, las escenas fueron previamente procesadas por correcciones de terreno bajo modelos digitales con un error medio cuadrático menor a 12 metros. En términos del caso, la imagen fue comparada con información de manzanas en el DMQ, cobertura en escala 1:10000 disponible en el geoportal[40] del municipio del DMQ y validada por la Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda (ver Ilustración 28).

[40] http://gobiernoabierto.quito.gob.ec

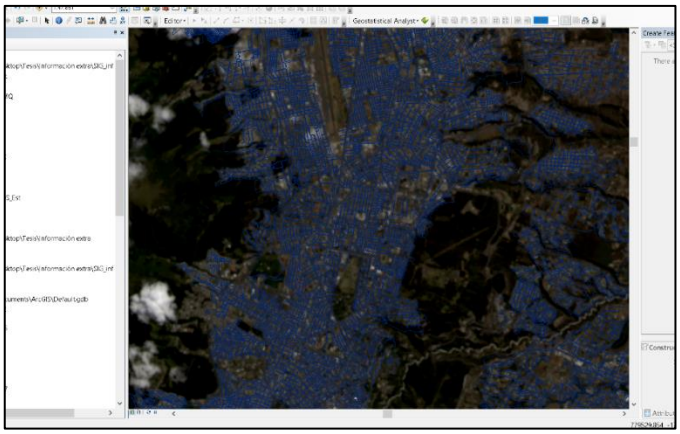


*Ilustración 28: Imagen satelital 2015/07/13 - comparación Geométrica y Topográfica.*

### 11.2. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica de las tres imágenes satelitales se la realizó mediante la utilización de la herramienta "Radiometric Calibration" en el Software ENVI 5.1 que convierte los niveles digitales a datos de radiancia o reflectancia, dependiendo de las necesidades del usuario (ver Ilustración 30).

Se formaron imágenes combinadas multiespectrales delimitadas por el archivo "área de corrección" (ver Ilustración 29), donde primero se transformó los niveles digitales de las 7 bandas correspondientes al sensor OLI, a datos de reflectancia TOA (ver Ecuación 18); mientras que los niveles digitales de las bandas térmicas (sensor TIRS) se transformaron a valores de radiancia TOA (ver Ecuación 15).

Los requerimientos de información necesarios para la realización de esta acción son leídos directamente por el programa en los metadatos (…MTL.txt) disponibles para cada una de las imágenes.

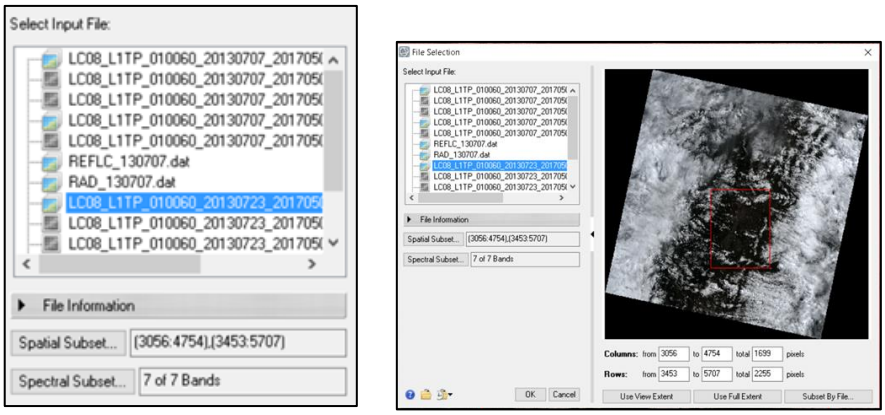



*Ilustración 29: Imágenes combinadas multiespectrales y enmascaramiento.*

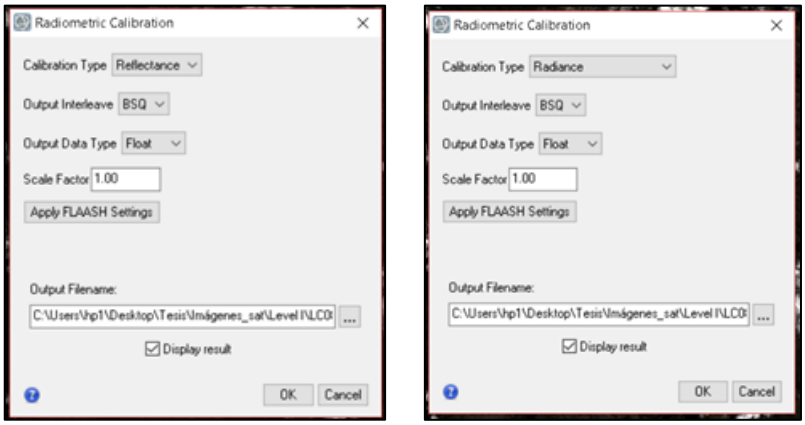



*Ilustración 30: Cálculo de radiancia y reflectancia - ENVI 5.1.*

### 11.3. Corrección atmosférica

Por otro lado, la corrección atmosférica en las imágenes satelitales se la realizó en dos partes: primeramente para las bandas del sensor OLI se utilizó el método “Dark-píxel subtraction” (ver Ecuación 20) mismo que necesitó calcular los valores mínimos de reflectancia de cada banda para cada una de las imágenes satelitales de los años escogidos (ver Tabla 6).

Los valores necesarios pueden ser observados en el histograma de la bandas combinadas utilizando la herramienta “Compute Statistics” (ver Ilustración 31). Los valores mínimos fueron sustraidos para los píxeles de cada una de las bandas por medio de la herramienta “Dark Subtraction” que requirió un tipeo manual de los datos (ver Ilustración 32) y que resultó en un raster con información de reflectancia de las bandas 1 a la 7, corregidas atmosféricamente.

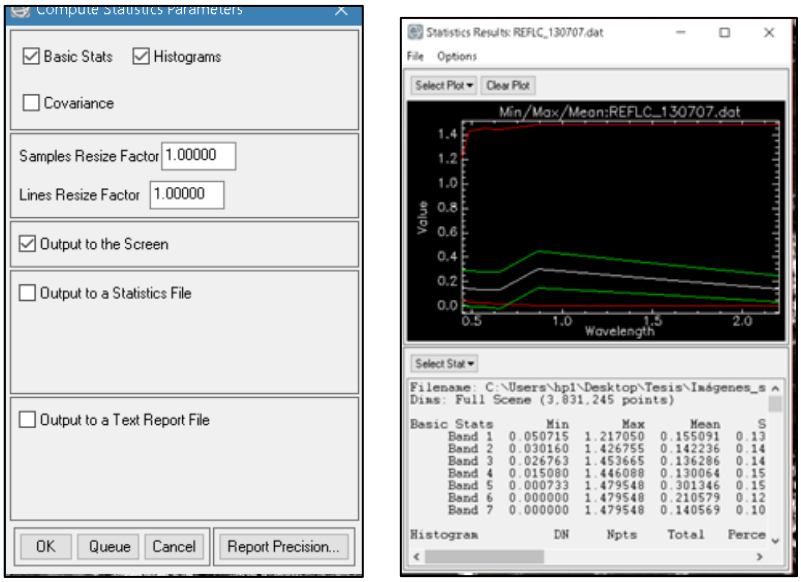



*Ilustración 31: Herramienta "Compute Statistics" – Histograma básico de imagen satelital.*

*Tabla 6: Valores mínimos de reflectancia por banda y por imagen - OLI.*

| **Nomenclatura y número de banda** | **LC08_L1TP_010060_20130707_20170504_01_T1** | **LC08_L1TP_010060_20140710_20170421_01_T1** | **LC08_L1TP_010060_20150713_20170407_01_T1** |
|---|---|---|---|
| *B1: Coastal* | 0.071600 | 0.051168 | 0.050715 |
| *B2: Blue* | 0.053663 | 0.045894 | 0.030160 |
| *B3: Green* | 0.030875 | 0.019623 | 0.026763 |
| *B4: Red* | 0.018157 | 0.012387 | 0.015080 |
| *B5: NIR* | 0.000613 | 0.001079 | 0.000733 |
| *B6: SWIR 1* | 0.000000 | 0.000000 | 0.000000 |
| *B7: SWIR 2* | 0.000000 | 0.000343 | 0.000000 |

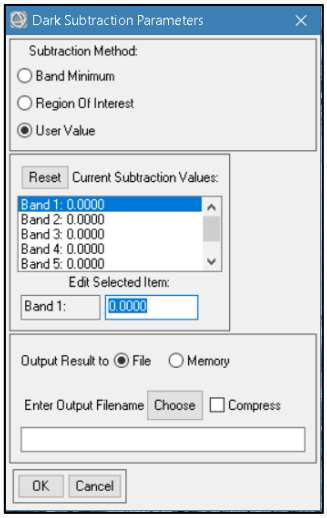



*Ilustración 32: Herramienta Dark Subtraction – Corrección Atmosférica OLI.*

En cambio, para las bandas térmicas del sensor TIRS, el método fue el desarrollado por Barsi, Schott, Palluconi, & Hook (2005) y requirió información tanto de emisividad (Ɛ), transmisividad (τ), radiancia ascendente ($L_{\uparrow}$) y radiancia descendente ($L_{\downarrow}$) para cada imagen (ver Ecuación 21).

El primer valor, la emitancia o emisividad, es sugerido como un dato que puede ser medido en el campo tomando los valores correspondientes de un objeto de interés puntual o en base a promedios medidos en otros estudios sobre dicho objeto, más debido al carácter mixto de las cubiertas en la zona de estudio (zona urbana, suelos con o sin cobertura vegetal y cuerpos de agua pequeños), se tomó el valor promedio de la emisividad (ver Tabla 7) calculada posteriormente, todo en base a la cobertura vegetal y proporción de la vegetación.

*Tabla 7: Emisividades medias por banda.*

| | **LC08_L1TP_010060_20130707_20170504_01_T1** | **LC08_L1TP_010060_20140710_20170421_01_T1** | **LC08_L1TP_010060_20150713_20170407_01_T1** |
|---|---|---|---|
| *Emisividad Media* | 0.994656 | 1.013360 | 1.014998 |

Los datos de transmisividad y radiancia ascendente descendente a su vez, fueron calculados por el "Atmospheric Correction Parameter Calculator" de la NASA para cada imagen (ver Ilustración 33), el cual tuvo requerimientos de información como: fecha y hora de la toma de la imagen satelital; la latitud y la longitud del punto medio (estipulado en los metadatos), en donde a su vez se seleccionó el perfil atmosférico interpolado debido a que el cálculo se lo realiza con datos circundantes, calculados en esa temporalidad y elegidos por su cercanía; el número de misión Landsat de donde se posee los datos, y datos estándar de condiciones atmosféricas en épocas de invierno o verano para perfiles atmosféricos superiores (siendo este último tomado para verano por la temporalidad del estudio y que se encontraba ya seleccionado por defecto), junto a otros parámetros del sensor como altitud, temperatura, presión y humedad relativa, que no fueron conocidos en su totalidad (ver Ilustración 22).

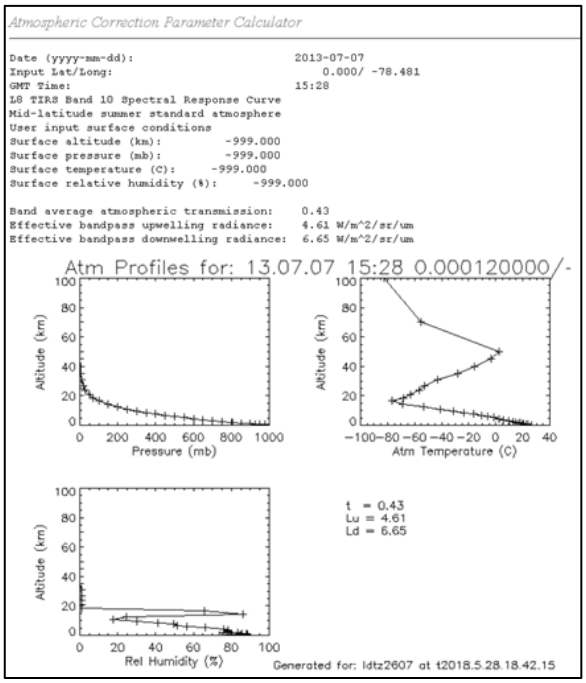



*Ilustración 33: Datos resultantes en el "Atmospheric Correction Parameter Calculator".*

*Tabla 8: Datos de transmisividad y radiancia ascendente y descendente por banda.*

| | **LC08_L1TP_010060_20130707_20170504_01_T1** | **LC08_L1TP_010060_20140710_20170421_01_T1** | **LC08_L1TP_010060_20150713_20170407_01_T1** |
|---|---|---|---|
| *Transmisividad (τ)* | 0.41 | 0.61 | 0.43 |
| *Radiancia ascendente (L↑)* | 4.79 | 3.06 | 4.61 |
| *Radiancia descendente (L↓)* | 6.93 | 4.73 | 6.65 |

Finalmente, los datos de cada imagen (ver Tabla 8) fueron reemplazados en la Ecuación 21: Corrección Atmosférica bandas TIRS - Landsat 8. Para esto se utilizó la herramienta "Band Math" (ver Ilustración 34) dónde "b1" en la codificación corresponde a la banda del infrarrojo termal número 10, obteniendo un raster con valores de radiancia corregida para dicha banda.

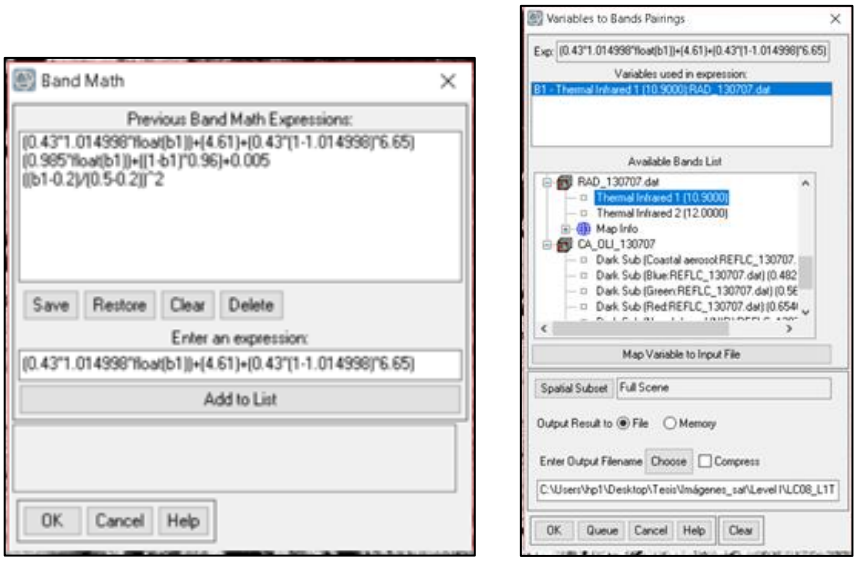



*Ilustración 34: Herramienta "Band Math" - Corrección Atmosférica TIRS.*

## 12. CÁLCULO DE ÍNDICES AMBIENTALES

### 12.1. Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Una vez corregidos los datos de reflectancia TOA de las bandas 1 a la 7 de cada imagen, se procedió al cálculo de los índices ambientales, siendo el primero el NDVI, donde se utilizó la herramienta "NDVI Calculation Parameters" en ENVI, que reemplaza los valores de la Ecuación 25. El programa selecciona automáticamente las bandas necesarias para este cálculo, las cuales son: banda 4 para el canal de rojo y 5 para infrarrojo cercano en Landsat 8 OLI. El resultado es un raster con datos NDVI para cada píxel dentro de la "zona de corrección".

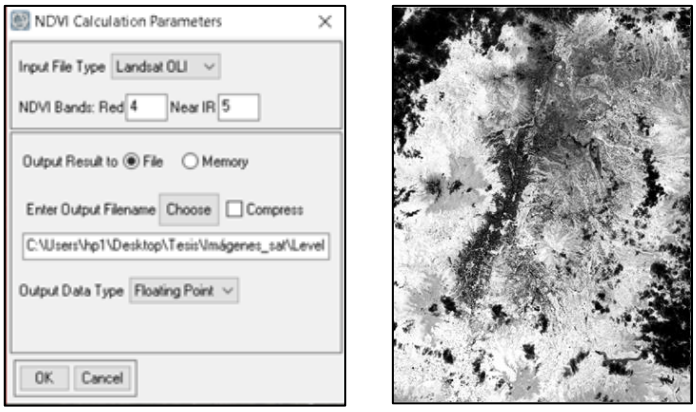



*Ilustración 35: Cálculo de NDVI - bandas del sensor OLI.*

## 12.2. Cálculo de la proporción de la vegetación (PV)

Para el caso del cálculo de la PV, se utilizó la herramienta mencionada anteriormente "Band Math", en donde se reemplazó en la Ecuación 26 los valores calculados de NDVI y se tomó como datos por defecto a 0.5 para vegetación y 0.2 para suelo, como se mencionó anteriormente. El cálculo asignó a b1 en el código a la banda NDVI calculada, y resultó en un raster con valores sin unidades de medida referentes a la proporción de la vegetación en el "área de corrección".

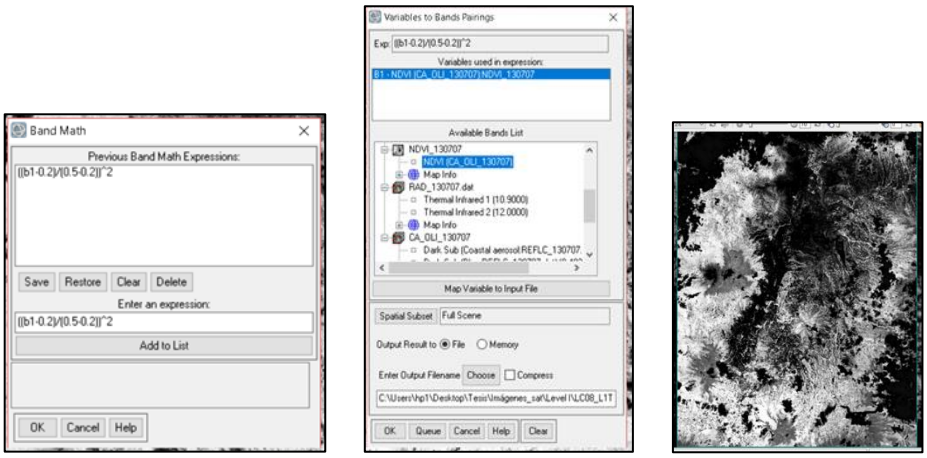



*Ilustración 36: Cálculo Pv - OLI*

### 12.3. Cálculo de la emisividad (ε)

Al ser un parámetro necesario para el cálculo de la temperatura de brillo, la temperatura superficial y, en este caso, para la corrección atmosférica de bandas termales, la emisividad de la cubierta de estudio se calculó reemplazando los valores en la Ecuación 22. Posteriormente, teniendo ya el valor de la PV, se utilizó "Band Math" para asignarlo a la codificación b1, mientras que se tomaron valores por defecto de emisividad de la vegetación de 0.985, de emisividad del suelo de 0.96 y de 0.005 como constante de rugosidad de la superficie. En base a lo expuesto también cabe mencionar que una vez calculada la emisividad en bandas OLI, se utilizó la herramienta "Compute Statistics" para sustraer el valor medio de la emisividad (ver Tabla 7) del histrograma de cada una de imágenes (ver Ilustración 38), que será utilizado en la corrección atmosférica de bandas termales (ver Ilustración 34) .

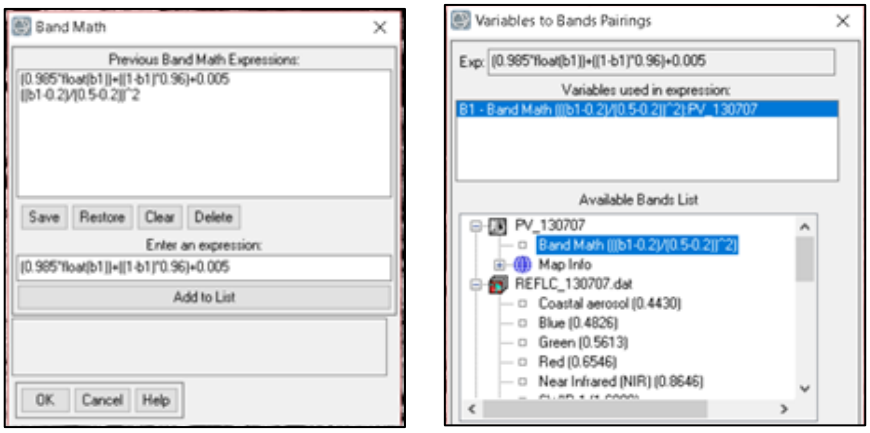



*Ilustración 37: Cálculo emisividad – OLI*

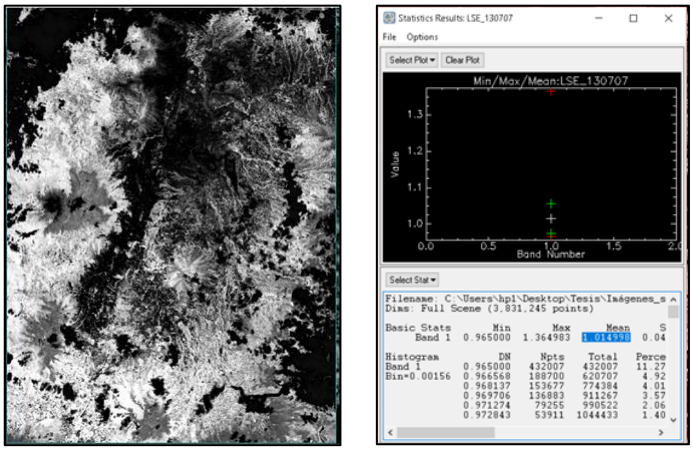



*Ilustración 38: Emisividad - Raster e Histograma.*

## 12.4. Cálculo de la temperatura de brillo (TB)

En base a datos de radiancia de cualquiera de las dos bandas termales disponibles y corregidas atmosféricamente para cada imagen, el cálculo de la TB se lo realiza mediante el reemplazo de los datos necesarios en la Ecuación 27. Para este cálculo se seleccionó la banda 10 o infrarrojo térmico 1 (TIRS) de cada imagen, junto a sus respectivas constantes necesarias, disponibles en los metadatos (ver Tabla 9). Finalmente se reemplazó los valores necesarios con la utilización de "Band Math" y se asignó la banda corregida 10 a b1 en la codificación, dando como resultado un raster con valores de temperatura en grados kelvin para el área de corrección (ver Ilustración 39). Como adicional, con la misma herramienta se realizó una resta de -273.15 (valor del cero absoluto) a los valores calculados para transformar los datos a grados Celsius (ver Ilustración 40).

*Tabla 9: Constante K - bandas TIRS.*

| | **LC08_L1TP_010060_20130707_20170504_01_T1** | **LC08_L1TP_010060_20140710_20170421_01_T1** | **LC08_L1TP_010060_20150713_20170407_01_T1** |
|---|---|---|---|
| *K1_CONSTANT_BAND_10* | 774.8853 | 774.8853 | 774.8853 |
| *K2_CONSTANT_BAND_10* | 1321.0789 | 1321.0789 | 1321.0789 |

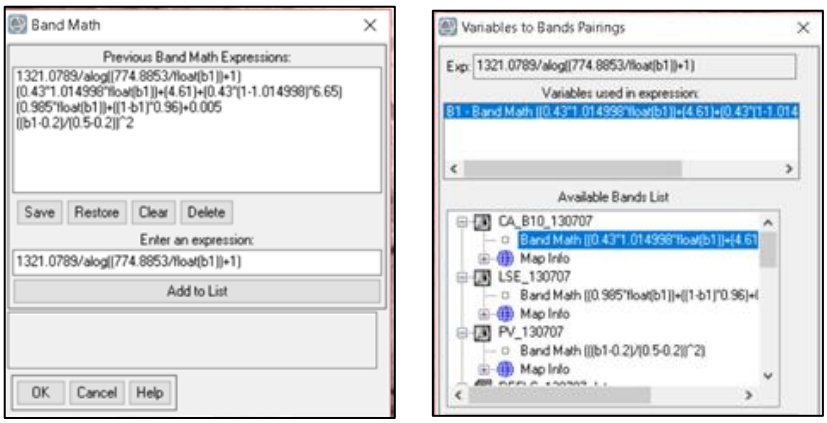



*Ilustración 39: Cálculo de TB - TIRS.*

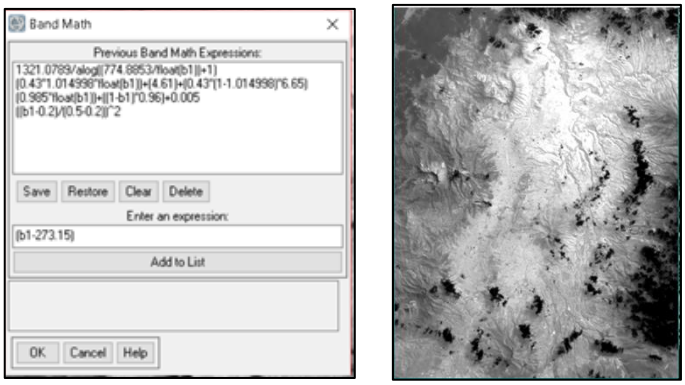



*Ilustración 40: TB en grados Celsius - raster.*

## 12.5. Cálculo de la temperatura superficial (LST)

Gracias a los previos valores calculados, la determinación de la LST utilizó la herramienta "Band Math" para el reemplazo de valores en la Ecuación 23, donde se asignó a b1 la banda de temperatura de brillo calculada en grados kelvin, a b2 la banda termal 10 de reflectancia corregida atmosféricamente, y a b3 la banda correspondiente a valores de emisividad, todo junto a la constante de Planck con un valor de 14380 [µm K] (ver Ilustración 41). Los datos resultantes derivaron en valores de temperatura superficial en grados kelvin, que del mismo modo utilizado anteriormente, fueron transformados a grados celsius (ver Ilustración 42), exponiendo, por ejemplo, un rango de valores resultantes de 2.7 [°C] a 29.63 [°C] para la imagen del 07 de julio de 2013.

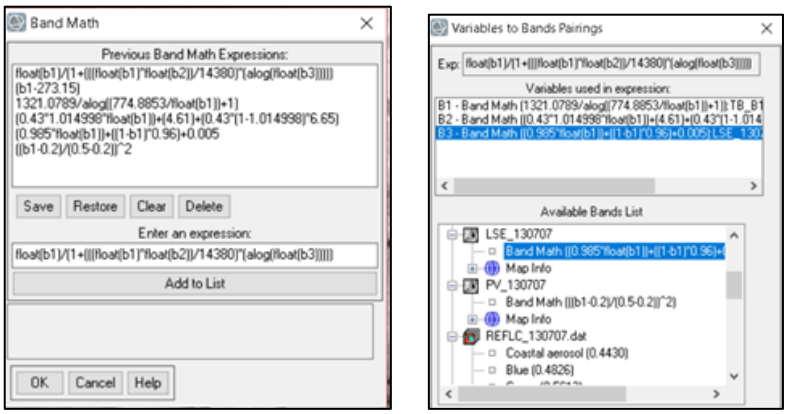



*Ilustración 41: Cálculo LST - OLI/TIRS.*

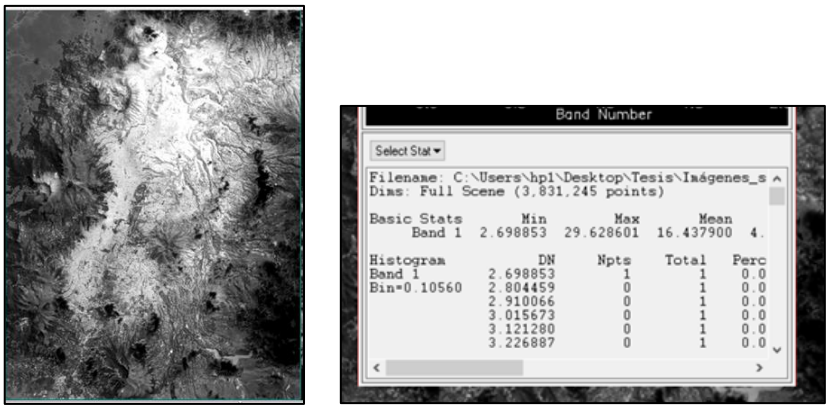



*Ilustración 42: LST en celcius - Raster e Histograma.*

## 12.6. Cálculo del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

Del mismo modo, como índices adicionales derivados de las imágenes satelitales utilizadas, se buscó los que utilicen bandas o combinaciones de bandas que no hayan sido utilizadas anteriormente. Por esto, el SAVI se calculó mediante el reemplazo de valores con la herramienta "Band Math" en la Ecuación 28, asignando como b1 a la banda 5 del infrarrojo cercano corregida atmosféricamente, b2 a la banda 4 del canal rojo visible, y se añadió el coeficiente de ajuste de la vegetación de 0.5 (ver Ilustración 43).

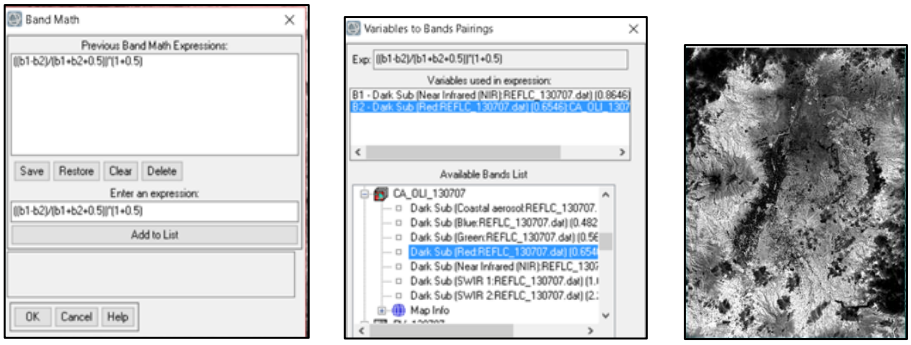



*Ilustración 43: Cálculo SAVI - OLI - Raster.*

## 12.7. Cálculo del índice de diferencia normalizada de suelos (NSI)

El cálculo del NSI igualmente se lo realizó reemplazando los valores de la Ecuación 29 en la herramienta "Band Math", asignando a b1 la banda número 6 del canal infrarrojo de onda corta 1, y a b2 la banda número 5 del canal infrarrojo cercano (ver Ilustración 44).

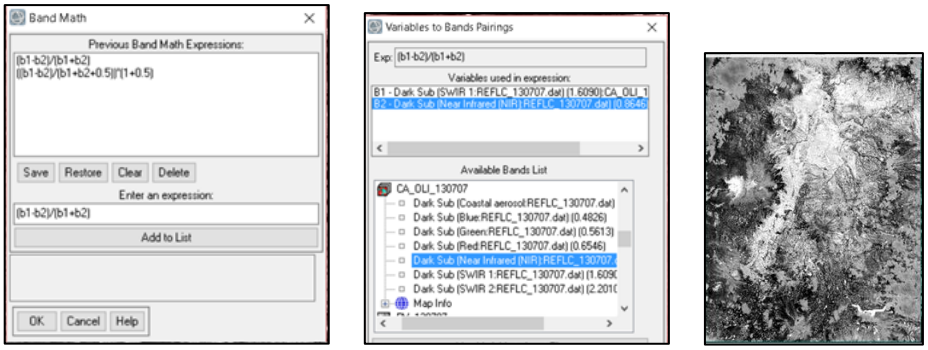



*Ilustración 44: Cálculo NSI - OLI - Raster.*

## 13. RELACIÓN ESPACIAL ENTRE ÍNDICES AMBIENTALES Y PUNTOS DE MEDICIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Finalmente, una vez fueron calculados los valores de las temperaturas y los índices ambientales, se transformó los datos en formato raster compatible para ENVI 5.1, a formatos TIFF, que pueden ser utilizados en la plataforma ArcGIS 10.4.1 (ver Ilustración 45).

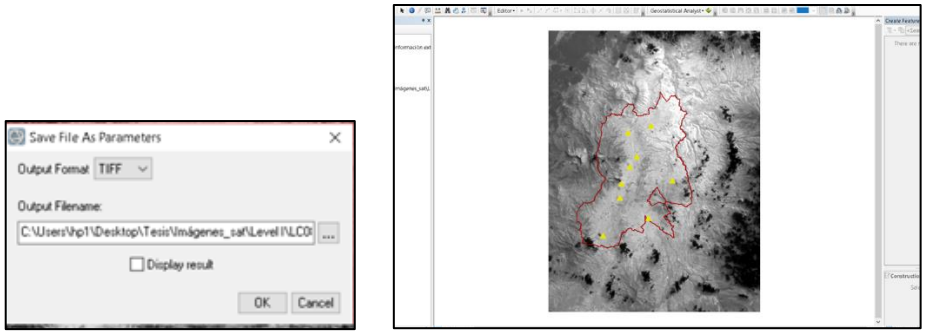



*Ilustración 45: TB, LST, NDVI, SAVI y NSI formato tiff - AcrGIS 10.4.1.*

En esta nueva plataforma, se utilizó para comenzar la herramienta “Project”, la cual definió los sistemas de coordenadas de las capas raster TB, LST, NDVI, SAVI y NSI, pasando de WSG84 a WGS84_Zone_17N, en los que se encuentraron todos los valores de la disertación (ver Ilustración 46).

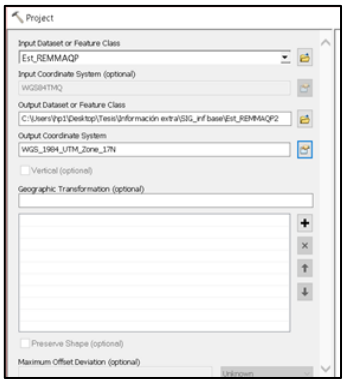



*Ilustración 46: Herramienta "Project" - ArcGIS 10.4.1.*

Luego se utilizaron herramientas como: "Extract Values to Point" (ver Ilustración 47), para extraer los valores de cada uno de los índices ambientales calculados en base a la ubicación de las estaciones de la REMMAQ seleccionadas; e, "Intersect" (ver Ilustración 47), la cual unió la información de todas las nuevas capas de puntos calculadas anteriormente (ver Tabla 10). A manera de complemento, se realizó un análisis visual de la ubicación de las estaciones de la REMMAQ en la imagen combinada RGB_123 del 13 de julio de 2015, para comprobar su correcto posicionamiento.

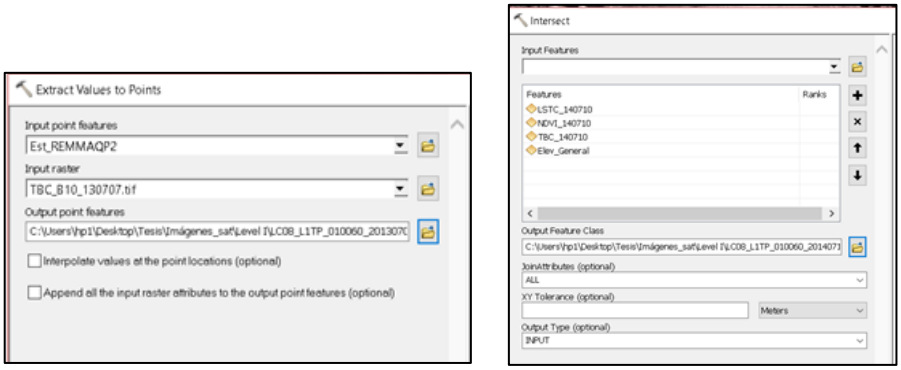



*Ilustración 47: Herramienta "Extract Values to Point" e "Intersect" - ArcGIS.*

*Tabla 10: Valores de índices ambientales por estación..*

| *LC08_L1TP_010060_20130707_20170504_01_T1* | | **LONGITUD** | **LATITUD** | **Altura** | **NDVI** | **SAVI** | **NSI** | **Temperatura de Brillo** | **Temperatura Superficial** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Estaciones** | **COD** | **[m]** | **[m]** | **[msnm]** | **[ND]** | **[ND]** | **[ND]** | **[°C]** | **[°C]** |
| *Belisario* | **BEL** | -78.4957 | -0.1852 | 2845 | 0.160 | 0.067 | -0.121 | 23.798 | 21.890 |
| *Carapungo* | **CAR** | -78.4494 | -0.0955 | 2641 | 0.270 | 0.164 | 0.033 | 23.346 | 21.506 |
| *Centro Histórico* | **CEN** | -78.5141 | -0.2213 | 2834 | 0.103 | 0.067 | 0.020 | 23.759 | 21.970 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Cotocollao* | **COT** | -78.4995 | -0.1105 | 2799 | 0.267 | 0.159 | -0.027 | 22.999 | 21.167 |
| *El Camal* | **CAM** | -78.5172 | -0.2518 | 2838 | 0.113 | 0.060 | 0.034 | 22.432 | 20.666 |
| *Guamaní* | **GUA** | -78.5535 | -0.3343 | 3074 | 0.272 | 0.204 | -0.065 | 21.037 | 19.289 |
| *Jipijapa* | **JIP** | -78.4805 | -0.1623 | 2787 | 0.283 | 0.141 | -0.071 | 22.661 | 20.876 |
| *Los Chillos* | **CHI** | -78.4547 | -0.2965 | 2457 | 0.067 | 0.047 | 0.027 | 22.866 | 21.234 |
| *Tumbaco* | **TUM** | -78.4033 | -0.2149 | 2336 | 0.305 | 0.210 | -0.090 | 22.518 | 20.802 |
| *LC08_L1TP_010060_20140710_20170421_01_T1* | | | | | | | | | |
| *Belisario* | **BEL** | -78.4957 | -0.1852 | 2845 | 0.142 | 0.074 | -0.126 | 22.906 | 24.830 |
| *Carapungo* | **CAR** | -78.4494 | -0.0955 | 2641 | 0.281 | 0.165 | 0.026 | 22.564 | 24.422 |
| *Centro Histórico* | **CEN** | -78.5141 | -0.2213 | 2834 | 0.081 | 0.047 | 0.210 | 25.261 | 27.103 |
| *Cotocollao* | **COT** | -78.4995 | -0.1105 | 2799 | 0.280 | 0.160 | -0.018 | 22.398 | 24.250 |
| *El Camal* | **CAM** | -78.5172 | -0.2518 | 2838 | 0.110 | 0.061 | 0.035 | 22.845 | 24.689 |
| *Guamaní* | **GUA** | -78.5535 | -0.3343 | 3074 | 0.279 | 0.169 | -0.013 | 21.441 | 23.257 |
| *Jipijapa* | **JIP** | -78.4805 | -0.1623 | 2787 | 0.248 | 0.127 | -0.074 | 22.826 | 24.763 |
| *Los Chillos* | **CHI** | -78.4547 | -0.2965 | 2457 | 0.056 | 0.035 | -0.017 | 23.546 | 25.215 |
| *Tumbaco* | **TUM** | -78.4033 | -0.2149 | 2336 | 0.298 | 0.205 | -0.086 | 22.773 | 24.591 |
| *LC08_L1TP_010060_20150713_20170407_01_T1* | | | | | | | | | |
| *Belisario* | **BEL** | -78.4957 | -0.1852 | 2845 | 0.133 | 0.047 | 0.020 | 20.960 | 22.785 |
| *Carapungo* | **CAR** | -78.4494 | -0.0955 | 2641 | 0.132 | 0.096 | 0.027 | 17.361 | 19.041 |
| *Centro Histórico* | **CEN** | -78.5141 | -0.2213 | 2834 | 0.110 | 0.072 | -0.014 | 22.005 | 23.816 |
| *Cotocollao* | **COT** | -78.4995 | -0.1105 | 2799 | 0.311 | 0.047 | -0.129 | 18.819 | 20.442 |
| *El Camal* | **CAM** | -78.5172 | -0.2518 | 2838 | 0.124 | 0.064 | 0.043 | 20.888 | 22.690 |
| *Guamaní* | **GUA** | -78.5535 | -0.3343 | 3074 | 0.048 | 0.055 | -0.089 | 10.391 | 11.596 |
| *Jipijapa* | **JIP** | -78.4805 | -0.1623 | 2787 | 0.272 | 0.132 | 0.001 | 20.406 | 22.196 |
| *Los Chillos* | **CHI** | -78.4547 | -0.2965 | 2457 | 0.071 | 0.048 | 0.010 | 21.411 | 23.064 |
| *Tumbaco* | **TUM** | -78.4033 | -0.2149 | 2336 | 0.291 | 0.189 | 0.001 | 20.694 | 22.451 |

# CAPÍTULO IV
# RECOPILACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS DE CONTAMINANTES CRITERIO ATMOSFÉRICOS

## 14. RECOPILACIÓN DE DATOS DE CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO ATMOSFÉRICOS

La información sobre las concentraciones de contaminantes criterio atmosféricos (o contaminantes comunes del aire), fue adquirida mediante la cooperación de la entidad pública Secretaría de Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano Quito, en su Unidad de Investigación Análisis y Monitoreo, la que se encuentra encargada del procesamiento de los datos tomados por la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ) (Secretaría del Ambiente, 2017).

Para el uso de los mismos, se remitió una solicitud (ver Anexo 3) dirigida a la Secretaría del Ambiente, donde el proceso fue liderado por el Ing. Darwin Acosta, e incluyó acotaciones de que requirió los datos con los menos intervalos de medición de las concentraciones, junto con una carta de compromiso en base al reconocimiento de la propiedad de la matriz numérica analizada (ver Anexo 4) (Secretaría del Ambiente, 2017).

Los datos fueron entregados bajo una clasificación de archivos divididos por años, y en cada uno, subdivisiones por estaciones de la REMMAQ, mes, día, hora y tomados en intervalos de 10 minutos.

Se reitera la exclusión de la estación Jipijapa, debido a que no existe la información requerida para ella de ninguna concentración y se añade que la estación Tumbaco solo posee datos de $SO_2$ y $O_3$, para los tres años analizados, y que no existe información de ningún tipo para la estación “El Camal” en el 2015.

## 15. ANÁLISIS PREVIO DE DATOS

Una vez realizada una copia de seguridad de los datos base proporcionados por la REMMAQ, se creó una clasificación por medio de filtros en el programa Excel en su versión 2013, donde se eliminó las variables referidas en las categorías “MAGNITUD” como: “vacíos”, junto con “DIRECCIÓN DEL VIENTO”, “HUMEDAD RELATIVA”

"PRECIPITACIÓN", "PRESIÓN BAROMÉTRICA", "RADIACIÓN SOLAR", "TEMPERATURA MEDIA" y "VELOCIDAD DEL VIENTO", para cada uno de los archivos proporcionados, resultando en una base de datos más corta (ver Tabla 11).

*Tabla 11: Primeros datos descartados de información base*

| Año de Set de Datos | Cantidad de Datos | Eliminados | Porcentaje de Eliminados |
|---|---|---|---|
| **2013** | 764707 | 368374 | 48.17 |
| **2014** | 771754 | 358423 | 46.44 |
| **2015** | 684601 | 314350 | 45.92 |

Los datos a analizar fueron: CO, NO, $NO_2$, $NO_x$, $O_3$, $PM_{2.5}$ y $SO_2$ correspondientes a un total de 396333 datos para el archivo de 2013, 413331 de 2014, y 370251 de 2015. Por otro lado, los punto de medición fueron: "BELISARIO", "CARAPUNGO", "CENTRO", "COTOCOLLAO", "EL CAMAL", "GUAMANÍ", "LOS CHILLOS" y "TUMBACO", para las cuales a su vez se creó una nueva codificación de clasificación de información (ver Tabla 12).

*Tabla 12: Codificación de estaciones REMMAQ*

| Estaciones REMMAQ | Codificación |
|---|---|
| BELISARIO | Bel |
| CENTRO | Cen |
| CARAPUNGO | Car |
| COTOCOLLAO | Cot |
| EL CAMAL | Cam |
| GUAMANÍ | Gua |
| LOS CHILLOS | Chi |
| TUMBACO | Tum |

El análisis inicial consistió en entender el comportamiento de los sets de datos de manera general y mediante la utilización de las mediciones brutas (sin ningún tipo de tratamiento), más se tomó en cuenta los valores negativos como positivos (por estar en términos de concentración) y finalmente para cada una de las estaciones se eliminaron las celdas en "blanco" y con valores de "0", calculando el porcentaje descartado del total para el análisis visual previo (ver Tabla 13).

*Tabla 13: Datos eliminados por estación para análisis previo.*

| Estaciones REMMAQ 2013 | Datos Obtenidos | Datos Eliminados (Celdas "vacías" y "0") | Porcentaje eliminado |
|---|---|---|---|
| **BELISARIO** | 59375 | 1034 | 1.74 |
| **CENTRO** | 5913 | 862 | 1.46 |
| **CARAPUNGO** | 58119 | 1846 | 3.18 |
| **COTOCOLLAO** | 58949 | 1963 | 3.33 |
| **EL CAMAL** | 59209 | 1682 | 2.84 |
| **GUAMANÍ** | 41857 | 807 | 1.93 |
| **LOS CHILLOS** | 42556 | 1846 | 4.34 |
| **TUMBACO*** | 17138 | 783 | 4.57 |
| **2014** | | | |
| **BELISARIO** | 61118 | 1360 | 2.23 |
| **CENTRO** | 61167 | 1611 | 2.63 |
| **CARAPUNGO** | 59703 | 2299 | 3.85 |
| **COTOCOLLAO** | 61075 | 1891 | 3.10 |
| **EL CAMAL** | 43360 | 1267 | 2.92 |
| **GUAMANÍ** | 50696 | 1647 | 3.25 |
| **LOS CHILLOS** | 59224 | 2729 | 4.61 |
| **TUMBACO*** | 16989 | 1116 | 6.57 |
| **2015** | | | |
| **BELISARIO** | 59172 | 1556 | 2.63 |
| **CENTRO** | 61052 | 1687 | 2.76 |
| **CARAPUNGO** | 58918 | 1872 | 3.18 |
| **COTOCOLLAO** | 60900 | 2066 | 3.39 |
| **EL CAMAL*** | * | * | * |
| **GUAMANÍ** | 51632 | 1195 | 2.31 |
| **LOS CHILLOS** | 61142 | 2349 | 3.84 |
| **TUMBACO*** | 17435 | 848 | 4.86 |

Posteriormente, con una base de datos dividida por series tomadas cada 10 minutos para los 3 años escogidos, se utilizó el cálculo de desviación estándar predeterminado por el programa excel en su fórmula "DESVEST.M" (Microsoft, Support Office, 2018) para elegir la columna de valores que posea una dispersión de datos menor en un carácter general (ver Tabla 14).

*Tabla 14: Desviación estándar de set de datos 2013, 2014 y 2015 - datos cada 10 min*

| *Desviación estándar* | **DATO 10'** | **DATO 20'** | **DATO 30'** | **DATO 40'** | **DATO 50'** | **DATO 60'** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Set de Datos 2013* | 24.28 | 24.17 | 24.30 | 24.17 | 24.16 | 24.22 |
| *Desviación estándar* | **DATO 10'** | **DATOS 20'** | **DATO 30'** | **DATOS 40'** | **DATO 50'** | **DATOS 60'** |
| *Set de Datos 2014* | 23.47 | 23.25 | 23.19 | 23.24 | 23.26 | 23.38 |
| *Desviación estándar* | **DATO 10'** | **DATOS 20'** | **DATO 30'** | **DATOS 40'** | **DATO 50'** | **DATOS 60'** |
| *Set de Datos 2015* | 24.12 | 23.87 | 23.89 | 23.83 | 24.04 | 24.02 |

Una vez escogidas las columnas para cada año, en búsqueda de tener una mejor interpretación visual se generó gráficos de columnas agrupadas de concentración versus tiempo, con diferenciación de estaciones, tanto a nivel anual, mensual (meses por año), diario (días del mes de julio) y horario (horas del día por cada una de las 3 fechas con disponibilidad positiva de imagen satelital); para cada uno de los contaminantes estudiados.
Siendo un análisis de carácter general, se tomó al monóxido de carbono (CO) como ejemplo de los pasos que fueron realizados con todos los contaminantes, incluyendo los demás gráficos en la sección de anexos (ver Anexo 4).

Partiendo del nivel anual, el comportamiento general de las concentraciones de contaminantes evidenció un sesgo en los datos medidos por la estación del Camal y de menor medida en la estación Centro, para los cuales se sugiere una revisión en estudios posteriores. Por su parte, se menciona la falta de datos en la estación de Tumbaco, con excepción de medidas para $O_3$ y $SO_2$ (ver Anexo 4).

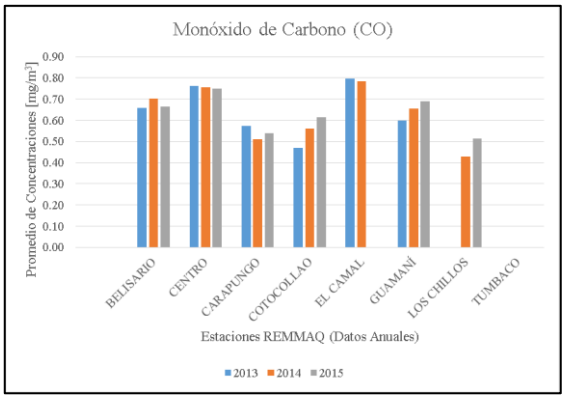



*Ilustración 48: Análisis de datos anual - ejemplo CO.*

A nivel mensual por otro lado: el monóxido de carbono tuvo una concentración variable para cada estación, donde en los meses correspondientes a la época de estiaje, en algunos casos aumenta y en otros disminuye, reiterando los picos de mediciones en la estación El Camal, repitiendo el casos para el resto de contaminantes criterio atmosféricos referidos en la disertación (ver Anexo 5).

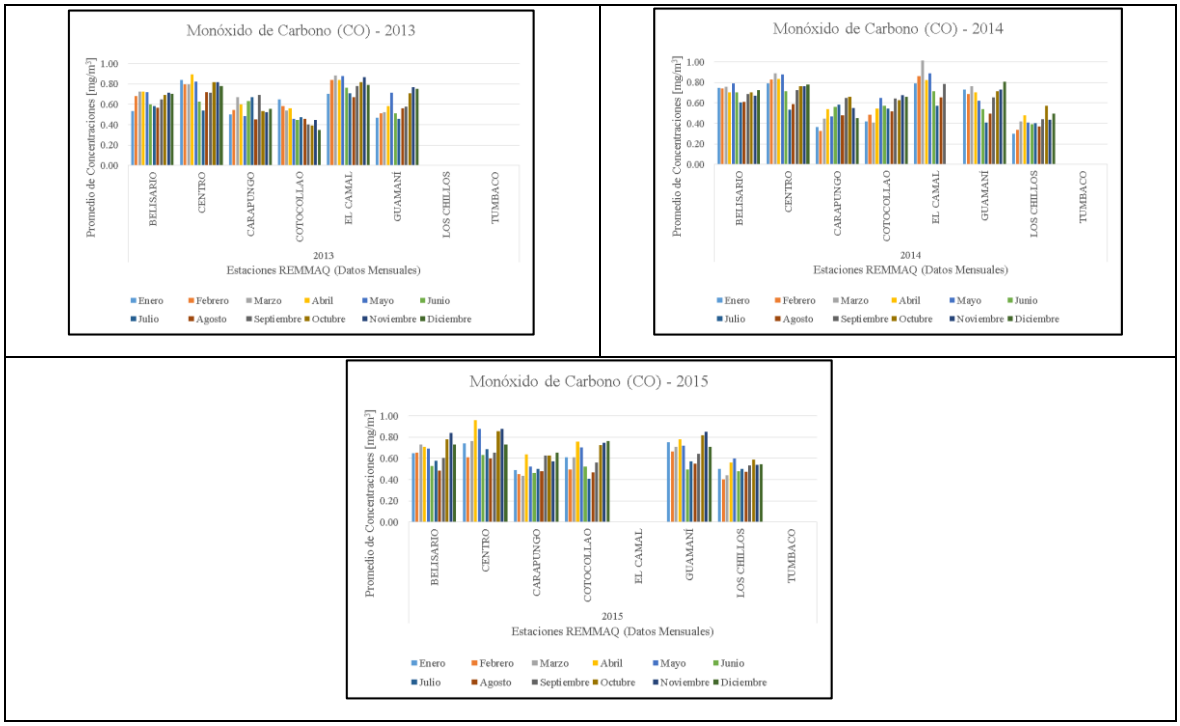



*Ilustración 49: Análisis de datos mensual - ejemplo CO.*

En cuanto a la concentración diaria se destaca; picos de concentraciones para monóxido de carbono en Carapungo para los últimos días de julio del año 2013, en la estación El Camal para los primeros días del año 2014 y los últimos al 2015; picos de concentraciones para los óxidos de nitrógeno en la estación El Camal para los primeros y últimos días de julio de los 3 años de estudio; una concentración decreciente desde el 2013 al 2014 de ozono troposférico evidente en los últimos días del mes de julio; valores extremadamente altos de $PM_{2.5}$ en la estación Carapungo al 2013; y, valores muy altos en concentraciones de $SO_2$ en las estaciones del Camal y Los Chillos tanto para los primeros como para los últimos días del mes de julio para los 3 años (ver Anexo 6).

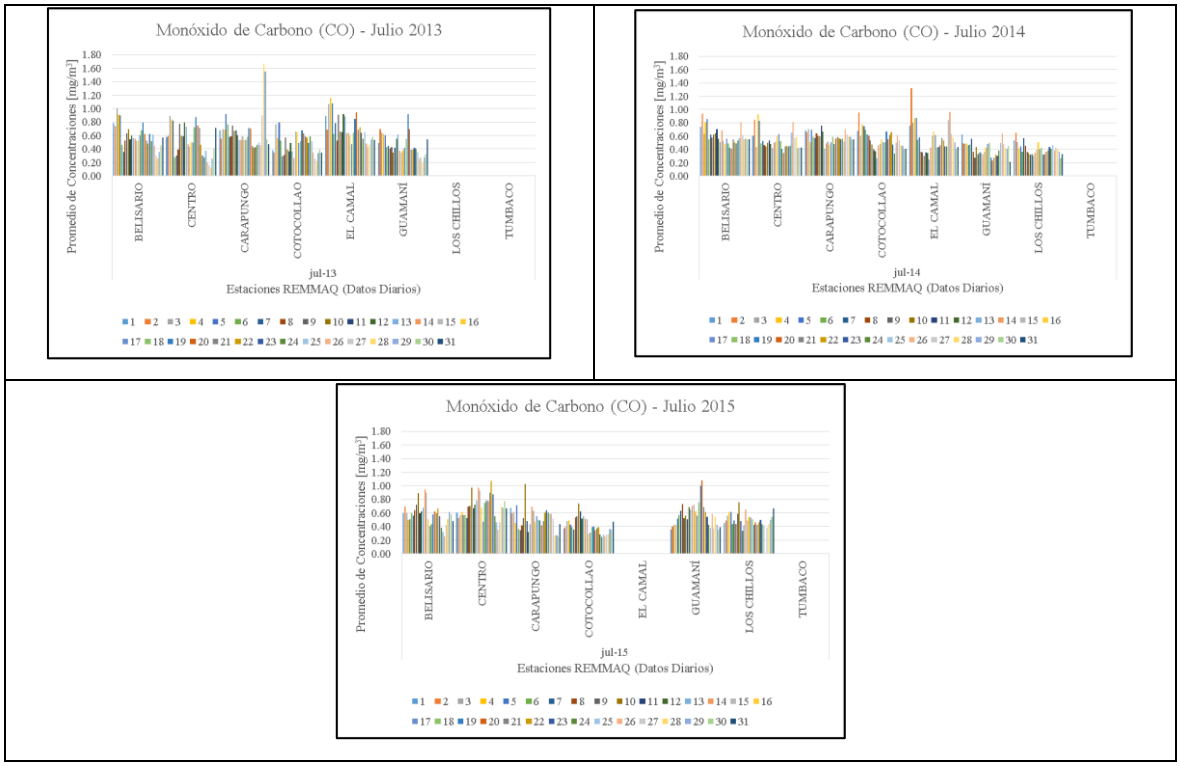
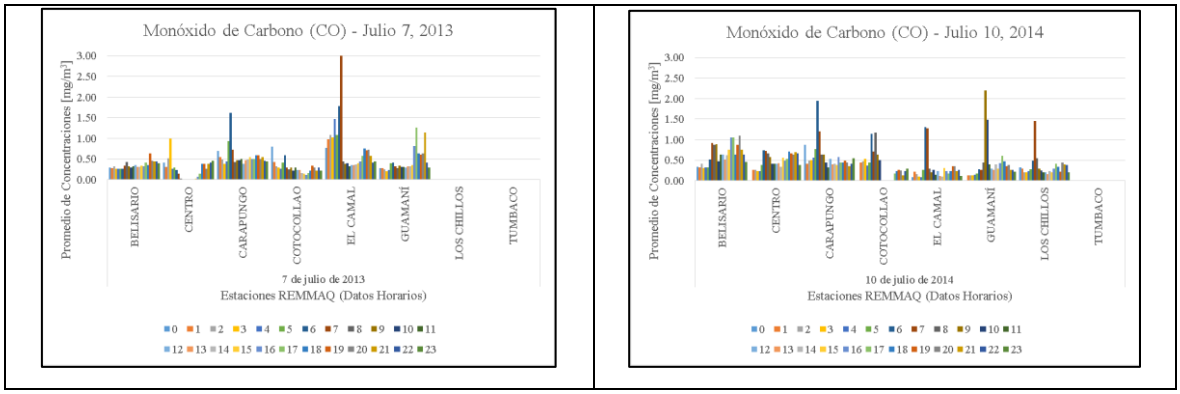



*Ilustración 50: Análisis de datos diario - ejemplo CO.*

Finalmente para las concentraciones horarias en los días en los que se dispone de las imágenes satelitales, se pudo ver un relativo incremento de concentración de contaminantes en las primeras horas y últimas horas de los 3 días analizados, correspondientes a las "horas pico" en el Distrito Metropolitano de Quito, y añadiendo los datos más altos reiterados tomados por las estaciones El Camal, Carapungo y Los Chillos (ver Anexo 8).



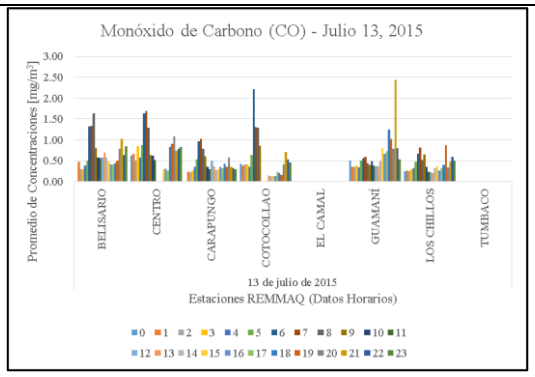
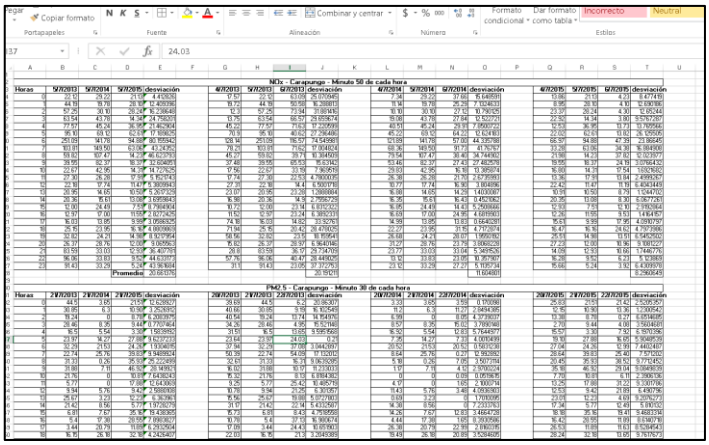



*Ilustración 51: Análisis de datos horario - ejemplo CO.*

## 16. VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Una vez analizados, los datos fueron extraídos en un rango de 30 minutos antes y 30 minutos después de la toma de cada una de las imágenes satelitales a utilizar, mismas que corresponden, en todos los casos, a intervalos de 10 minutos entre las 14h50 hasta las 16h00 de los días referidos anteriormente.

Fue necesaria la modificación de datos para aquellas celdas en las que no había mediciones registradas, o tenían valores de 0, más estos últimos fueron analizados uno por uno para su reemplazo, en base a la concordancia de los mismos con los datos adyacentes. El cálculo de los nuevos datos a completar se lo realizó mediante pruebas numéricas en 6 días aleatorios dentro de los 3 años del estudio, las cuales demostraron que los datos correspondientes al día anterior, y siguiente, tenían una desviación estándar menor que los correspondientes al día con misma fecha diaria de los años anterior y siguiente. En varios de igual manera, no se encontraron ni siquiera los datos necesarios para dicho cálculo y se optó por utilizar datos del día anterior y siguiente, o si no estaban disponibles se procedía a utilizar los de la misma fecha del año anterior o siguiente, y si fuera el caso, datos de los días posteriores al siguiente o preliminares al anterior, correspondientemente (ver Ilustración 52).



| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **14h50** | 43.08 | 40.12 | 41.76 | 39.10 | #N/A | 50.22 | 46.86 | 36.53 |
| **15h00** | 41.80 | 39.28 | 19.10 | 36.92 | #N/A | 50.07 | 45.97 | 37.45 |
| **15h10** | 39.16 | 40.29 | 33.84 | 33.20 | #N/A | 46.34 | 43.53 | 37.93 |
| **15h20** | 34.04 | 38.46 | 34.61 | 30.81 | #N/A | 45.87 | 41.45 | 38.73 |
| **15h30** | 31.12 | 35.42 | 35.81 | 29.62 | #N/A | 51.30 | 40.93 | 37.59 |
| **15h40** | 31.20 | 34.78 | 37.23 | 32.72 | #N/A | 50.53 | 38.69 | 40.95 |
| **15h50** | 27.55 | 34.05 | 36.58 | 29.44 | #N/A | 47.85 | 40.65 | 39.76 |
| **16h00** | 32.66 | 30.57 | 35.30 | 27.58 | #N/A | 44.18 | 41.95 | 41.22 |

| **Completar** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Carapungo** | | | **Tumbaco** | | |
| | **29/7/2014** | **30/7/2015** | **Promedio** | **29/7/2014** | **30/7/2015** | **Promedio** |
| 14h50 | 41.52 | 41.99 | 41.76 | 36.12 | 36.94 | 36.53 |
| 15h00 | 41.44 | 37.30 | 39.37 | 35.43 | 39.47 | 37.45 |
| 15h10 | 44.20 | 38.40 | 41.30 | 36.35 | 39.50 | 37.93 |
| 15h20 | 46.13 | 42.32 | 44.23 | 36.74 | 40.71 | 38.73 |
| 15h30 | 45.81 | 38.89 | 42.35 | Dato añadido de las 15h40 del 28 de julio de 2015. | 38.82 | 37.59 |
| 15h40 | 43.66 | 35.67 | 39.67 | 38.44 | 43.45 | 40.95 |
| 15h50 | 44.87 | 34.70 | 39.79 | 37.95 | 41.57 | 39.76 |
| 16h00 | 45.64 | 34.55 | 40.10 | 36.77 | 45.66 | 41.22 |

*Ilustración 52: Cálculo y ejemplo de reemplazo de datos –$O_3$.*

Luego, la matriz de datos reemplazados fue analizada en cada caso mediante el cálculo de: tamaño muestral, sumatoria total, media aritmética, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo, límite de control (inf), límite de advertencia (inf), límite de advertencia (sup), límite de control (sup) y coeficiente de sesgo de Pearson.

Una vez realizados los cálculos de límites, los resultados fueron clasificados por códigos de color (ver Tabla 15) en la utilización de la herramienta "Formato Condicional" donde se analizaron (y se excluyeron en la mayoría de casos) a las variables por encima de 1.96 desviaciones estándar y eliminaron sin análisis a los que se encontraban por encima de 2.58 desviaciones estándar.

*Tabla 15: Códigos de clasificación de datos REMMAQ*

| **Significado** | **Color** |
|---|---|
| Datos que reemplazados para valores 0 no correspondientes con los adyacentes. | |
| Datos que reemplazados celdas vacías. | |

| | |
|---|---|
| Valores por encima de 1.96 desviaciones estándar. | |
| Valores por encima de 2.58 desviaciones estándar. | |

Tomando como ejemplo a la matriz de concentraciones para monóxido de carbono del 07 de julio de 2013 (Tabla 16), los índices estadísticos calculados nos dicen que: para 48 variables en la muestra, y con un 95% de confianza, se excluye el dato correspondiente al medido a las 16h00 por la estación de Carapungo, ya que sobrepasa el límite de control, y que correspondientemente (por el coeficiente de sesgo de Pearson), la distribución tiene un sesgo negativo mínimo debido al dato excluido (ver Tabla 17). Asimismo, el gráfico, el cual permite una caracterización visual de los datos, dilucidó las altas y crecientes concentraciones de monóxido de carbono calculado por la estación Carapungo (ver Ilustración 53).

*Tabla 16: Concentraciones de CO por estación - 07/07/13.*

| **CO_07/07/13** | **BELISARIO** | **CENTRO** | **CARAPUNGO** | **COTOCOLLAO** | **EL CAMAL** | **GUAMANÍ** | **LOS CHILLOS** | **TUMBACO** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **14h50** | 0.31 | 0.00 | 0.49 | 0.16 | 0.37 | 0.33 | N/A | N/A |
| **15h00** | 0.37 | 0.10 | 0.47 | 0.13 | 0.32 | 0.33 | N/A | N/A |
| **15h10** | 0.30 | 0.08 | 0.46 | 0.13 | 0.36 | 0.34 | N/A | N/A |
| **15h20** | 0.29 | 0.00 | 0.44 | 0.15 | 0.36 | 0.34 | N/A | N/A |
| **15h30** | 0.26 | 0.01 | 0.50 | 0.11 | 0.46 | 0.33 | N/A | N/A |
| **15h40** | 0.32 | 0.15 | 0.50 | 0.10 | 0.36 | 0.38 | N/A | N/A |
| **15h50** | 0.34 | 0.02 | 0.55 | 0.14 | 0.40 | 0.36 | N/A | N/A |
| **16h00** | 0.32 | 0.00 | 0.88 | 0.10 | 0.42 | 0.64 | N/A | N/A |

*Tabla 17: Variables estadísticas calculadas para concentraciones de CO por estación - 07/07/13.*

| ***CO_07/07/13*** | | |
|---|---|---|
| Tamaño muestral | ***n*** | 48 |
| Sumatoria total | $\sum$ | 14.28 |
| Media aritmética | $\bar{X}$ | 0.298 |
| Mediana | ***Med*** | 0.330 |
| Desviación estándar | ***s*** | 0.183 |
| Mínimo | ***min*** | 0.00 |
| Máximo | ***max*** | 0.88 |
| Límite de control (inf) | ***-2.58s*** | -0.176 |
| Límite de advertencia (inf) | ***-1.96s*** | -0.062 |
| Límite de advertencia (sup) | ***+1.96s*** | 0.657 |
| Límite de control (sup) | ***+2.58s*** | 0.771 |
| Coeficiente de sesgo de Pearson | ***sk*** | -0.532 |

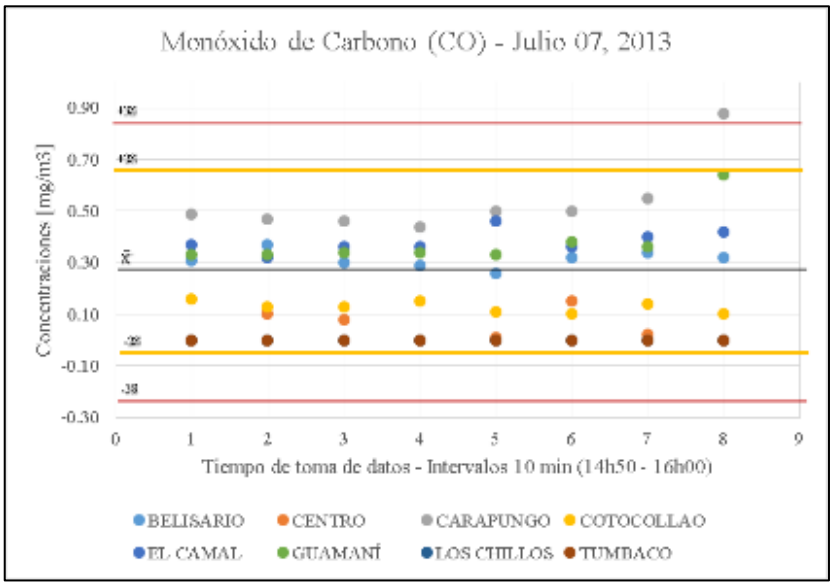



*Ilustración 53: Concentraciones de CO por estación - 07/07/13.*

Ahora, sin tomar en cuenta los valores fuera de los límites de advertencia y control, se calcularon las concentraciones del monóxido de carbono con diferenciación de día y estación (ver Tabla 18).

*Tabla 18: Promedio de concentraciones de CO por estación - 07/07/13*

| **Monóxido de Carbono (CO)** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Est./ Toma de datos** | **BEL** | **CEN** | **CAR** | **COT** | **CAM** | **GUA** | **JIP** | **CHI** | **TUM** |
| ***7-jul-13*** | 0.31 | 0.05 | 0.49 | 0.13 | 0.38 | 0.34 | N/A | N/A | N/A |

Realizando la misma acción y análisis para las matrices de concentraciones de cada contaminante en cada uno de los días establecidos, el cuadro resumen de concentraciones se lo generó en el mismo formato previo para los índices ambientales calculados en base a las imágenes satelitales, siendo N/A zonas de las que no se tiene información.

*Tabla 19: Concentración de Contaminantes Criterio Atmosféricos por día, contaminante y estación - validada.*

| *LC08_L1TP_010060_20130707_20170504_01_T1* | | **Monóxido de Carbono (CO)** | **Dióxido de Nitrógeno ($NO_2$)** | **Monóxido de Nitrógeno (NO)** | **Óxidos de Nitrógeno ($NO_x$)** | **Ozono Troposférico ($O_3$)** | **$PM_{2.5}$** | **Dióxido de Azufre ($SO_2$)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Estaciones** | **COD** | [$mg/m^3$] | [$\mu g/m^3$] | [$\mu g/m^3$] | [$\mu g/m^3$] | [$\mu g/m^3$] | [$\mu g/m^3$] | [$\mu g/m^3$] |
| *Belisario* | **BEL** | 0.195 | 7.270 | 3.270 | 10.562 | 47.190 | 8.938 | 1.495 |
| *Carapungo* | **CAR** | 0.225 | 6.567 | 5.555 | 12.142 | 49.018 | 13.662 | 2.607 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Centro Histórico* | **CEN** | 0.260 | 6.497 | 2.253 | 8.743 | 50.473 | 2.758 | 2.045 |
| *Cotocollao* | **COT** | 0.190 | 4.995 | 1.507 | 6.505 | 41.427 | 6.463 | 1.700 |
| *El Camal* | **CAM** | 0.210 | 9.153 | 3.526 | 11.628 | 49.323 | 0.645 | 1.942 |
| *Guamaní* | **GUA** | 0.235 | 6.075 | 2.448 | 8.522 | 54.758 | N/A | N/A |
| *Jipijapa* | **JIP** | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| *Los Chillos* | **CHI** | 0.255 | 5.208 | 2.763 | 7.968 | 50.790 | N/A | 1.148 |
| *Tumbaco* | **TUM** | N/A | N/A | N/A | N/A | 48.822 | N/A | 1.295 |
| *LC08_L1TP_010060_20140710_20170421_01_T1* | | | | | | | | |
| *Belisario* | **BEL** | 0.669 | 21.694 | 14.528 | 37.321 | 26.251 | 11.123 | 2.034 |
| *Carapungo* | **CAR** | 0.485 | 13.926 | 12.894 | 26.776 | 31.129 | 6.493 | 0.947 |
| *Centro Histórico* | **CEN** | 0.463 | 19.961 | 9.383 | 29.347 | 26.704 | 13.181 | 2.524 |
| *Cotocollao* | **COT** | 0.268 | 11.382 | 3.805 | 15.183 | 27.912 | 11.400 | 1.432 |
| *El Camal* | **CAM** | 0.233 | 11.594 | 8.350 | 19.931 | 31.249 | 9.424 | 2.553 |
| *Guamaní* | **GUA** | 0.384 | 10.684 | 5.339 | 16.050 | 31.723 | N/A | 0.776 |
| *Jipijapa* | **JIP** | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| *Los Chillos* | **CHI** | 0.229 | 6.089 | 3.294 | 9.379 | 32.693 | 2.209 | 1.271 |
| *Tumbaco* | **TUM** | N/A | N/A | N/A | N/A | 30.766 | N/A | 0.584 |
| *LC08_L1TP_010060_20150713_20170407_01_T1* | | | | | | | | |
| *Belisario* | **BEL** | 0.546 | 18.416 | 8.016 | 26.479 | 47.170 | 18.817 | 3.944 |
| *Carapungo* | **CAR** | 0.266 | 6.499 | 3.389 | 9.900 | 48.247 | 8.184 | 2.206 |
| *Centro Histórico* | **CEN** | 0.369 | 15.637 | 6.876 | 22.529 | 51.574 | 7.818 | 2.506 |
| *Cotocollao* | **COT** | 0.143 | 6.779 | 3.441 | 10.227 | 39.450 | 13.053 | 0.694 |
| *El Camal* | **CAM** | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| *Guamaní* | **GUA** | 0.633 | 19.450 | 9.903 | 29.369 | 48.009 | N/A | 2.559 |
| *Jipijapa* | **JIP** | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| *Los Chillos* | **CHI** | 0.313 | 9.337 | 6.251 | 15.589 | 38.046 | 5.987 | 1.300 |
| *Tumbaco* | **TUM** | N/A | N/A | N/A | N/A | 46.649 | N/A | 1.451 |

# CAPÍTULO V
# ANÁLISIS DE CORRELACIÓN - MODELOS DE PREDICTIVOS

## 17. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Calculados los valores de índices ambientales y concentraciones de contaminantes criterio atmosféricos, se procedió a generar matrices conjuntas donde se tomó en cuenta todas las variables como un solo grupo, todo en formato ".CVS". Tomando como ejemplo el promedio de concentraciones de dióxido de azufre en este caso, las nuevas matrices (ver Tabla 20) reúnieron los datos de los 3 días estudiados, generando una sola columna denominada $SO_2$, y correspondientemente los valores de NDVI, SAVI, NSI, temperatura de brillo (TB) y temperatura superficial (TS en reemplazo de LST).

Asimismo, cabe mencionar que se eliminaron los valores antes referidos como N/A con sus respectivos parámetros ambientales adjuntos, proceso en el cual se eligieron, en base a la cantidad de datos disponibles (ver Tabla 21 ), a los contaminantes criterio CO, NO, $NO_2$, $O_3$ y $SO_2$, para el siguiente paso, excluyendo igualmente a las concentraciones de $NO_x$ por físicamente ser un conjunto de NO y $NO_2$.

*Tabla 20: Concentración de SO2 conjunta e índices ambientales.*

| SO2 | NDVI | SAVI | NSI | TB | TS |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.495 | 0.160 | 0.067 | -0.121 | 23.798 | 21.890 |
| 2.607 | 0.270 | 0.164 | 0.033 | 23.346 | 21.506 |
| 2.045 | 0.103 | 0.067 | 0.020 | 23.759 | 21.970 |
| 1.700 | 0.267 | 0.159 | -0.027 | 22.999 | 21.167 |
| 1.942 | 0.113 | 0.060 | 0.034 | 22.432 | 20.666 |
| 1.148 | 0.067 | 0.047 | 0.027 | 22.866 | 21.234 |
| 1.295 | 0.305 | 0.210 | -0.090 | 22.518 | 20.802 |
| 2.034 | 0.142 | 0.074 | -0.126 | 22.906 | 24.830 |
| 0.947 | 0.281 | 0.165 | 0.026 | 22.564 | 24.422 |
| 2.524 | 0.081 | 0.047 | 0.210 | 25.261 | 27.103 |
| 1.432 | 0.280 | 0.160 | -0.018 | 22.398 | 24.250 |
| 2.553 | 0.110 | 0.061 | 0.035 | 22.845 | 24.689 |
| 0.776 | 0.279 | 0.169 | -0.013 | 21.441 | 23.257 |
| 1.271 | 0.056 | 0.035 | -0.017 | 23.546 | 25.215 |
| 0.584 | 0.298 | 0.205 | -0.086 | 22.773 | 24.591 |
| 3.944 | 0.133 | 0.047 | 0.020 | 20.960 | 22.785 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.206 | 0.132 | 0.096 | 0.027 | 17.361 | 19.041 |
| 2.506 | 0.110 | 0.072 | -0.014 | 22.005 | 23.816 |
| 0.694 | 0.311 | 0.047 | -0.129 | 18.819 | 20.442 |
| 2.559 | 0.048 | 0.055 | -0.089 | 10.391 | 11.596 |
| 1.300 | 0.071 | 0.048 | 0.010 | 21.411 | 23.064 |
| 1.451 | 0.291 | 0.189 | 0.001 | 20.694 | 22.451 |

*Tabla 21: Cantidad de datos disponibles por contaminante.*

| | **Monóxido de Carbono (CO)** | **Dióxido de Nitrógeno ($NO_2$)** | **Monóxido de Nitrógeno (NO)** | **Óxidos de Nitrógeno (NOx)** | **Ozono Troposférico ($O_3$)** | **Material Particulado Menor a 2.5 micra ($PM_{2.5}$)** | **Dióxido de Azufre ($SO_2$)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Cantidad de datos en matrices conjuntas** | 120 | 120 | 120 | 120 | 138 | 96 | 132 |

En concordancia con el análisis de mínimos cuadrados parciales descrito anteriormente, se realizó un estudio de componentes principales a la matriz de datos conjunta (parámetros físicos de cada estación, índices ambientales calculados y concentraciones de contaminantes criterio) (ver Ilustración 54). El análisis no es más que la consideración que la correlación bivariada positiva entre las variables de una matriz para modelación (multicolinealidad), podría sesgar los valores predictivos (Gaviria, 2016).

| Name | Type | Width | Decimals | Label | Values | Missing | Columns | Align | Measure | Role |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| COD | String | 3 | 0 | Código | None | None | 8 | Left | Nominal | None |
| LONG | Numeric | 8 | 4 | Longitud de la ... | None | None | 8 | Right | Scale | Input |
| LAT | Numeric | 8 | 4 | Latitud de la es... | None | None | 8 | Right | Scale | Input |
| H | Numeric | 4 | 0 | Altura de la est... | None | None | 8 | Right | Scale | Input |
| NDVI | Numeric | 8 | 3 | | None | None | 8 | Right | Scale | Input |
| SAVI | Numeric | 8 | 3 | | None | None | 8 | Right | Scale | Input |
| NSI | Numeric | 8 | 3 | | None | None | 8 | Right | Scale | Input |
| TB | Numeric | 8 | 3 | Temperatura de... | None | None | 8 | Right | Scale | Input |
| TS | Numeric | 8 | 3 | Temperatura S... | None | None | 8 | Right | Scale | Input |
| CO | Numeric | 8 | 3 | Monóxido de C... | None | None | 8 | Right | Scale | Target |
| NO2 | Numeric | 8 | 3 | Dióxido de Nitr... | None | None | 8 | Right | Scale | Target |
| NO | Numeric | 8 | 3 | Monóxido de Ni... | None | None | 8 | Right | Scale | Target |
| NOx | Numeric | 8 | 3 | Óxidos de Nitró... | None | None | 8 | Right | Scale | Target |
| O3 | Numeric | 8 | 3 | Ozono Troposfé... | None | None | 8 | Right | Scale | Target |
| PM2.5 | Numeric | 8 | 3 | Material Particu... | None | None | 8 | Right | Scale | Target |
| SO2 | Numeric | 8 | 3 | Dióxido de Azuf... | None | None | 8 | Right | Scale | Target |

*Ilustración 54: Matriz de datos conjunta SPSS.*

Mediante la utilización del software SPSS, con su herramienta “Bivariate Correlations” se estimó una matriz de datos de correlación de Pearson (de una cola por ser solo variables positivas), por la cual se clasificaron a las variables en grupos: el primero corresponde a TB y TS (con índice de correlación de 0.88, estando uno en función del otro); NDVI y SAVI

(con índice de correlación de 0.844); y, NSI (índice de correlación menor a 0.4 en relación a los otros índices ambientales) como tercer grupo (ver Anexo 10).

Luego, una vez realizada la selección de contaminantes, en la plataforma RStudio se generó una matriz de codificación base para regresión lineal múltiple, donde se tomó en cuenta para cada contaminante (*X*), todas las posibles combinaciones de ecuación lineal múltiple que fueron (ver Tabla 22):

*Tabla 22: Posibles combinaciones de las ecuaciones lineales múltiples.*

| | |
|---|---|
| **X=NDVI+NSI+TB** | **X=NSI+TB** |
| **X=SAVI+NSI+TB** | **X=NSI+TS** |
| **X=NDVI+NSI+TS** | **X=NDVI+TB** |
| **X=SAVI+NSI+TS** | **X=SAVI+TB** |
| **X=NDVI+NSI** | **X=NDVI+TS** |
| **X=SAVI+NSI** | **X=SAVI+TS** |

El procedimiento consistió en el ingreso los datos dentro de RStudio, exportando el archivo CVS (mediante la herramienta "Import Dataset", seleccionando "Text base") (ver Ilustración 55) con las nuevas matrices, donde se corrió el script previamente preparado para cada contaminante, con las combinaciones de las ecuaciones lineales múltiples (ver Anexo11), añadiendo el código "Summary" el cual calculará al mismo tiempo los índices estadísticos propios de cada ecuación, como son: la tabla ANOVA (ver Ilustración 8), el coeficiente de determinación múltiple ($R^2$) (ver Ecuación 8), el coeficiente ajustado de determinación ($R^2_{adj}$) (Ecuación 9), y la prueba general (F) (ver Ecuación 10) de cada modelo.

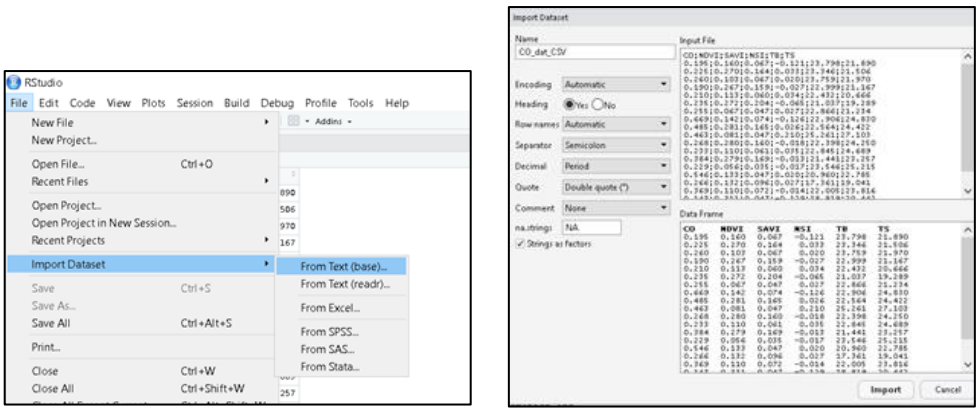
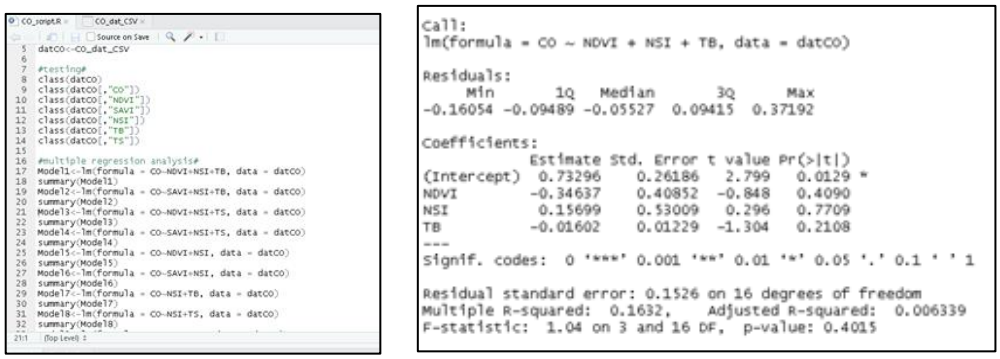



*Ilustración 55: Importación de datos RStudio.*



```
datCO<-CO_dat_CSV

#testing#
class(datCO)
class(datCO[,"CO"])
class(datCO[,"NDVI"])
class(datCO[,"SAVI"])
class(datCO[,"NSI"])
class(datCO[,"TB"])
class(datCO[,"TS"])

#multiple regression analysis#
Model1<-lm(formula = CO~NDVI+NSI+TB, data = datCO)
summary(Model1)
Model2<-lm(formula = CO~SAVI+NSI+TB, data = datCO)
summary(Model2)
Model3<-lm(formula = CO~NDVI+NSI+TS, data = datCO)
summary(Model3)
Model4<-lm(formula = CO~SAVI+NSI+TS, data = datCO)
summary(Model4)
Model5<-lm(formula = CO~NDVI+NSI, data = datCO)
summary(Model5)
Model6<-lm(formula = CO~SAVI+NSI, data = datCO)
summary(Model6)
Model7<-lm(formula = CO~NSI+TB, data = datCO)
summary(Model7)
Model8<-lm(formula = CO~NSI+TS, data = datCO)
summary(Model8)
```

```
Call:
lm(formula = CO ~ NDVI + NSI + TB, data = datCO)

Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.16054 -0.09489 -0.05527  0.09415  0.37192

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.73296    0.26186   2.799   0.0129 *
NDVI        -0.34637    0.40852  -0.848   0.4090
NSI          0.15699    0.53009   0.296   0.7709
TB          -0.01602    0.01229  -1.304   0.2108
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1526 on 16 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1632,    Adjusted R-squared:  0.006339
F-statistic:  1.04 on 3 and 16 DF,  p-value: 0.4015
```

*Ilustración 56: Script y parámetros estadísticos calculados por modelo.*

## 18. SELECCIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO ATMOSFÉRICOS Y TEMPORALIDAD

Por último, luego de correr el código para 12 modelos de cada contaminante (60 en total), y basados en el coeficiente de determinación múltiple ($R^2$), se escogió los valores mayores o aproximados a 0.5 del mismo, que se pueden interpretar como "las variables independientes (índices ambientales) explican al menos el 50% de la variación de la variable dependiente (contaminantes criterio atmosféricos)" (Lind, Marchal, & Wathen, 2012).

Solo el contaminante ozono troposférico y dióxido de azufre obtuvieron valores cercanos a $R^2 = 0.5$, y por ello fueron tomados en cuenta para los siguientes pasos (ver Anexo 12).
Los datos correspondientes a la matriz de ozono troposférico y dióxido de azufre, que presentaron altos valores de $R^2$ y $R^2_{adj}$ (ver Tabla 23) fueron escogidos, resultando en 4 ecuaciones que cumplieron con las características requeridas para $O_3$ y 3 ecuaciones para $SO_2$, a las cuales dentro del mismo software R, se sometieron al análisis de error medio cuadrático (ver Ecuación 11), escogiendo el modelo con el menor RMSE para cada contaminantes (ver Tabla 24).

*Tabla 23: Valores de $R^2$ y $R^2_{adj}$ para $O_3$ y $SO_2$ por modelo.*

| | *Valor $R^2$* | | *$R^2_{adj}$* | |
|---|---|---|---|---|
| *Ecuación base* | **Ozono Troposférico (O3)** | **Dióxido de Azufre (SO2)** | **Ozono Troposférico (O3)** | **Dióxido de Azufre (SO2)** |
| X~NDVI+NSI+TB | 0.086 | 0.310 | -0.058 | 0.195 |
| X~SAVI+NSI+TB | 0.081 | 0.295 | -0.064 | 0.178 |
| X~NDVI+NSI+TS | 0.411 | 0.313 | 0.318 | 0.198 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| X~SAVI+NSI+TS | 0.413 | 0.304 | 0.320 | 0.188 |
| X~NDVI+NSI | 0.036 | 0.276 | -0.061 | 0.200 |
| X~SAVI+NSI | 0.016 | 0.249 | -0.083 | 0.170 |
| X~NSI+TB | 0.080 | 0.211 | -0.012 | 0.128 |
| X~NSI+TS | 0.411 | 0.215 | 0.352 | 0.132 |
| X~NDVI+TB | 0.082 | 0.232 | -0.009 | 0.151 |
| X~SAVI+TB | 0.080 | 0.164 | -0.012 | 0.076 |
| X~NDVI+TS | 0.398 | 0.232 | 0.338 | 0.151 |
| X~SAVI+TS | 0.396 | 0.166 | 0.336 | 0.078 |

*Tabla 24: RMSE por modelo - O3 / SO2.*

| *RMSE* | **Ozono Troposférico (O3)** |
|---|---|
| X=NDVI+NSI+TS | 7.06106 |
| X=SAVI+NSI+TS | 7.05123 |
| X=NSI+TS | 7.06106 |
| X=NDVI+TS | 7.13534 |
| *RMSE* | **Dióxido de Azufre (SO2)** |
| X=NDVI+NSI+TB | 0.65672 |
| X=NDVI+NSI+TS | 0.65536 |
| X=NDVI+NSI | 0.67267 |

Los valores muestreados, con un nivel de confianza del 95%, nos demostraron que:

- Para la ecuación de cálculo de dióxido de carbono, el 32% de su variación es expresado por los niveles de NDVI, NSI y temperatura superficial (con sus respectivos aumentos multiplicativos) (ver Tabla 25). Los gráficos por su parte (ver Ilustración 57) nos exponen la dispersión de los valores reales en función a la ecuación lineal de modelamiento (2), y la falta de un término de orden superior (de correlación más alta) para la estimación del contaminante $SO_2$ (1).

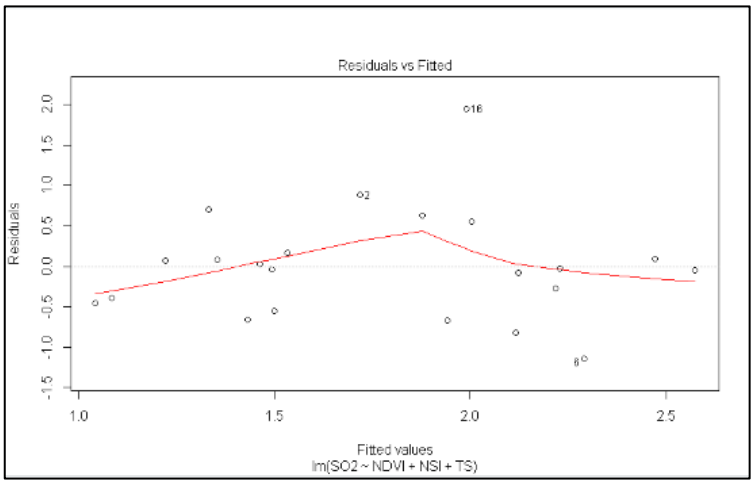
- Del mismo modo, para la ecuación de cálculo de ozono troposférico se afirma que el 41.3% de su variación se encontró en función de los niveles de SAVI, NSI y temperatura superficial, junto a una alta correlación espacial con este último (**) (ver Tabla 26). Y en cuanto a sus gráficos (ver Ilustración 58), primero se pudo observar la dispersión de los valores reales en función a la ecuación lineal de modelamiento

(4), y posteriormente se presentó de nuevo la falta de un término de orden superior para la estimación del contaminante $O_3$ (3).

*Tabla 25: Coeficientes de modelo predictivo - SO2.*

| *Coeficientes* | **Punto de intersecto*** | **NDVI** | **NSI** | **TS** |
|---|---|---|---|---|
| **Dióxido de Azufre ($SO_2$)** | 3.576 | -2.849 | 3.564 | -0.056 |

1)




2)

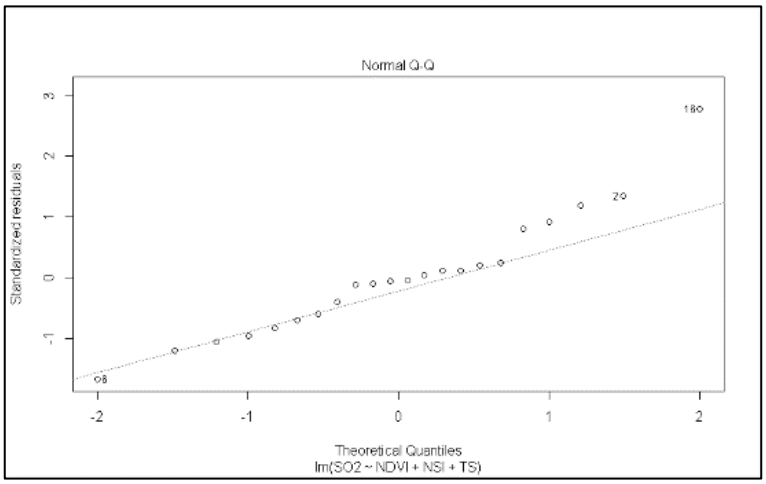
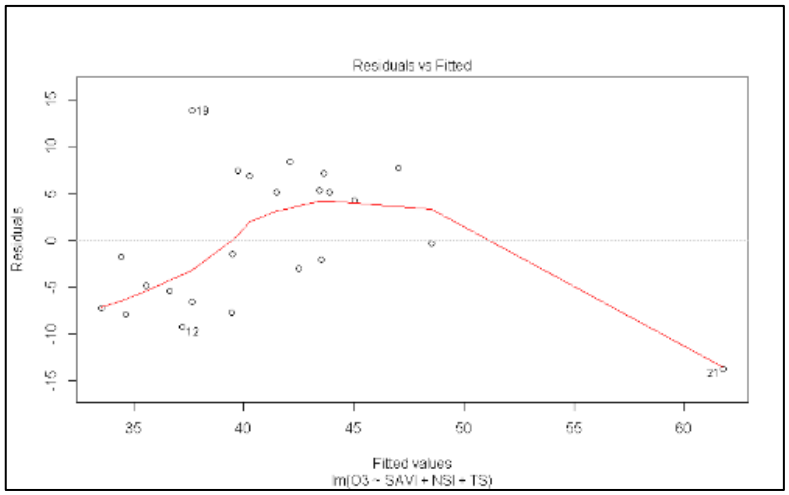



*Ilustración 57: Gráficos de modelo predictivo $SO_2$. 1- Valores de predicción versus residuales. 2- Valores teóricos versus residual.*

*Tabla 26: Coeficientes de modelo predictivo - $O_3$.*

| *Coeficientes* | **Punto de intersecto*** | **SAVI** | **NSI** | **TS** |
|---|---|---|---|---|
| **Ozono Troposférico ($O_3$)** | 87.332 | 6.175 | 17.892 | -2.094 |

3)




4)

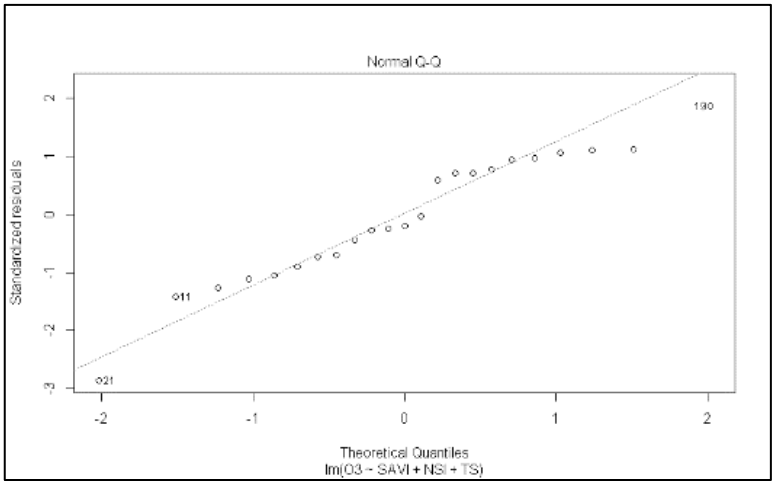



*Ilustración 58: Gráficos de modelo predictivo $O_3$. 3- Valores de predicción versus residuales. 4- Valores teóricos versus residual.*

# CAPÍTULO VI
# ELABORACIÓN DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS EN LA ZONA URBANA DEL DMQ

## 19. FORMULACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN FUNCIÓN DE ÍNDICES AMBIENTALES

Al contar con las ecuaciones junto a sus respectivos factores de ajuste, los cálculos para modelamiento espacial pasaron a la plataforma ArcGIS 10.4.1.

El primer paso del proceso consistió en la creación de una malla de puntos sobre la zona de estudio mediante el uso de la herramienta "Create Fishnet", la cual permite crear una matriz de en formato vectorial de puntos y líneas (o polígonos) en una zona rectangular (ver Ilustración 60) bajo especificaciones de coordenadas o shapefiles para definir sus límites, y siendo capaz a su vez de definir la distancia entre los puntos. En los términos de la disertación, la capa de puntos creada tomó como base la zona de estudio, y delimitó una distancia entre puntos de 90 por 90 metros (3 * 3 píxeles en para Landsat 8).

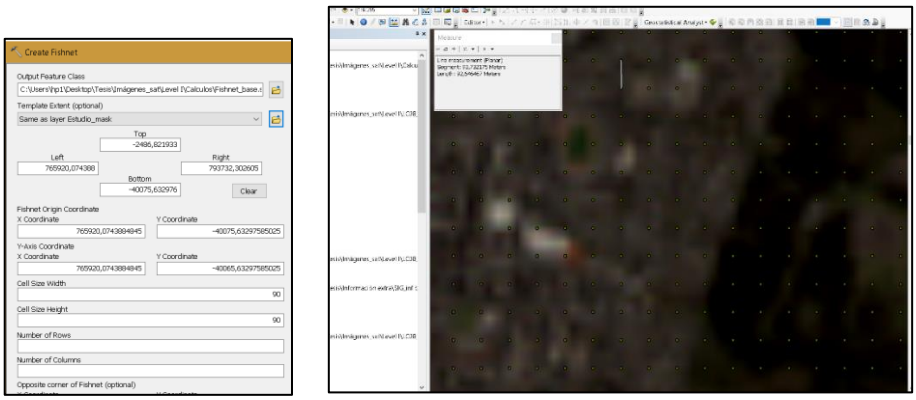



*Ilustración 59: Herramienta "Create Fishnet" - ArcGIS 10.4.1.*

Seguidamente, para la aplicación de ambas ecuaciones se utilizó la herramienta "Extract Values to Point", que extrajo para cada punto de la red sus valores correspondientes en cada raster, mismos que poseían los datos de los índices ambientales calculados. A su vez, fueron interpolados dentro de un rango de 810 $m^2$ (entre 3 * 3 píxeles de Landsat). La extensión de la herramienta "Extract Values to Point" la cual interpoló de manera bilineal fue seleccionada para que los datos en cada punto reflejen los valores de los píxeles adyacentes,

y no solo del que se encuentre por debajo, buscando una mejor aproximación a los datos reales.

Una vez extraídos los valores, estos se unieron en un archivo para el día 07 de julio de 2013, 10 de julio de 2014 y 13 de julio de 2015, mediante la herramienta "Intersect" (ver Ilustración 60), derivando un solo archivo en formato vectorial de puntos, con información de valores numéricos de cada índice ambiental y temperatura superficial.

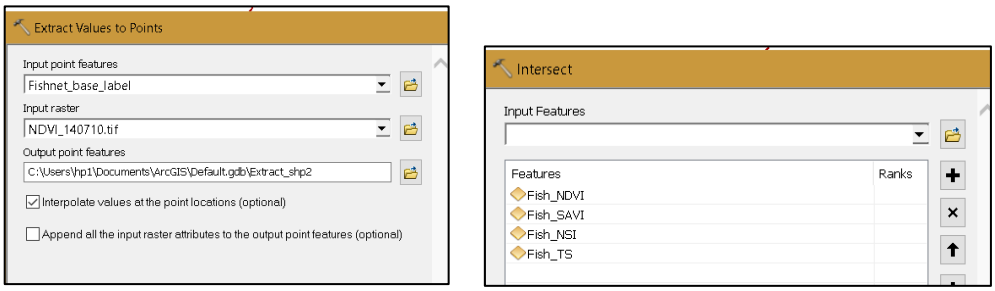



*Ilustración 60: Herramientas "Extract Values to Point" e "Intesect" - ArcGIS 10.4.1.*

En la tabla de atributos de cada uno de los archivos de compilación, con diferenciación temporal, se creó un nuevo campo en punto flotante denominado "O3_1; O3_2; y O3_3" para la predicción de concentraciones de ozono troposférico en los días de junio de 2013, 2014 y 2015 respectivamente, y de igual manera para los datos de dióxido de azufre (SO2_1; SO2_2; y SO2_3) (ver Ilustración 61).

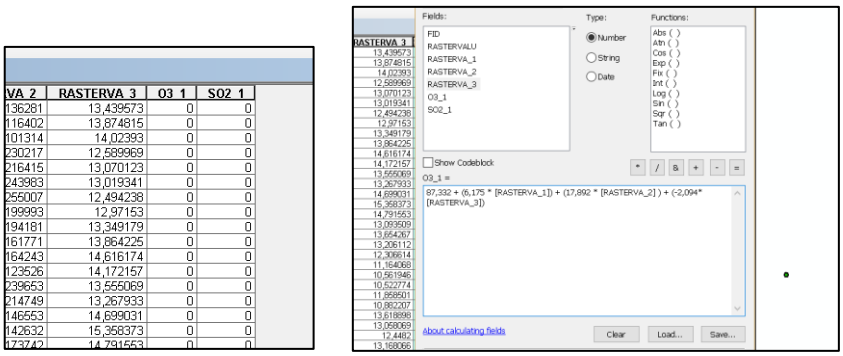


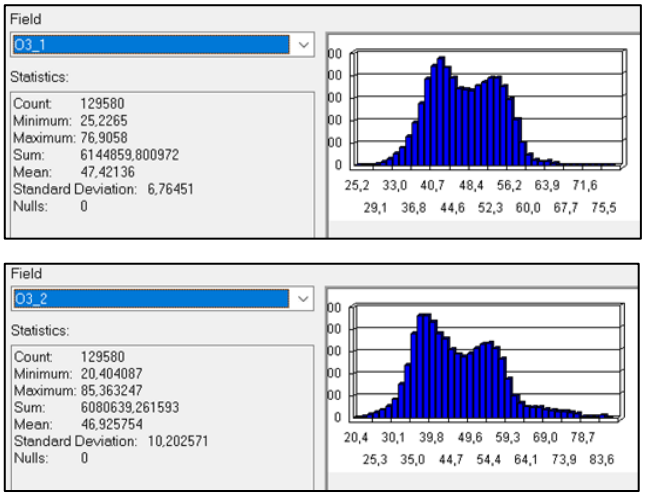

*Ilustración 61: Creación de campos y herramienta "Field Calculator" - ArcGIS 10.4.1.*

Para $O_3$, el código introducido en la herramienta "field calculator" fue: "87.332 + (6.175 * [RASTERVA_1]) + (17.892 * [RASTERVA_2] ) + ((-2.094)* [RASTERVA_3])"; mientras que para $SO_2$ fue: "3.576+((-2.849)* [RASTERVALU] )+(3.564* [RASTERVA_2] )+((-0.056)* [RASTERVA_3])" (ver Ilustración 61). Dicha herramienta

recoge los valores contenidos en las celdas adyacentes en base de una codificación, y los calcula para los nuevos campos requeridos, utilizando en este caso las ecuaciones de modelamiento linear multivariable desarrolladas en capítulos anteriores.

## 20. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE DATOS

En concordancia con el proceso de estudio geoestadístico, el análisis estructural de datos se lo realizó en base a las características estadísticas de los valores predichos, y de manera general se estimó que el comportamiento de la dispersión de los datos modelados tiene una distribución normal relativa para los 3 días de la investigación, es decir que las medidas de su media y mediana son de magnitudes iguales o similares. El histograma de cada conjunto evidencia: para $O_3$, cambios leves en aumento de valores entre las concentraciones del polucionante para el 07 de julio del 2013 y 10 de julio de 2014, con similares medias y desviaciones estándar, pero con clara diferenciación al día 13 de julio de 2015; asimismo para $SO_2$, sus valores van en aumento entre los 3 días de las mediciones. Se reitera que posiblemente estas variaciones pueden deberse a los valores calculados de los índices ambientales de las imágenes satelitales o al aumento de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos entre dichos 3 años (ver Ilustración 62 e Ilustración 63).



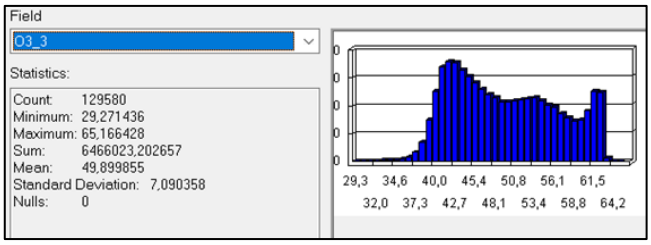



*Ilustración 62: Parámetros estadísticos para valores de modelados de $O_3$.*

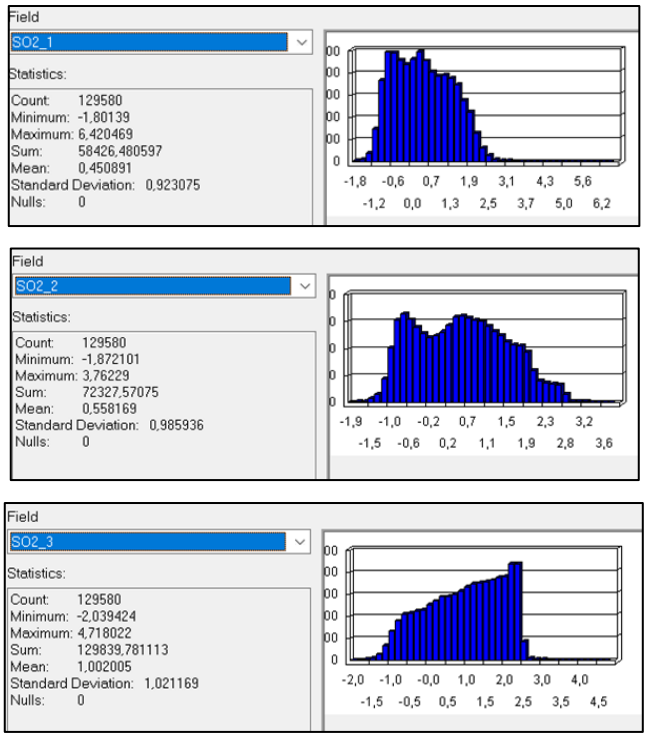



*Ilustración 63: Parámetros estadísticos para valores de modelados de $SO_2$.*

Por otro lado, y considerando el comportamiento de los datos para ambas concentraciones predichas, se estima que, por la cantidad de disponible (de 129580 puntos) , no es necesario un modelo predictivo geoestadístico como lo es Kriging, e igualmente basándose en lo dicho por Burgos & Copo (2017), se utilizó la herramienta de métodos determinísticos de interpolación IDW, ya que esta utiliza los datos de la red de puntos mediante cálculos predictivos en función inversa a la distancia (asumiendo que la superficie se encuentra en función de la ubicación).

## 21. GENERACIÓN DE MAPAS POR INTERPOLACIÓN

Una vez elegido el método para los contaminantes criterio atmosféricos $SO_2$ y $O_3$, los puntos calculados de sus concentraciones fueron interpolados mediante la herramienta "IDW" (ver Ilustración 64), con especificaciones de tamaño de pixel de 90 metros (en vez de la medida sugerida de 111.24 [m]), en función a la distancia entre los puntos modelados, y bajo el resto de parámetros por defecto .

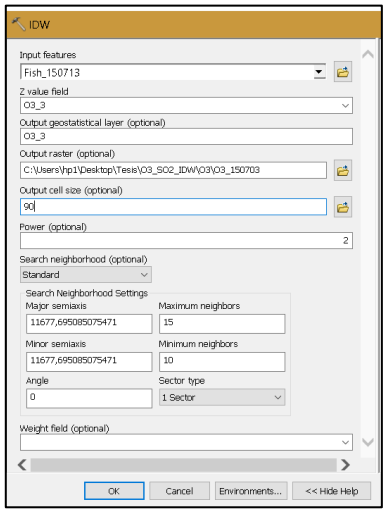



*Ilustración 64: Herramienta "IDW" - ArcGIS 10.4.1.*

Una vez interpolados, se generó una capa raster con medidas de concentraciones estimadas de $O_3$ y $SO_2$ para los días de los 3 años analizados, y mediante la herramienta "Extract by Mask" y el shapefile base "área de estudio" (ver Ilustración 65), se realizó un recorte de los modelos predictivos para presentarlos basados en los parámetros cartográficos elegidos.

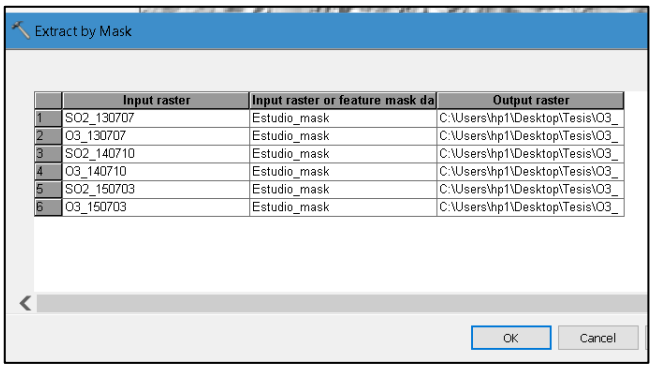
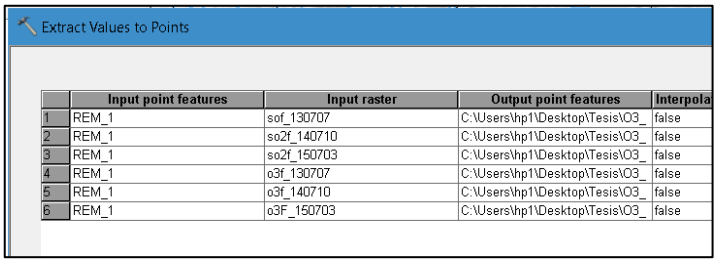



*Ilustración 65: Herramienta "Extract by Mask", formato batch - ArcGIS 10.4.1.*

A continuación de haber sido realizado el enmascaramiento, se utilizó de nuevo la herramienta “Extract Values to Points” para extraer los valores predichos de contaminantes en los puntos correspondientes  a las estaciones de la REMMAQ (ver Ilustración 66).

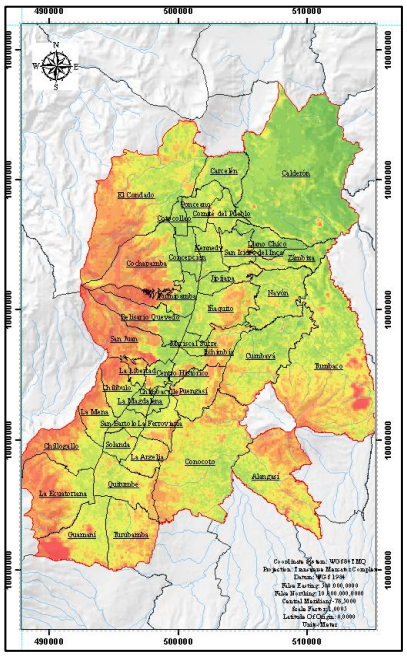


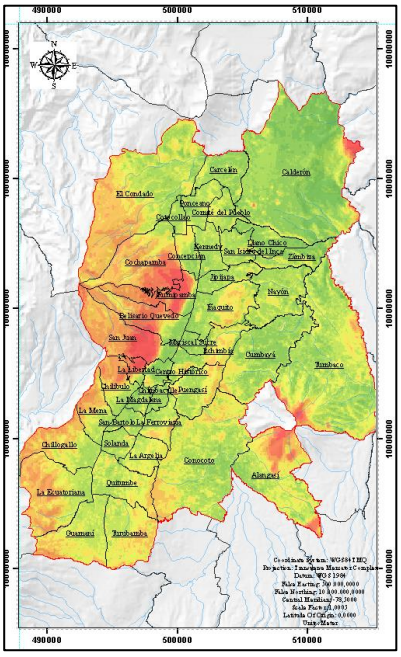

| | Input point features | Input raster | Output point features | Interpola |
|---|---|---|---|---|
| 1 | REM_1 | so_f_130707 | C:\Users\hp1\Desktop\Tesis\O3_ | false |
| 2 | REM_1 | so2f_140710 | C:\Users\hp1\Desktop\Tesis\O3_ | false |
| 3 | REM_1 | so2f_150703 | C:\Users\hp1\Desktop\Tesis\O3_ | false |
| 4 | REM_1 | o3f_130707 | C:\Users\hp1\Desktop\Tesis\O3_ | false |
| 5 | REM_1 | o3f_140710 | C:\Users\hp1\Desktop\Tesis\O3_ | false |
| 6 | REM_1 | o3F_150703 | C:\Users\hp1\Desktop\Tesis\O3_ | false |

*Ilustración 66: Herramienta “Extract Values to Points”, formato batch - ArcGIS 10.4.1.*

Finalmente, referente al formato de presentación se puede mencionar que la escala del estudio, en base a los insumos utilizados en escala 1:50000 y 1:100000, y a la acotación de escala mínima de 1:100000 sugerida por Chuvieco (2000) para imágenes Landsat de resolución espacial de 30 metros, los mapas fueron realizados en escala de 1:250000, formato A4. Los mapas resultantes son (ver Anexo 14):

- Para Ozono Troposférico (ver Ilustración 67):

a) 

b) 

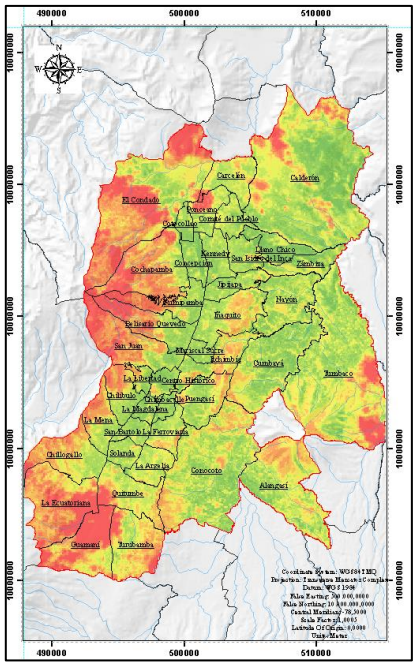
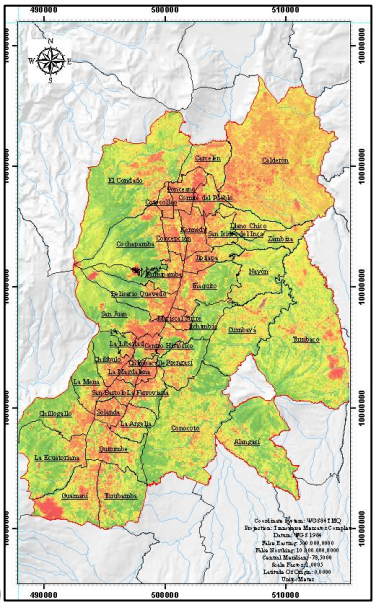
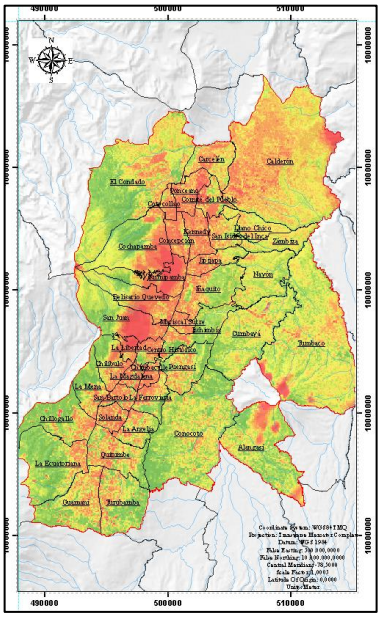
c) 

*Ilustración 67: Mapas de interpolación IDW en modelamiento de $O_3$. a) 07/07/13, b) 10/07/14, c) 13/07/15.*

- Y, para dióxido de azufre (ver Ilustración 68):

d) 

e) 

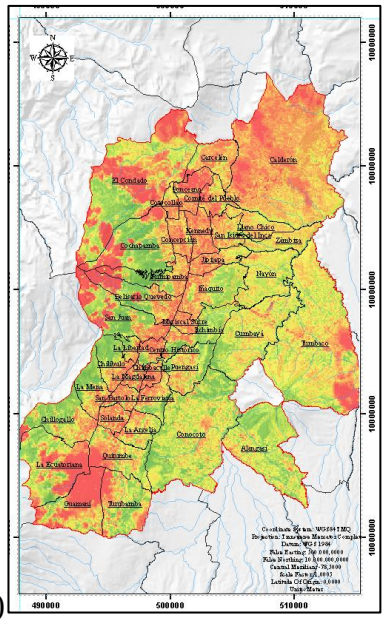
f) 


*Ilustración 68: Mapas de interpolación IDW en modelamiento de $SO_2$. d) 07/07/13, e) 10/07/14, f) 13/07/15.*

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 22. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para generar modelos de carácter multivariable, existen varios análisis los cuales aportan datos de la capacidad predictiva de los mismos, entre los que cabe mencionar: el método mínimos cuadrados parciales (PLS), utilizado en la presente disertación; el método de Regresión por Componentes Principales (PCR); el Algoritmo clásico de PLSR: NIPALS; el Algoritmo Kernel y el Algoritmo SIMPLS, entre otros (Espejo & Pino, 2017).

El método estadístico de mínimos cuadrados parciales, basado en análisis de componentes principales, primeramente nos ayudó a explicar el porqué del grado de correlación multivariada, en base a las correlaciones bivariadas entre todos los conjuntos de datos dentro de un modelo (ver Anexo 10) para evidenciar que variables son las que causarían un nivel de varianza más alto en relación con la variable independiente hasta que se explique, en este caso, el 95% de la varianza de su comportamiento (Burgos & Copo, 2017). El caso estudiado ahora, con una matriz de 3 componentes independientes por cada variable dependiente, no se enfrascó en el análisis de varianzas relativas, sino más bien, en la designación del parámetro independiente que fue más determinante en los cálculos de los contaminantes.

Con un nivel de confianza de 95% ($\alpha = 0.05$) se puede asegurar que en base a los datos compilados correspondientes a las dos ecuaciones obtenidas:

- **Para ozono troposférico:**

La ecuación del modelo de ozono troposférico con error medio cuadrático de ± 7.05 [$\mu g/m^3$] (ver Ecuación 30), explica el 41.3% ($R^2$) de la variación de valores de concentración del contaminante en función a la temperatura superficial (TS), índice de diferencia normalizada de suelos (NSI) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), en ese mismo orden de influencia.

La tabla ANOVA de la ecuación, nos demuestra que el índice más importante en el modelo es el la temperatura superficial, con un nivel de significancia ($\alpha$) de 0.001 y cálculo de valor de (F) de 12.837, y de (t) de -3.583; seguido por valores mínimos para NSI, y casi nulos para SAVI.

*Ecuación 30: Ecuación de predicción de $O_3$.*

$$O_{3mod} = 87.332 + 6.175(SAVI) + 17.892(NSI) - 2.094\ (TS)$$

El ozono troposférico estimado, del mismo modo, se presenta por debajo de los límites establecidos en la IQCA representados en máximo promedio ocho-horario por estación por año, más se destaca una variación anómala de los datos con respecto a las estaciones El Camal y Guamaní (ver Tabla 27).

*Tabla 27: Comparación de medidas observadas, estimadas y máximas (IQCA) - $O_3$.*

| | | | **Ozono Troposférico** | **Ozono Troposférico (Estimado)** | **Ozono Troposférico - IQCA (máximo promedio ocho-horario)** |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Estaciones** | **COD** | [µg/m$^3$] | | |
| **7/7/2013** | *Belisario* | **BEL1** | 47.190 | 37.508 | 85.15 |
| | *Carapungo* | **CAR1** | 49.018 | 39.874 | 86.80 |
| | *Centro Histórico* | **CEN1** | 50.473 | 39.330 | 97.70 |
| | *Cotocollao* | **COT1** | 41.427 | 39.915 | 73.64 |
| | *El Camal* | **CAM1** | 49.323 | 40.834 | 96.89 |
| | *Guamaní* | **GUA1** | 54.758 | 44.536 | 104.25 |
| | *Jipijapa* | **JIP1** | N/A | 40.366 | N/A |
| | *Los Chillos* | **CHI1** | 50.790 | 40.400 | 97.98 |
| | *Tumbaco* | **TUM1** | 48.822 | 40.742 | 93.80 |
| **10/7/2014** | | **BEL12** | 26.251 | 35.676 | 80.90 |
| | | **CAR12** | 31.129 | 37.398 | 84.47 |
| | | **CEN12** | 26.704 | 31.243 | 82.91 |
| | | **COT2** | 27.912 | 37.203 | 78.87 |
| | | **CAM2** | 31.249 | 35.965 | 86.46 |
| | | **GUA2** | 31.723 | 40.074 | 89.86 |
| | | **JIP2** | N/A | 35.786 | N/A |
| | | **CHI2** | 32.693 | 35.432 | 80.42 |
| | | **TUM2** | 30.766 | 36.051 | 74.50 |
| **13/7/2015** | | **BEL3** | 47.170 | 39.720 | 119.70 |
| | | **CAR3** | 48.247 | 48.761 | 112.50 |
| | | **CEN3** | 51.574 | 39.361 | 116.50 |
| | | **COT3** | 39.450 | 42.756 | 110.60 |
| | | **CAM3** | N/A | 40.831 | N/A |
| | | **GUA3** | 48.009 | 61.841 | 134.00 |
| | | **JIP3** | N/A | 41.789 | N/A |
| | | **CHI3** | 38.046 | 40.293 | 129.30 |
| | | **TUM3** | 46.649 | 40.680 | 142.30 |

Por su parte, los valores modelados tienen un sesgo positivo (sk), encontrando el 95% de los datos en valores menores 50.862 micras por metro cúbico y ninguno sobrepasando la medida de 54.26 [µg/$m^3$] (ver Tabla 30). La comparación de los datos reales y calculados nos dice que el modelo no necesariamente se acerca a los cálculos reales, ya que no sigue una distribución normal propiamente dicha (campaniforme) a pesar de los valores similares de su media y mediana (ver Ilustración 69).

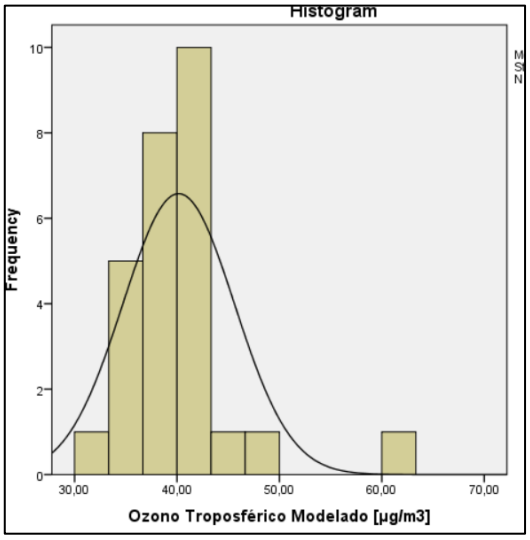



*Ilustración 69: Histograma de datos estimados - $O_3$.*

*Tabla 28: Parámetros estadísticos en comparación de medidas observadas y estimadas - $O_3$.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Tamaño muestral | ***n*** | 23 | 23 |
| Sumatoria total | ∑ | 949.372 | 1084.363 |
| Media aritmética | $\bar{X}$ | 41.277 | 40.162 |
| Mediana | ***Med*** | 46.649 | 39.915 |
| Desviación estándar | ***s*** | 9.406 | 5.459 |
| Mínimo | ***min*** | 26.251 | 31.243 |
| Máximo | ***max*** | 54.758 | 61.841 |
| Límite de advertencia (sup) | ***+1.96s*** | 59.713 | 50.862 |
| Límite de control (sup) | ***+2.58s*** | 65.545 | 54.246 |
| Coeficiente de sesgo de Pearson | ***sk*** | -1.713 | 0.136 |
| Varianza | ***s2*** | 88.48 | 29.80 |
| | | **Ozono Troposférico** | **Ozono Troposférico (Estimado)** |

A nivel de relación entre el ozono troposférico y cada una de las variables independientes por separado, se puede considerar como variable predictora más influyente a la temperatura superficial (con correlación negativa de índice de Pearson de -0.629), seguida por la temperatura de brillo (con correlación negativa de índice -0,28), más estas no pueden ser consideradas en la misma ecuación por estar correlacionadas previamente en función de sus cálculos. Por otro lado, el NSI, tiene una correlación negativa leve con un índice de -0.12 seguido por el NDVI.

```
> cor(dato3)
              O3         NDVI         SAVI         NSI          TB          TS
O3    1.000000000 -0.09101657  0.008463524 -0.1234865 -0.2807590 -0.629279525
NDVI -0.091016572  1.00000000  0.843308938 -0.3451969  0.1152489  0.067059706
SAVI  0.008463524  0.84330894  1.000000000 -0.2041149  0.1026334  0.006125777
NSI  -0.123486518 -0.34519686 -0.204114905  1.0000000  0.3253170  0.375719657
TB   -0.280758981  0.11524885  0.102633365  0.3253170  1.0000000  0.837657252
TS   -0.629279525  0.06705971  0.006125777  0.3757197  0.8376573  1.000000000
```

*Ilustración 70: Índice de correlación de Pearson - variables del modelo $O_3$.*

En otro orden de ideas, en base al cálculo del error medio cuadrático (RMSE) con diferenciación de tiempo, se asegura que el modelo aplicado a los datos del 10 de julio de 2014 es más preciso con respeto a los otros, seguido del modelo al 2015 (RMSE de ± 9.0389 [µg/m$^3$] al 2013, 6.7312 para el 2014 y 7.9990 al 2015), asumiendo que dicho resultado se debió a cantidad de datos disponibles por estación.

Finalmente, basados en los datos del IQCA para cada año, el comportamiento del $O_3$ por su capacidad de degradación al juntarse con NO (por emisiones vehiculares principalmente) formando $NO_2$, las concentraciones menores al 2013 se ubicaron en zonas como la González Suárez, la Marín, Monteserrín y Cumbaya (aprox. 15 [µg/m$^3$]); con comportamiento similar al 2014 y 2015, más en este último año se incluyó como zona de concentraciones bajas a Seminario Mayor (Secretaría de Ambiente, 2015). Tomando todo esto en cuenta, y tomando el modelo correspondiente al 13 de julio de 2015, se pudo ver una correspondencia de datos visual, con los puntos de alta concentración de $O_3$ en las varias zonas de DMQ (ver Ilustración 71), donde se menciona también que la concentración fuera de las zonas urbanas con alta densidad poblacional podría deberse a factores como la dirección del viento y mayores alturas, como menciona Burgos & Copo (2017).

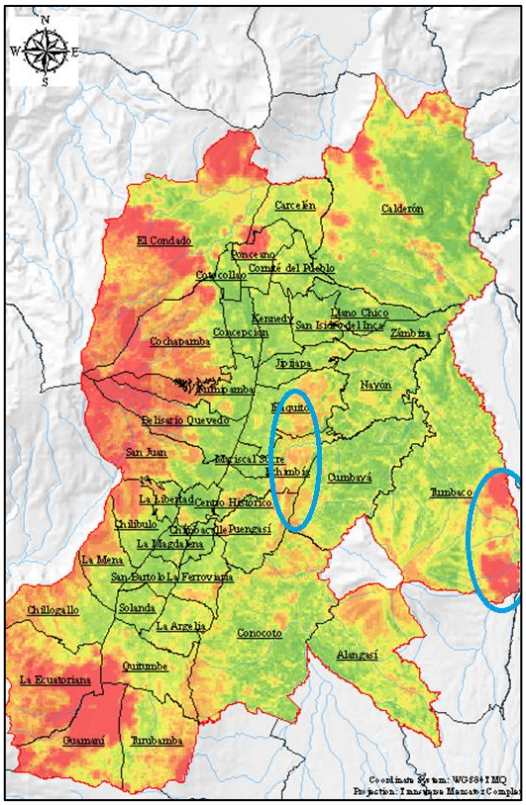



*Ilustración 71: Sectores de mayor concentración de $O_3$ - IQCA.*

- **Para dióxido de azufre:**

Asimismo la ecuación para $SO_2$, con un error medio cuadrático de ± 0.65 [µg/m$^3$] (ver Ecuación 31), explica el 32.3% de la variación de valores de concentración de dióxido de azufre en función del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de diferencia normalizada de suelos (NSI) y la temperatura superficial (TS), en orden de influencia.

La tabla ANOVA de esta ecuación por su parte, nos demuestra que el índice más importante en el modelo es el NDVI, con un nivel de significancia (α) de 0.01 y un cálculo de valor de (F) de 5.9, y de (t) de -1.6; seguido por valores similares de NSI de (t) de 1.5 y (F) de 1.32; y casi nulos para TS.

*Ecuación 31: Ecuación de predicción de $SO_2$.*

$$SO_{2mod} = 3.576 - 2.849(NDVI) + 3.564(NSI) - 0.056\ (TS)$$

El valor de dióxido de nitrógeno modelado a su vez se presenta por debajo de los límites establecidos en la IQCA representados en máximo promedio diario por estación por año,

destacando por segunda vez la variación anómala de los datos con respecto a las estaciones El Camal y, en cambio para este contaminante, Los Chillos (ver Tabla 29).

*Tabla 29: Comparación de medidas observadas, estimadas y máximas (IQCA) - $SO_2$.*

| | | | **Dióxido de Azufre** | **Dióxido de Azufre (estimado)** | **Dióxido de Azufre (promedio diario IQCA)** |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Estaciones** | **COD** | [µg/m$^3$] | | |
| **7/7/2013** | *Belisario* | **BEL1** | 1.495 | 1.126 | 15.290 |
| | *Carapungo* | **CAR1** | 2.607 | 2.126 | 12.600 |
| | *Centro Histórico* | **CEN1** | 2.045 | 2.077 | 15.140 |
| | *Cotocollao* | **COT1** | 1.700 | 1.282 | 13.250 |
| | *El Camal* | **CAM1** | 1.942 | 1.990 | 25.010 |
| | *Guamaní* | **GUA1** | N/A | 1.284 | N/A |
| | *Jipijapa* | **JIP1** | N/A | 1.824 | N/A |
| | *Los Chillos* | **CHI1** | 1.148 | 1.979 | 27.800 |
| | *Tumbaco* | **TUM1** | 1.295 | 1.771 | 13.420 |
| **10/7/2014** | | **BEL12** | 2.034 | 1.240 | 16.540 |
| | | **CAR12** | 0.947 | 2.054 | 12.010 |
| | | **CEN12** | 2.524 | 1.689 | 21.900 |
| | | **COT2** | 1.432 | 1.146 | 13.260 |
| | | **CAM2** | 2.553 | 1.863 | 23.620 |
| | | **GUA2** | 0.776 | 1.200 | 12.490 |
| | | **JIP2** | N/A | 1.684 | N/A |
| | | **CHI2** | 1.271 | 1.921 | 25.470 |
| | | **TUM2** | 0.584 | 1.772 | 13.230 |
| **13/7/2015** | | **BEL3** | 3.944 | 1.298 | 20.060 |
| | | **CAR3** | 2.206 | 2.218 | 18.000 |
| | | **CEN3** | 2.506 | 2.108 | 15.040 |
| | | **COT3** | 0.694 | 0.848 | 9.560 |
| | | **CAM3** | N/A | 2.003 | N/A |
| | | **GUA3** | 2.559 | 2.463 | 7.810 |
| | | **JIP3** | N/A | 1.926 | N/A |
| | | **CHI3** | 1.300 | 2.101 | 40.410 |
| | | **TUM3** | 1.451 | 1.775 | 16.420 |

En cuanto a los valores modelados, estos tienen igualmente un sesgo positivo (sk), encontrando el 95% de los cálculos en valores menores 2.534 [µg/m$^3$] y asumiendo que ninguno sobrepasa la medida de 2.787 [µg/m$^3$] (ver Tabla 30). Los datos reales y calculados en cambio nos dicen que el modelo se asemeja a una distribución normal y que el cálculo de las concentraciones tiene una fuerte similitud con datos reales (ver Ilustración 72).

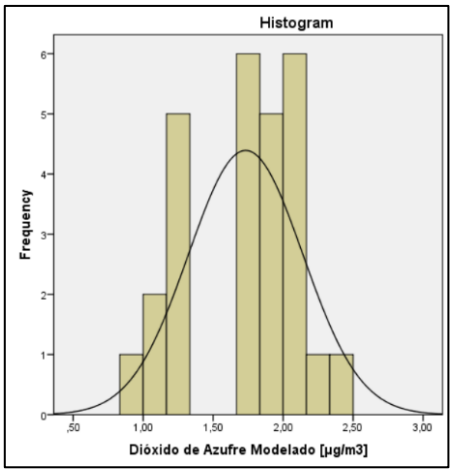



*Ilustración 72: Histograma de datos estimados - $SO_2$.*

*Tabla 30: Parámetros estadísticos en comparación de medidas observadas y estimadas - $SO_2$.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Tamaño muestral | ***n*** | 22 | 22 |
| Sumatoria total | $\sum$ | 39.014 | 46.769 |
| Media aritmética | $\bar{X}$ | 1.773 | 1.732 |
| Mediana | ***Med*** | 1.598 | 1.824 |
| Desviación estándar | ***s*** | 0.809 | 0.409 |
| Mínimo | ***min*** | 0.584 | 0.848 |
| Máximo | ***max*** | 3.944 | 2.463 |
| Límite de advertencia (sup) | ***+1.96s*** | 3.359 | 2.534 |
| Límite de control (sup) | ***+2.58s*** | 3.861 | 2.787 |
| Coeficiente de sesgo de Pearson | ***sk*** | 0.652 | -0.673 |
| Varianza | ***s2*** | 0.65 | 0.17 |
| | | **Dióxido de Azufre** | **Dióxido de Azufre (estimado)** |

En base a las correlaciones bivariadas para el dióxido de azufre, se puede considerar como variable predictora más influyente al NVDI (con correlación negativa de índice de Pearson de -0.271), seguido de cerca por el NSI (con correlación negativa de -0,24), y por último la Temperatura de Brillo (TB) (con correlación negativa de -0,19), pero se menciona que ninguna de las 3 presenta valores representativos, por lo menos mayores a 0.5 en los índices de Pearson.

```
> cor(datNO2)
            NO2         NDVI         SAVI         NSI          TB          TS
NO2   1.0000000 -0.27130115 -0.23970848  0.11428019 -0.1987868  0.12529478
NDVI -0.2713011  1.00000000  0.79317219 -0.27783238  0.1052455  0.04867869
SAVI -0.2397085  0.79317219  1.00000000 -0.07511101  0.0882010 -0.03292635
NSI   0.1142802 -0.27783238 -0.07511101  1.00000000  0.3808356  0.41826471
TB   -0.1987868  0.10524549  0.08820100  0.38083565  1.0000000  0.85394981
TS    0.1252948  0.04867869 -0.03292635  0.41826471  0.8539498  1.00000000
```

*Ilustración 73: Índice de correlación de Pearson - variables del modelo $SO_2$.*

En base al error medio cuadrático finalmente se asegura que el modelo aplicado a los datos del 07 de julio de 2013 es más preciso con respeto a los otros (RMSE de ±0.457 [µg/m$^3$] para el 2013, 0.8005 al 2014 y 1.065 al 2015).

Para terminar, el comportamiento de $SO_2$ en el espacio es concordante con los valores mencionados en el IQCA (ver Ilustración 74), ya que al 2013 no presenta zonas propensas de su acumulación, más en el año 2014, se sugirieron como zonas altas en presencia del compuesto (aprox. 10 [µg/m$^3$]) a los sectores de Guajaló, El Camal, la Marín, Los Chillos, Universidad Internacional, Monteserrín y Cumbaya, incluyendo al 2015 los sectores de San Roque y Conocoto (Secretaría de Ambiente, 2015).

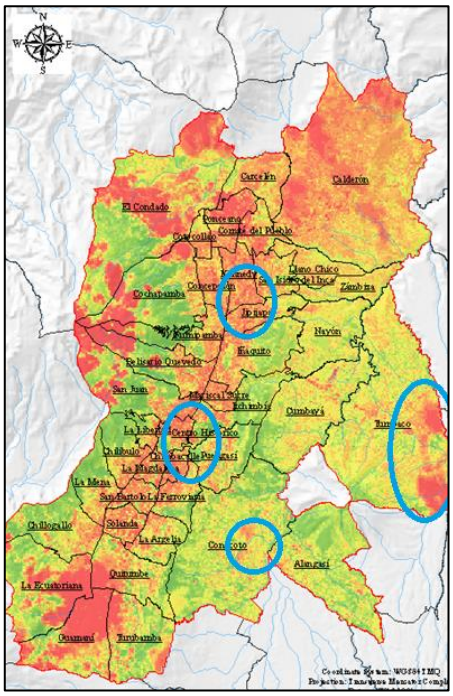



*Ilustración 74: Sectores de mayor concentración de $SO_2$ - IQCA.*

## 23. CONCLUSIONES

Primeramente se concluye que la información geoespacial existente dentro área de estudio es muy variada, más se encuentra dispersa, por cual requirió de varios pasos para su correcta utilización y aprovechamiento. En orden de realización, la adquisición y tratamiento de imágenes satelitales debe ser tomada como variable determinante en cuanto a información espacial se puede encontrar o derivar de una zona de interés. Los datos de concentraciones de contaminantes por su parte, validados por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, son primordiales para los modelos matemáticos que fueron desarrollados, y los valores anómalos tomados por cada estación, no necesariamente podrían ser datos ruido, sino más bien, focos contaminantes a los cuales se debería poner especial atención en otros estudios.

Por otro lado, la disponibilidad de información para la zona, depende de: procesos de pre-procesamiento de imágenes satelitales, que son tan variados como los productos disponibles para este de tipo de estudios, y se enfatiza que es necesaria más información en el país sobre los índices o cálculos meteorológicos que se puede realizar con la teledetección, sin mencionar el amplio campo de trabajo en el análisis de la misma y sus variaciones (sensores activos u ortofotos), que no fueron tomados en cuenta para esta disertación y servirían en conjunto como fuerte herramienta en la generación de modelos predictivos. De igual modo, en cuando a la información alfa numérica correspondiente a la REMMAQ, se pudo observar a breves rasgos las tendencias del comportamiento general de los contaminantes primarios del aire, y a pesar de que estos no siempre sobrepasan los límites establecidos en la Norma Ecuatoriana de Calidad Ambiental, si sobrepasan los establecidos internacionalmente por la Organización Mundial de la Salud, siendo un factor muy importante en el deterioro de la salud humana y en la propagación de enfermedades cardiorrespiratorias en la población.

En cuanto al estudio estadístico de correlación entre variables, y luego del análisis específico de los resultados que se presenta previamente, cabe mencionar que softwares especializados como ArcGIS, SPSS, R y R Studio, junto a programas básicos como Word y Excel, tienen una capacidad sinérgica de derivación de información, donde el primer grupo, tiene una variedad de aplicaciones de por sí muy grande en todo tipo de ámbitos en ciencias tanto humanas como exactas; destacando de igual manera la codificación del software R, que a

pesar de no estar muy bien explicada para usuarios que no la conocen, es muy adaptable y rápida en el cálculo y análisis de matrices y modelos predictivos. En base a los datos con un índice de confianza del 95%, se puede asegurar que las ecuaciones lineales múltiples tanto para ozono troposférico (con un error estadístico de cálculo de ±7.05 [µg/$m^3$]), y la ecuación para dióxido de azufre (con un error de cálculo de ±0.65 [µg/$m^3$]), se encuentran de acuerdo a los límites estipulados en la normativa ambiental vigente.

Se menciona de igual manera que en base a múltiples factores tanto fiscos como químicos inherentes de ambos compuestos, su modelamiento en los términos de esta disertación representan tan solo una parte de su variación, más bajo los índices NDVI, NSI, SAVI, temperaturas de brillo y temperatura superficial, la mayor acumulación de los mismos se presenta en las parroquias urbanas como: de $SO_2$ en las parroquias urbanas de Calderón, Carcelén, Ponciano, Comité del Pueblo, Guamaní, Tumbaco y el Condado, siendo estas la de mayor densidad poblacional y con picos de contaminación que se repiten a través de los 3 años, seguidos por índices menores en toda la zona centro alrededor de los principales ejes viales de la ciudad. Finalmente, con comportamiento similar para $O_{3,}$ se destacan las zonas con menos densidad poblacional, por el contrario, como las parroquias urbanas de Tumbaco, Iñaquito, Mariscal Sucre, Guamaní y San Juan, en concordancia con lo estipulado en los IQCA, que deduce este comportamiento a la combinación del contaminante con monóxidos de nitrógeno para la formación de $NO_{2.}$

Finalmente, los métodos de interpolación elegidos, en este caso analizados de manera rápida, y por la gran cantidad de datos generados por el proceso de densificación de los puntos con valores de concentraciones, hicieron que las técnicas geoestadísticas interpoladoras como Kriging, no sean necesarias, y en cambio, métodos como IDW tengan una mejor correspondencia, más necesariamente complementado con análisis de estructuras de datos.

## 24. RECOMENDACIONES

El estudio se vio limitado por la cantidad de variables ambientales analizadas, por lo que se sugiere en posteriores trabajos, la consideración de más índices ambientales derivados tanto de imágenes satelitales como de redes de monitoreo atmosféricos (tanto para mediciones meteorológicas y de contaminantes).

En base a los análisis globales de información alfa numérica se sugiere también estudios de tendencias multitemporales entre grupos de concentraciones de contaminantes criterios atmosféricos y variables meteorológicas. Ya sean estimadas por la Secretaría de Ambiente p por otras instituciones, ésta información validada podría generar investigaciones de "puntos calientes" para fuentes de contaminantes o zonas de influencia de los mismos, así como de mayores concentraciones en el día por hora o por día o por mes.

Utilizar software especializados con licencias gratuitas, de los cuales se tenga mucha información de uso y ejemplos de implementación, agilitaría los procesos de análisis de datos; todo junto a metodologías diferentes (mencionadas a lo largo de la disertación) tanto para las correcciones satelitales, como para el cálculo de variables ambientales y los análisis estadísticos que en base a la cantidad de información proporcionada podrían generar modelos más exactos del comportamiento de la acumulación de diferentes compuestos en el medio ambiente.

**BIBLIOGRAFÍA**


Acuerdo Ministerial 097-A, Registro Oficial N° 387 - Edición Especial (Ministerio del Ambiente 30 de Julio de 2015). Obtenido de https://app.vlex.com/#vid/645825397

Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (Mayo de 2014). METODOLOGÍA PARA LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE IMÁGENES ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 Y LANDSAT CON EL MÓDULO FLAASH DEL SOFTWARE ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 39-59. doi:10.15359/rgac.2-53.2

Albert, L. (2004). Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos. En Sociedad Mexicana de Toxicología, *Toxicología Ambiental* (pág. 16). Xalapa, México: Sociedad Mexicana de Toxicología. Recuperado el 26 de Julio de 2018, de http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-01a4.pdf

Alciaturi, C., Escobar, M., De La Cruz, C., & Rincón, C. (2003). Partial least squares (PLS) regression and its application to coal analysis. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*, *26*(3), 197-204. Obtenido de http://200.74.222.178/index.php/tecnica/article/view/5823

Alonzo, M. (16 de Diciembre de 2013). *ENVI 5.1*. Obtenido de HARRIS Geoespatial Solutions: Product Updates: https://www.harrisgeospatial.com/Support/Maintenance/ArtMID/10427/ArticleID/16174/ENVI-51

Álvarez, C. I., & Padilla, O. (2014). *Estimación de contaminación del aire por PM10 en Quito determinado por índices ambientales obtenidos con imágenes satelitales Landsar ETM+*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Recuperado el 14 de Septiembre de 2018, de https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8753/1/AC-SGA-ESPE-047962.pdf

Anderson, D., Sweeney, D., & Williams, T. (1999). *Estadística para administración y economía*. México D.F., México: International Thomson Editores. Obtenido de http://dspace.ucbscz.edu.bo/dspace/bitstream/123456789/13206/1/10003.pdf

Aranguéz, E., Ordónez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernánde, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999, Marzo). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública SciELO*, 13. Retrieved Julio 13, 2018, from https://www.scielosp.org/pdf/resp/1999.v73n2/123-132/es

Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8.* INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Bogotá: INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Recuperado el 12 de Marzo de 2018, de http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf

Arozarena, A. (2010). *Teledetección y Sistemas de Tratamiento Digital de Imágenes.* Madrid. Recuperado el 11 de Septembre de 2018, de file:///C:/Users/hp1/Desktop/Tesis/Im%C3%A1genes_sat/microsoft-word-teledeteccion_y_sist_tratamiento_digital_imagenes.pdf

Arozarena, A., Otero, I., & Ezquerra, A. (2016). *Sistemas de Captura de la Información: Fotogrametría y Teledetección.* Madrid, España: Lettera63. Recuperado el 2 de Septiembre de 2018

Arregui, B. (2014). *Modelo de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos.* Adelca. Quito: Adelca.

Astudillo, M. (2012). *Modelación de dispersión espacial de contaminantes del aire en la ciudad de Cuenca.* Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Posgrados. Quito: Repositorio Digital USFQ. Obtenido de http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/1858

Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Hindawi Publishing Corporation*, 1-9. doi:10.1155/2016

Ballester, F., Tenías, J. M., & Pérez, S. (2005). CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA, CAMBIO CLIMÁTICO Y SALUD. *Revista Española de Salu Pública SciELO*, 17. Recuperado el 19 de Julio de 2018, de https://www.scielosp.org/pdf/resp/2005.v79n2/159-175/es

Barrios, L. (2005). *DEFINICIÓN. CONCEPTOS BÁSICOS*. (UNIDAD DIDÁCTICA: ESTADÍSTICA.) Obtenido de Curso: 2º Bachillerato de Ciencias de la Salud e Ingeniería.: http://recursostic.educacion.es/descartes/web/materiales_didacticos/unidimensional_lbarrios/definicion_est.htm

Barsi, J., Schott, J., Palluconi, F., & Hook, S. (2005). Validation of a Web-Based Atmosféric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments. (J. Butler, Ed.) *Earth Observing Systems X*, 1-7. doi:10.1117/12.619990

Bazante, P. A. (2015). *Análisis de la concentración de contaminantes atmosféricos de origen primario y mixto en relación a la variación de las condiciones meteorológicas en el Distrito Metropolitano de Quito.* Universidad San Francisco de Quito. Quito: Repositorio Digital USFQ. Obtenido de http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/4786

Buendía, L., Colás, P., & Hernández, F. (2001). *Métodos de investigación en Psicopedagogía.* Madrid: McGraw-Hill. Obtenido de https://www.ugr.es/~ugr_unt/Material%20M%F3dulo%201/variables.pdf

Burgos, M., & Copo, K. (2017). *Estimación de la concentración de ozono troposférico (O3), mediante análisis geoespacial de imágenes satelitales y mínimos cuadrados parciales (PLS), para las parroquias urbanas del cantón Quito.* Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Recuperado el 12 de Junio de 2018, de http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/13688

Buzai, G. (2008). *Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Cartografía Temática.* Buenos Aires: Lugar Editorial S.A. doi:978-950-892-298-4

Camara, A. O. (2005). *Método Contextual para Fusión de Datos.* Universidad Nacional Autónoma de México. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/437/camarasanchez.pdf?sequence=14

Campello, D. (2018). *Ejemplo de Regresión Lineal Múltiple.* Universidad Simón Bolívar. Caracas: Laboratorio Docente de Computación. Obtenido de https://ldc.usb.ve/~moises/estadistica/Ej_Regresion_Lineal_Multiple_Zoritza.pdf

Cazau, P. (2006). *Fundamentos de estadística.* Buenos Aires. Obtenido de file:///C:/Users/hp1/Downloads/Fundamentos_de_estadistica.pdf

Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Tercera ed.). Madrid, España: Anzos S.L. doi:2.201-2000

Chuvieco, E. (2008). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Tercera ed.). Madrid, España: Anzos S.L. Recuperado el 13 de Febrero de 2018

Chuvieco, E. (2008). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Tercera ed.). Madrid, España: Anzos S.L. Recuperado el 13 de Febrero de 2018

Chuvieco, E. (2010). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach* (Segunda ed.). doi:9781498728058

Comité Nacional sobre el Clima. (2001). *Cambio Climático.* Ministerio del Ambiente. Quito: Luis Cáceres Silva.

Consitución de la República del Ecuador, Registro Oficial N° 449 (20 de Octubre de 2008).

Consorcio Sanitario de Barcelona. (s.f.). *Los óxidos de nitrógeno (NOx) en el aire urbano y la salud.* Recuperado el 16 de Agosto de 2017, de ¿Qué son y de dónde proceden?: http://www.aspb.cat/

Contreras, A. M., García, G., & Icaza, B. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F.: Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable. Recuperado el 11 de Agosto de 2018, de http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf

Copernicus Global Land Service. (2017). *Copernicus Global Land Service Web Site*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2017, de Land Surface Temperature: http://land.copernicus.eu/global/products/lst

Cuesta, O., & Cabrera, A. (1994). El dióxido de nitrógeno (NO2) troposférico en diferentes sistemas meteorológicos en dos localidades de la Cd. de La Habana. (U. N. México, Ed.) *Atmósfera, VII*, 17. Recuperado el 14 de Agosto de 2018, de http://www.redalyc.org/pdf/565/56507102.pdf

Cui, L., Li, G., Ren, H., He, L., Liao, H., Ouyang, N., & Zhang, Y. (2014). *Assesment of atmospheric correction methods for histórical Landsat TM images in the coastal zone: A case study in Juangsu, China.* Beijing: European Journal of Remote Sensing. doi:10.5721/EuJRS20144740

Delgado, O. (2006). *SOCIEDAD Y NATURALEZA EN LA GEOGRAFÍA HUMANA: Vidal de la Blance y el problema de las influencias geográficas.* Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geografía. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de https://www.sogeocol.edu.co/documentos/POSIBILISMO.pdf

Díaz, M. (2002). *Geoestadística Aplicada.* México: Instituto Geofisica UNAM. Obtenido de http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/GeoEstadistica.pdf

Díaz, V., & Páez, C. (2006). *Contaminacipon por material particulado en Quito y caracterización quimica de las muestras.* Quito: Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito - CORPAIRE. Recuperado el 16 de Agosto de 2018, de file:///C:/Users/hp1/Downloads/121-236-1-SM.pdf

Echeverría , A. X. (2012). *Análisis Espacial de la Variación de las Concentraciones de NO2, O3, SO2 y BX provenientes de zonas de alta concentración poblacional y alto tráfico vehicular en el distrito metropolitano de Quito, utilizando herramientas geoestadísticas.* Escuela Politécnica del Ejercito, Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejercito. Obtenido de http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5113

Escobar, J. (s.f.). *La Constante de Planck*. Obtenido de EL UNIVERSO Y EL HOMBRE: https://astrojem.com/teorias/constantedeplanck.html

Espejo, L., & Pino, R. (2017). *Modelo PLS.* Sevilla: Facultad de Matemáticas. Obtenido de https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/63227/Espejo%20Alonso%20Luc%C3%ADa%20TFG.pdf?sequence=1

ESRI. (2016). *ArcGIS for Desktop*. Recuperado el 26 de Julio de 2017, de Comparar métodos de interpolación: http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/comparing-interpolation-methods.htm

ESRI. (2018). *¿Qué es ArcGIS?* Obtenido de Plataforma ArcGIS: http://www.sigsa.info/productos/esri/plataforma-arcgis

ESRI España. (2017). *ESRI España*. Recuperado el 11 de Agosto de 2017, de ¿Qué es un SIG?: http://www.esri.es/descubre-los-gis/

Flores, J. (1997). Contaminantes atmosféricos primarios y secundarios. En U. A. Azcapotzalco, *Introducción a la Toxicología Ambiental* (pág. 27). México D.F., México: Departamento de Ciencias Básicas. Recuperado el 30 de Julio de 2018, de http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-02a9.pdf

Gaviria, C. (2016). *Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales PLS Aplicada a Datos Variedad Valuados.* Universidad Nacional de Colombia. Medillín: Facultad de Ciencias, Escuela de Estadística. Obtenido de http://bdigital.unal.edu.co/53233/1/8105560.2016.pdf

Gilmore, S., Saleem, A., & Dewan, A. (2015). *Effectiveness of DOS (Dark-Objetc Substraction) method and water index techniques to map wetlands un a rapidily urbanising megacity with Landsat 8 data.* Brisbane: CEUR Workshop Proceedings. Recuperado el 20 de Setiembre de 2018, de http://ceur-ws.org/Vol-1323/paper41.pdf

Guamán, M. (Junio de 2015). *GIS - Aplicaciones*. Recuperado el 30 de Octubre de 2017, de Procesamiento de Imágenes Térmicas: https://sig-aplicaciones.blogspot.com/2015/06/obtencion-de-la-temperatura-de-la.html

Hueso, A., & Cascant, J. (2012). *Metodología y Técnicas Cuantitativas de investigación.* Valencia: Universitat Politécnica de Valencia. Obtenido de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17004/Metodolog%EDa%20y%20t%E9cnicas%20cuantitativas%20de%20investigaci%F3n_6060.pdf?sequence=3

Huete, A. (Agosto de 1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *ScienceDirect, XXV,* 295-309. doi:10.1016

IBM Analytics. (2018). *IBM SPSS Software*. Obtenido de Tecnología: https://www.ibm.com/analytics/ec/es/technology/spss/

Irons, J., Taylor, M., & Rocchio, L. (7 de Agosto de 2018). *History*. Recuperado el 22 de Agosto de 2018, de Landsat Science: https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/history/

Irons, J., Taylor, M., & Rocchio, L. (7 de Septiembre de 2018). *Landsat 8*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2018, de Landsat Science: https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/

Jiménez, W. (2015). *Cartografía de suelos con cangahuas mediante teledeteccpon en los cantones de Cayambe, Pedro Moncayo y Pimampiro, Sierra Norte de Ecuador.* Quito: Universidad Central del Ecuador. Recuperado el 15 de Septiembre de 2018, de file:///C:/Users/hp1/Downloads/T-UCE-0004-31.pdf

León, Y. (2002). *Introducción a las Imágenes Satelitales.* 23: Centro de Investicaciones Geoespaciales. Recuperado el 11 de Septiembre de 2018, de http://percepcion-remota.intec.edu.do/Material%20de%20apoyo%20sensores%20remotos.pdf

Lind, D., Marchal, W., & Wathen, S. (2012). *Estadística aplicada a los negocios y la economía* (Decimoquinta ed.). (M. Zapata, Ed.) México D.F., México: McGRAW-HILL/Interamericana Editores. doi:978-970-10-6674-4

Lira, J. (2011). *La Percepción Remota* (Segunda ed.). México D.F., México: Instituto Geofísico de la UNAM. Recuperado el 11 de Agosto de 2018

Marín, J. (2010). *Introducción al análisis multivariante y al cálculo matricial*. Obtenido de http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/AMult/tema1am.pdf

Markam, B. (25 de Octubre de 2018). *Atmospheric Correction Parameter Calculator*. (M. Brian, Editor) Recuperado el 2 de Abril de 2018, de NASA: https://atmcorr.gsfc.nasa.gov./

Mausel, D., Brondizio, E., & Moran, E. (2002). *Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research.* Michigan: International Journal of Remote Sensing. doi:10.1080/01431160110109642

Microsoft. (2018). *Support Office*. Recuperado el 09 de Febrero de 2018, de DESVEST.M (función DESVEST.M): https://support.office.com/es-es/article/DESVEST-M-funci%C3%B3n-DESVEST-M-7D69CF97-0C1F-4ACF-BE27-F3E83904CC23

Microsoft. (2018). *Support Office*. Recuperado el 15 de Febrero de 2018, de Insertar subtotales en una lista de datos de una hoja de cálculo: https://support.office.com/es-es/article/insertar-subtotales-en-una-lista-de-datos-de-una-hoja-de-c%C3%A1lculo-7881d256-b4fa-4f81-b71e-b0a3d4a52b3a

Ministerio del Ambiente. (2010). *Plan Nacional de la Calidad de Aire.* Quito: Proyecto Calidad del Aire Fase III. Recuperado el 20 de Julio de 2018, de http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/libro-calidad-aire-1-final.pdf

Minitab 18. (2018). *¿Qué es la distribución normal?* Obtenido de Soporte Minitab 18: https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/what-is-the-normal-distribution/

Moral, F. (Enero de 2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas: Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 1-9. Obtenido de file:///C:/Users/hp1/Downloads/582-1098-1-SM.pdf

National Geographic. (2018). *GIS (geographic information system)*. Obtenido de EDUCATION: https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/geographic-information-system-gis/

Olague, J. (19 de 06 de 2015). *El método de mínimos cuadrados parciales (PLS) como herramienta de análisis causal: un modelo explicativo de los componentes de imagen de destino en función de las motivaciones de viaje del turista urbano.* Artículo del Congreso de Investigación Turística Aplicada 2015, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey. Obtenido de http://eprints.uanl.mx/6054/1/JOlague_Extenso.pdf

ONU. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 26 de Julio de 2017, de Objetivo 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles: http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/

Oswaldo, J. (2010). Método para la predicción de la dinámica temporal de la malaria en los municipios de Colombia. *Revista Panamericana de Salud Pública SciELO*, 8. Obtenido de http://www.scielo.br/pdf/rpsp/v27n3/a08v27n3.pdf

Peguero, C. (Julio de 2012). *Sensores remotos y aplicaciones en Teledeteción*. Recuperado el 12 de Junio de 2018, de Departamento de Innovación y Tecnología: http://www.academia.edu/23743025/SENSORES_REMOTOS_Y_APLICACIONES_EN_TELEDETECCI%C3%93N_GEODESIA_Y_GESTI%C3%93N_DE_RECURSOS_NATURALES_Y_PATRIMONIO_NATURAL

Pertusa, J. (2003). *Técnicas de análisis e imagen. Aplicaciones en Biología.* Valencia, España: Grupo CARDUCHE. Obtenido de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Mi9UrJQCKoEC&oi=fnd&pg=PA15&dq=p%C3%ADxel+imagen&ots=sSu_s0Njxn&sig=ciOCAktY_JuQEVaCld19O4bzE_o#v=onepage&q=p%C3%ADxel%20imagen&f=true

Plan Nacional de Desarrollo 2017 - 2021. Toda una Vida., Resolución N.º CNP-003-2017. (SENPLADES 2017 de Septiembre de 22).

Remote Sensing Systems. (2017). *Remote Sensisg Systems Web Site*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2017, de Brightness Temperature: http://www.remss.com/measurements/brightness-temperature/

Richter, R., Kellenberger, T., & Kauffmann, H. (6 de Julio de 2009). Comparison of Topographic Correction Methods. *Remote Sensing*, 13. doi:10.3390/rs1030184

Romero, J. (1967). *Estadística Aplicada.* Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Juárez. Obtenido de https://academics.utep.edu/Portals/370/TIES/Dr.%20Romero%20estad_UACJ_01.pdf

Romero, V. (2010). *Termodinámica del Cuerpo Negro y la Ley de Stefan-Boltzmann.* Universidad Nacinal Autónoma de México. México D.F.: Universidad Nacinal Autónoma de México. Obtenido de http://www.fisica.unam.mx/personales/romero/2010/Cuerpo-Negro.pdf

Ronald, W. (1998). *Probabiliades y estadística para ingenieros* (Sexta ed.). México D.F,, México: Pearson Educación. doi:970-17-0264-6

RStudio. (2018). *RStudio IDE features*. Obtenido de RStudio: https://www.rstudio.com/

Ruiz, A. (2006). *Control Estadístico de Procesos.* Madrid: Universidad Pontificia Comillas. Obtenido de http://web.cortland.edu/matresearch/ControlProcesos.pdf

Ruiz, S. E. (2013). *Modelación de la Dispersión de las emisiones de SO2 y NOx de las termoeléctricas de la ciudad de Quito en el Software Calpuff"*. EPN, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Sánchez, P. (2012). *La Teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales.* Cuenca: Universiad de Cuenca. Recuperado el 13 de Septiembre de 2018, de http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/779/1/ti839.pdf

Santarelli, S., & Campos, M. (2002). *Corrientes Epistemológicas, Metodología y Prácticas en Geografía* (Vol. I). Bahía Blanca, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional del Sur. doi:ISBN 987-9281-79-9

Secretaría de Ambiente. (2003). *Índice Quiteño de la Calidad del Aire IQCA.* Quito: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Recuperado el 3 de Agosto de 2018, de http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/iqca.pdf

Secretaría de Ambiente. (2011). *Los Contaminantes Comunes del Aire y sus efectos en la Salud Humana.* Quito: Secretaría del Ambiente. Recuperado el 22 de Agosto de 2018, de http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/contaminantes_aire_efec_salud.pdf

Secretaría de Ambiente. (2015). *Informe de Calidad del Aire en Quito.* Distrito Metropolitano de Quito: Secretaría del Ambiente. Obtenido de http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/ICA2015.pdf

Secretaría de Ambiente. (2018). *Informe de Calidad del Aire de Quito 2017.* Quito: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Recuperado el 2 de Agosto de 2018, de http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/documentos-indice-quiteno-de-calidad-del-aire#informe-calidad-del-aire-2017

Secretaría de Ambiente. (2018). *Red de Monitoreo Atmosférico*. Obtenido de Secretaría de Ambiente - Alcaldía: http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/generalidades

Secretaría del Ambiente. (2011). *NORMA ECUATORIANA DE CALIDAD DEL AIRE.* Quito: Secretaría del Ambiente DMQ. Recuperado el 29 de Julio de 2018, de http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/norma_ecuato_calidad.pdf

Secretaría del Ambiente. (2017). *Red de Monitoreo Atmosférico*. Recuperado el 12 de Octubre de 2017, de http://quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/politicas-y-planeacion-ambiental/red-de-monitoreo

Sobrino, J. (2000). *Teledetección.* Valencia: Los Autores. doi:84-370-4220-8

Solís, L. M., & López, J. A. (2003). *Principios Básicos de contaminación ambiental* (Vol. I). (L. Gómez, L. Ayala, V. Neyra, L. Magdaleno, & J. M. García, Edits.) Toluca, México: Dirección de Vinculación Investigación-Sociedad. doi:9688358134

Suárez, N. (2014). *Definiciones de Cartografía.* Montevideo: Servicio Geografico Militar de Uruguay. Obtenido de file:///C:/Users/hp1/Downloads/21Cartograf%C3%ADaRevisi%C3%B3nConceptosDefiniciones.pdf

Tecnológico de Monterrey. (s.f.). *El Estudio de Casos como técnica didáctica.* Monterrey: Dirección de Investigación y Desarrollo Educativo. Obtenido de http://sitios.itesm.mx/va/dide2/documentos/casos.PDF

Téllez, J., Rodríguez, A., & Fajardo, Á. (Marzo de 2006). Contaminación por Monóxido de Carbono: un Problema para la Salud Ambiental. *Revista de Salud Pública SciELO, 8*, 10. Recuperado el 12 de Agosto de 2018, de https://www.scielosp.org/pdf/rsap/2006.v8n1/108-117/es

The R Foundation. (26 de Octubre de 2018). *What is R?* Obtenido de R: https://www.r-project.org/about.html

Thi, T., Xuan, H., & Yhi, N. (2017). *Urban thermal environment and heat island in Ho Chi Minh City, Vietnam from remote sensing data.* Ho Chi Minh City University of Technology. Ho Chi Minh: Preprints. doi:10.20944

U.S. Geological Survey. (18 de Agosto de 2018). *Landsat 8*. Obtenido de Landsat Missions: https://landsat.usgs.gov/landsat-8

U.S. Geological Survey. (18 de Agosto de 2018). *Landsat Processing Details*. Obtenido de Landsat Missions: https://landsat.usgs.gov/landsat-processing-details

Unidad Ejecutora: Gestión de Proyectos Sectoriales. (2018). *Metodología para la Clasificación de Coberturas a partir del procesamiento de imágenes satelitales.* Ministerio de Agricultura y Riego. Lima: UEGPS. Recuperado el 22 de Septiembre de 2018, de http://www.gisandbeers.com/RRSS/Publicaciones/Manual-de-procesamiento-de-imagenes-satelite-ENVI.pdf

Universidad Tecnológica de Monterrey. (2018). *Cirros*. Obtenido de Agrupación para el Impulso y Desarrollo de la Astronomía: http://www.cca.org.mx/cca/cursos/AIDA/Las_nubes_y_la_observacion_climatica_v2.0/ch02s01.html

Universitat Jaume I. (2003). *Tema 3: Control Estadístico de Procesos.* Universitat Jaume I. Castellón de la Plana: Universitat Jaume I. Obtenido de http://www3.uji.es/~epifanio/DOCENCIA/etig/t3.pdf

Uribe, J. (9 de Febrero de 2017). *Modelos de regresión lineal múltiple*. Obtenido de Estadística, análisis y diseño de experimentos: http://doestatistics.blogspot.com/2017/02/modelos-de-regresion-lineal-multiple.html

USGS. (Enero de 2015). *Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) Level-1 Data Products*. Obtenido de Long Term Archive: https://lta.cr.usgs.gov/L8

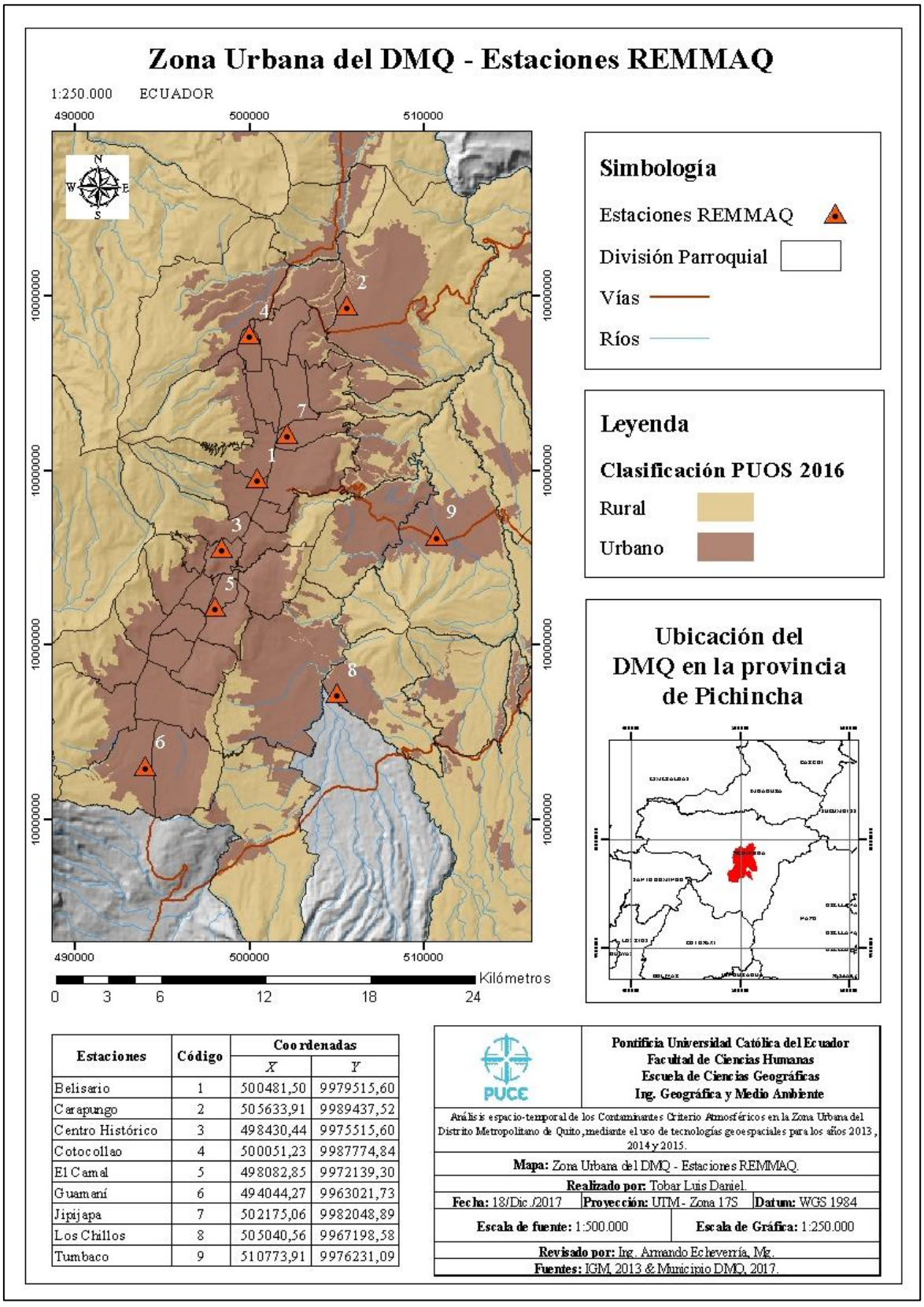
Valdez, D. (Noviembre de 2010). Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales. *Revista Varianza*(7), 1-5. Obtenido de http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S9876-67892010000100005&script=sci_arttext

Velasco, D. (2017). *Correlación entre la fragmentación ambiental y degradación ambiental del manglar con la reducción en las capturas de Pinchagua (Opisthonema Spp).* Sangolquí: Univesidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Obtenido de file:///C:/Users/hp1/Downloads/T-ESPE-053715.pdf

Zanter, K. (2018). *LANDSAT 8 (L8) Data Users Handbook.* U.S. Geological Survey, Department of the Interior. Sioux Falls: U.S. Geological Survey. Obtenido de https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook.pdf

## ANEXOS

### 1. Zona urbana del DMQ – estaciones REMMAQ




| Estaciones | Código | Coordenadas | |
|---|---|---|---|
| | | X | Y |
| Belisario | 1 | 500481,50 | 9979515,60 |
| Carapungo | 2 | 505633,91 | 9989437,52 |
| Centro Histórico | 3 | 498430,44 | 9975515,60 |
| Cotocollao | 4 | 500051,23 | 9987774,84 |
| El Camal | 5 | 498082,85 | 9972139,30 |
| Guamaní | 6 | 494044,27 | 9963021,73 |
| Jipijapa | 7 | 502175,06 | 9982048,89 |
| Los Chillos | 8 | 505040,56 | 9967198,58 |
| Tumbaco | 9 | 510773,91 | 9976231,09 |

PUCE

**Pontificia Universidad Católica del Ecuador**
**Facultad de Ciencias Humanas**
**Escuela de Ciencias Geográficas**
**Ing. Geográfica y Medio Ambiente**

Análisis espacio-temporal de los Contaminantes Criterio Atmosféricos en la Zona Urbana del Distrito Metropolitano de Quito, mediante el uso de tecnologías geoespaciales para los años 2013, 2014 y 2015.

**Mapa:** Zona Urbana del DMQ - Estaciones REMMAQ.

**Realizado por:** Tobar Luis Daniel.

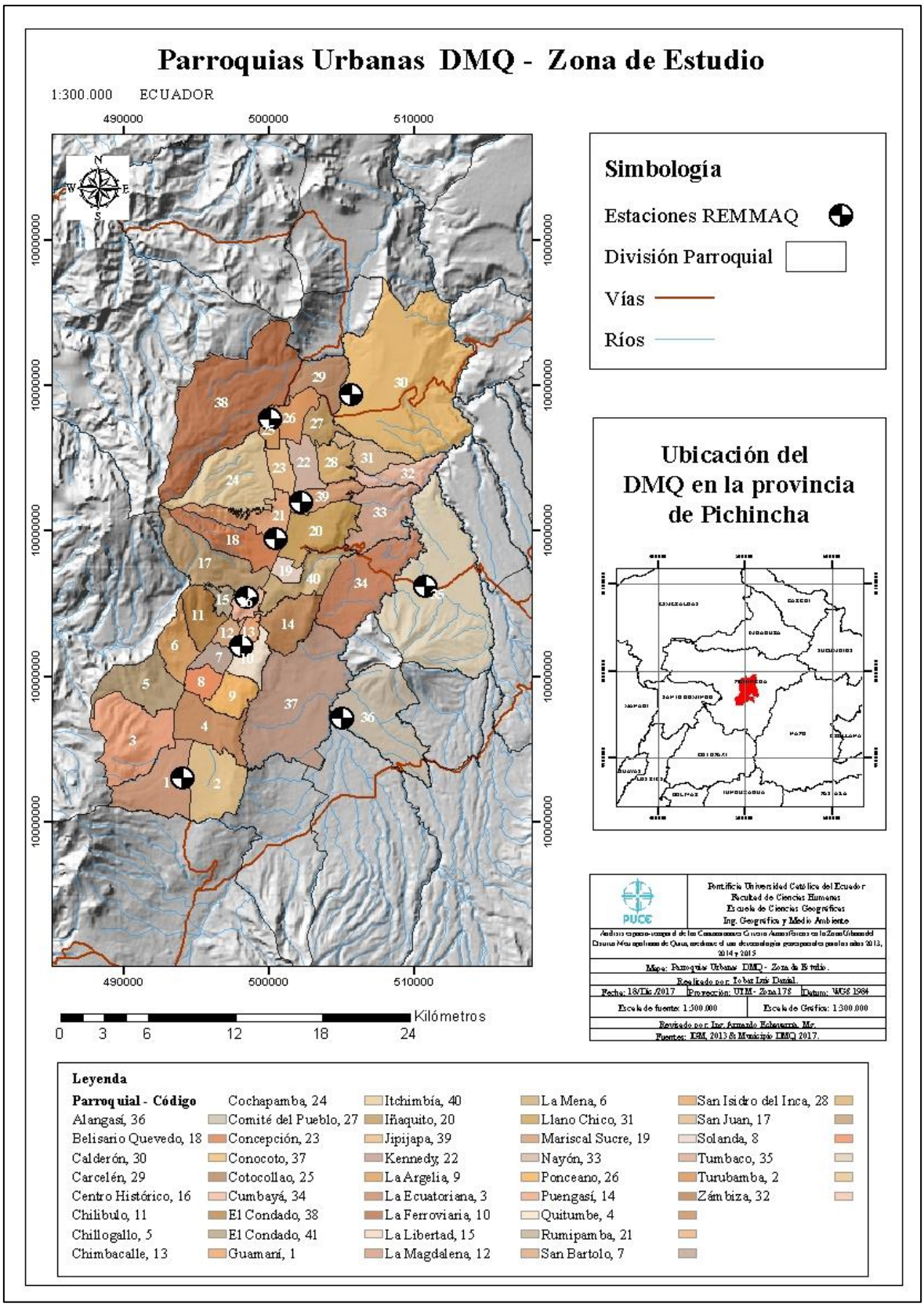
**Fecha:** 18/Dic./2017 | **Proyección:** UTM - Zona 17S | **Datum:** WGS 1984

**Escala de fuente:** 1:500.000 | **Escala de Gráfica:** 1:250.000

**Revisado por:** Ing. Armando Echeverría, Mg.

**Fuentes:** IGM, 2013 & Municipio DMQ, 2017.

## 2. Parroquias urbanas DMQ – zona de estudio



## 3. Solicitud de datos – Secretaría de Ambiente

Quito, 27 de noviembre de 2017.

Señora Doctora

Veronica Arias

**SECRETARIA DE AMBIENTE DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO**

Presente.

Yo, Luis Daniel Tobar Zanipattini, de C.I. 1714591987, en calidad de estudiante egresado de Ing. Geográfica y Medio Ambiente de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, le solicito a usted la información concerniente a los datos recopilados por la Red de Monitoreo Atmosférico de Quito, en intervalos de medición de diez minutos diarios, del mes de julio de los años 2013, 2014 y 2015. El motivo de la solicitud es para que los datos mencionados sean utilizados para la realización de la tesis nombrada "*Análisis espacio-temporal de los Contaminantes Criterio Atmosféricos en la Zona Urbana del Distrito Metropolitano de Quito, mediante el uso de tecnologías geoespaciales para el mes de julio de los años 2013, 2014 y 2015*" (adjuntado como anexo), y que fue conversado previamente con la Coordinadora de la REMMAQ. Como datos de contacto, le adjunto mi telélefono celular, 0983423024, y mi correo electrónico, ldtz2607@hotmail.com.

Agradeciéndole de antemano por la atención prestada a la presente.

Atentamente:

Deanira Acosta
Viernes 10 am
0998383931
2pm

Luis Daniel Tobar Zanipattini

Estudiante Geografía y Medio Ambiente

Telf: 0983423024

RECIBIDO
NOMBRE:
FECHA: 29/11/2017
16:25 pm

## 4. Carta de compromiso – Secretaría de Ambiente

SECRETARÍA DE AMBIENTE
ALCALDÍA

**CARTA COMPROMISO**
**ENTREGA DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.**

Quito DM, 12 de diciembre de 2017

Por medio de la presente yo, Luis Daniel Tobar Zanipattini, con CC: 171459198-7, Estudiante egresado de la Carrera de Ingeniería Geográfica y Gestión Ambiental de la Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ciencias Humanas, me comprometo hacer la entrega de una copia sea esta digital o impresa del proyecto de titulación tesis "Análisis espacio-temporal de los Contaminantes Criterio Atmosféricos en la Zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito, mediante el uso de tecnologías geoespaciales para los años 2013, 2014, 2015" donde utilizaré la información proporcionada por la Secretaría de Ambiente.

Cabe indicar que el uso de la información generada por la Secretaría de Ambiente será citada reconociendo la propiedad de los datos que corresponden a la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito.

Sin otro particular, suscribo.

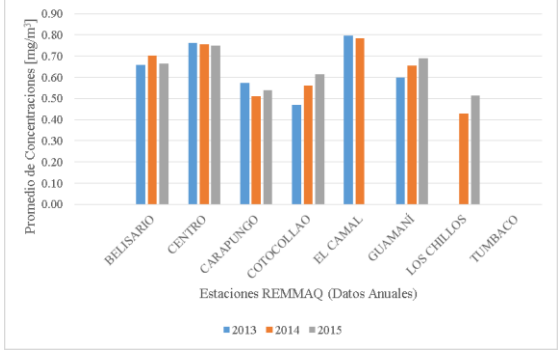
**Atentamente,**

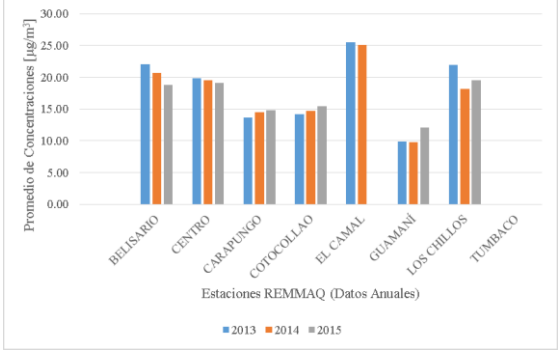
Luis Tobar
171459198-7
Cel. 0983423024
E-mail. ldtz2607@hotmail.com

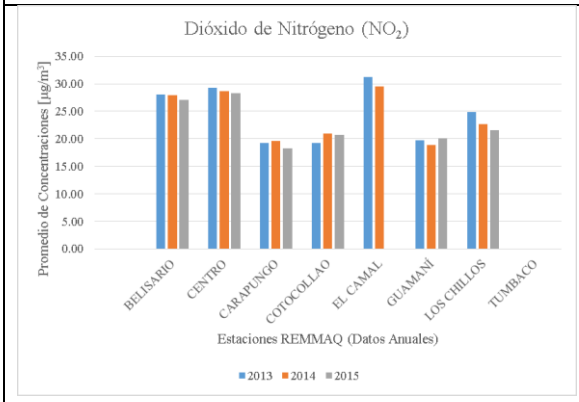
Recibí
11/12/17

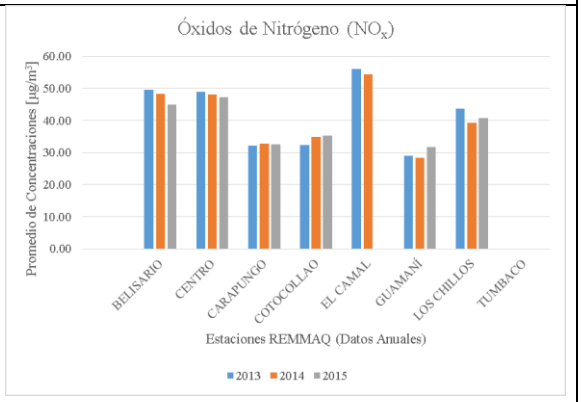
Río Coca E6-80 e Isla Genovesa | Telf.: 2430568 - 2430572 | www.quito.gob.ec

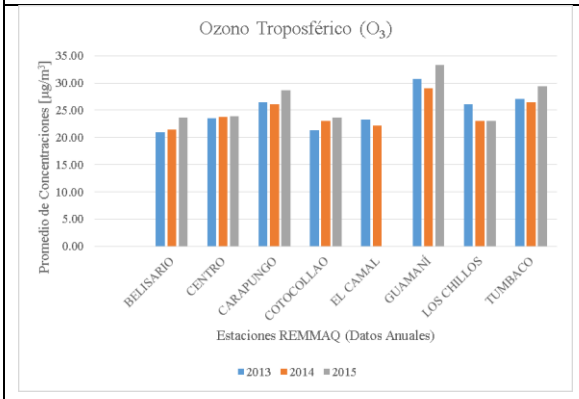
## 5. Concentración anual de contaminantes por estación

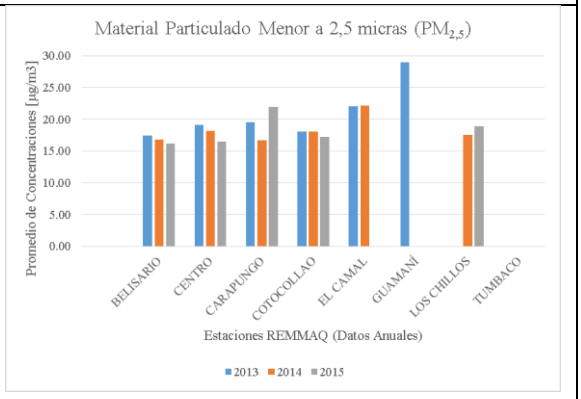


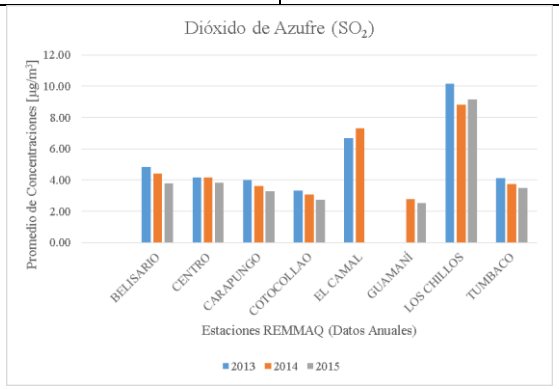



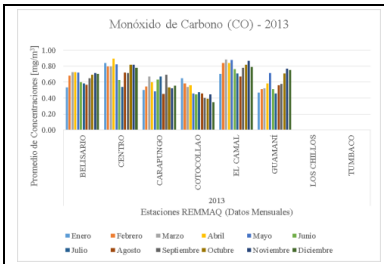



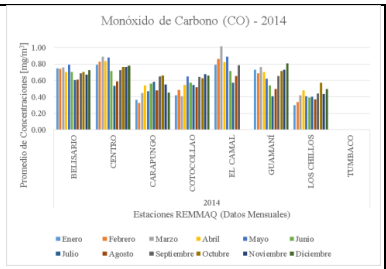



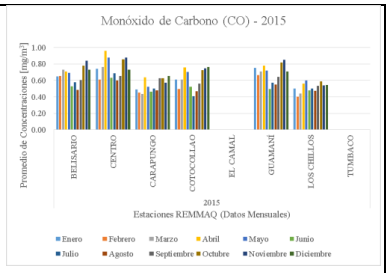



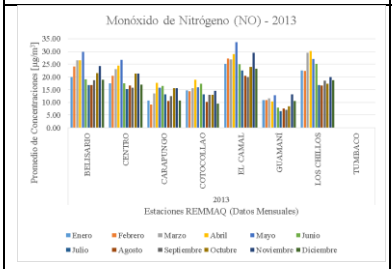



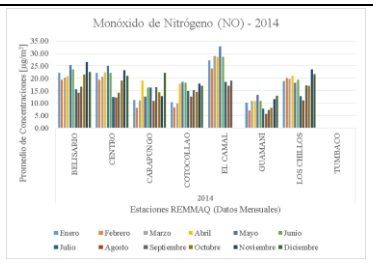
# 6. Concentración mensual de contaminantes por estación

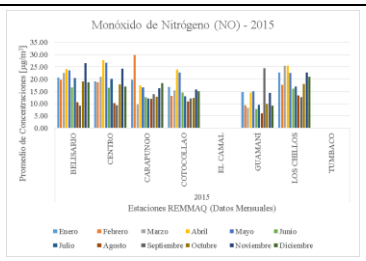


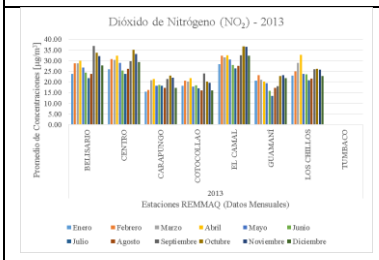



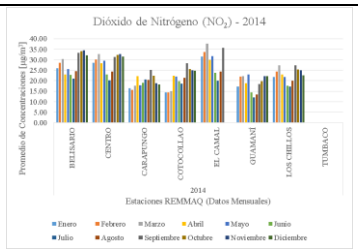



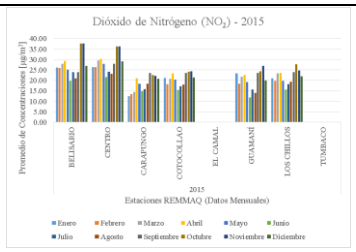



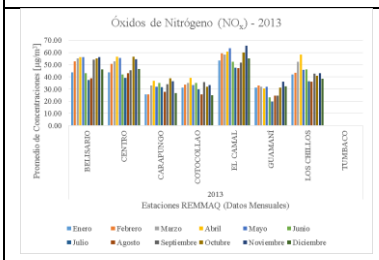



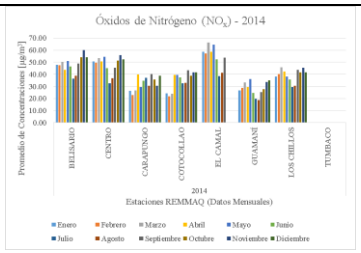



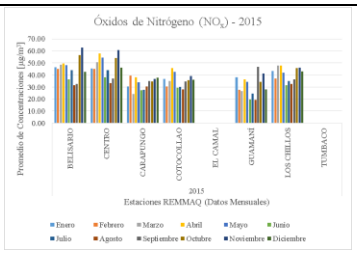



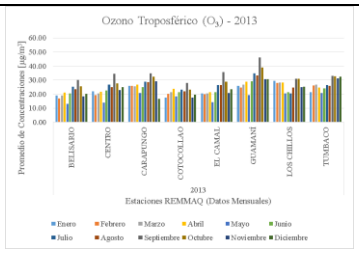



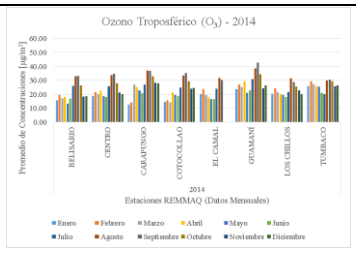



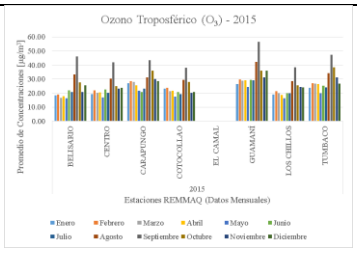



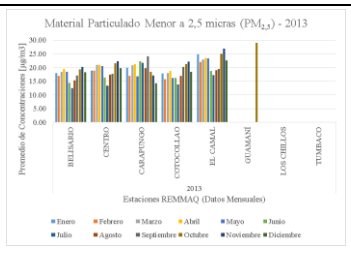



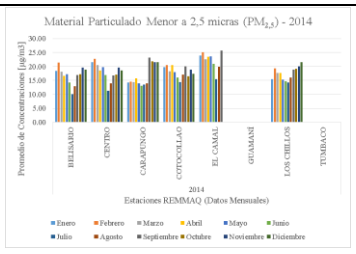



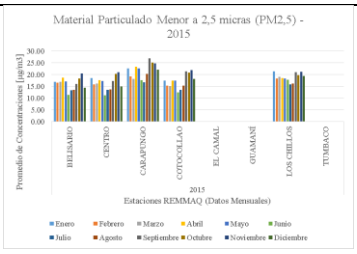



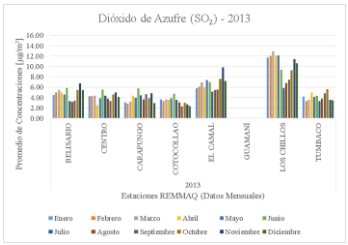



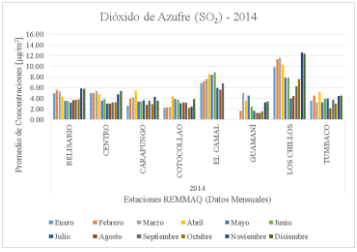



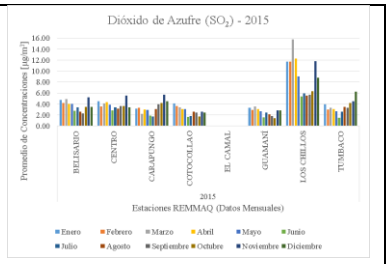



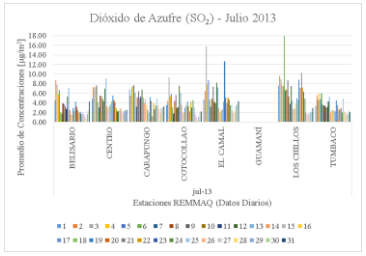

Dióxido de Azufre ($SO_2$) - 2013
Promedio de Concentraciones [µg/m³]
16.00
14.00
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO
2013
Estaciones REMMAQ (Datos Mensuales)
Enero
Febrero
Marzo
Abril
Mayo
Junio
Julio
Agosto
Septiembre
Octubre
Noviembre
Diciembre

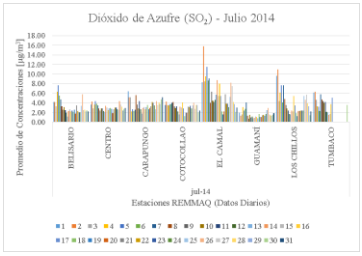

Dióxido de Azufre ($SO_2$) - 2014
Promedio de Concentraciones [µg/m³]
16.00
14.00
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO
2014
Estaciones REMMAQ (Datos Mensuales)
Enero
Febrero
Marzo
Abril
Mayo
Junio
Julio
Agosto
Septiembre
Octubre
Noviembre
Diciembre

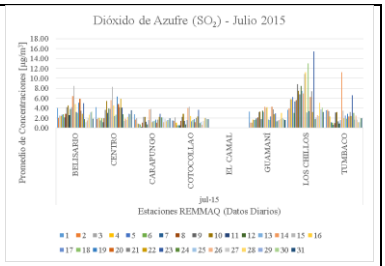

Dióxido de Azufre ($SO_2$) - 2015
Promedio de Concentraciones [µg/m³]
16.00
14.00
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO
2015
Estaciones REMMAQ (Datos Mensuales)
Enero
Febrero
Marzo
Abril
Mayo
Junio
Julio
Agosto
Septiembre
Octubre
Noviembre
Diciembre

## 7. Concentración diaria de contaminantes por estación (mes de julio)

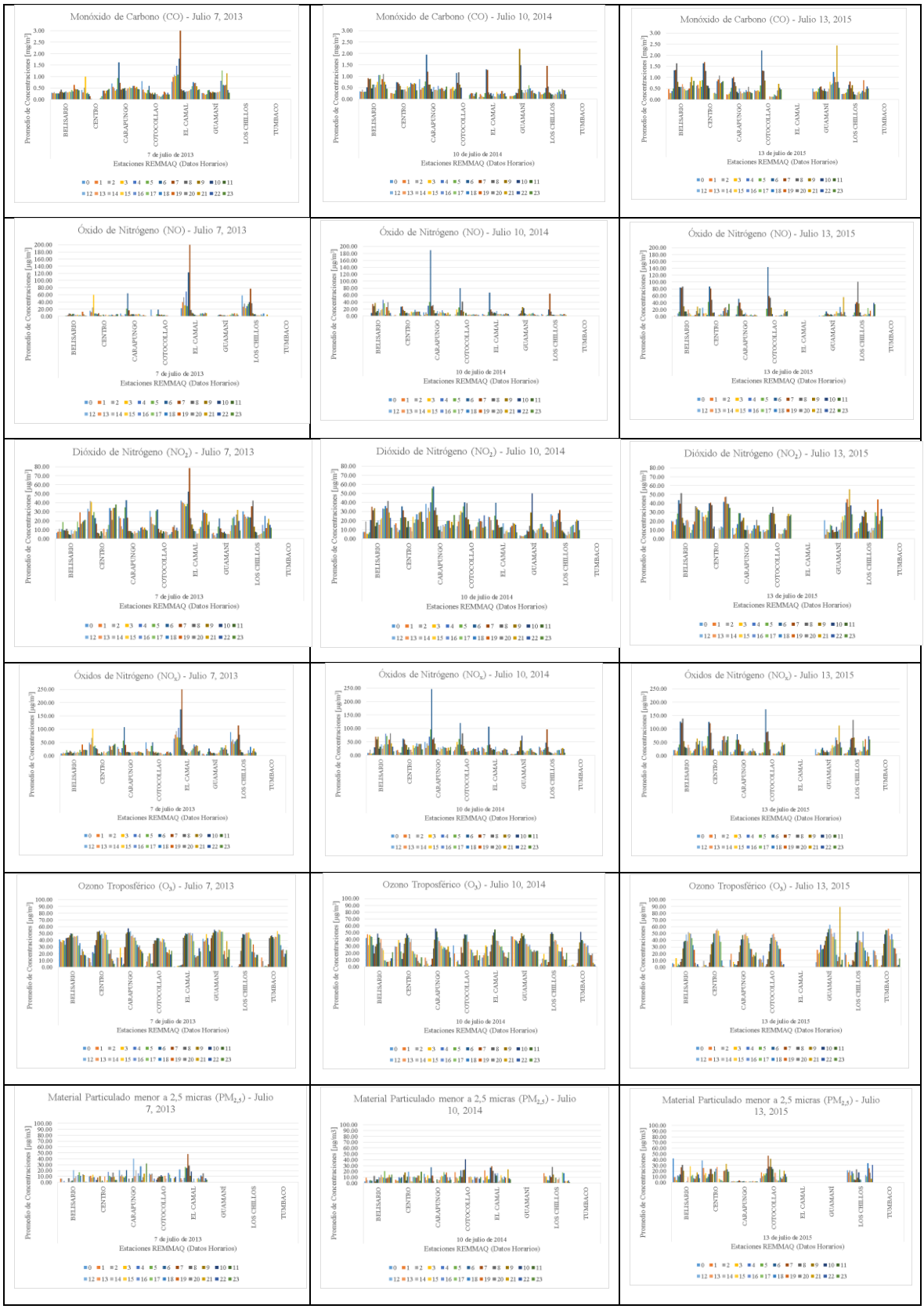


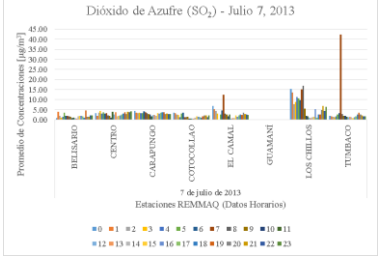

Dióxido de Azufre ($SO_2$) - Julio 2013
Promedio de Concentraciones [µg/m³]
18.00
16.00
14.00
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO
jul-13
Estaciones REMMAQ (Datos Diarios)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31

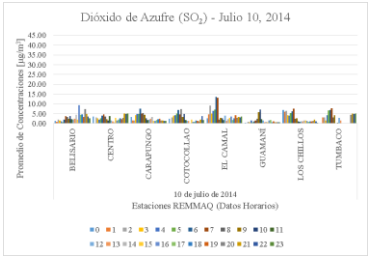

Dióxido de Azufre ($SO_2$) - Julio 2014
Promedio de Concentraciones [µg/m³]
18.00
16.00
14.00
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO
jul-14
Estaciones REMMAQ (Datos Diarios)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31

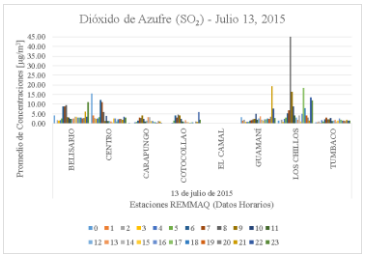

Dióxido de Azufre ($SO_2$) - Julio 2015
Promedio de Concentraciones [µg/m³]
18.00
16.00
14.00
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO
jul-15
Estaciones REMMAQ (Datos Diarios)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31

## 8. Concentración horaria de contaminantes por estación (en los días de las imágenes satelitales)

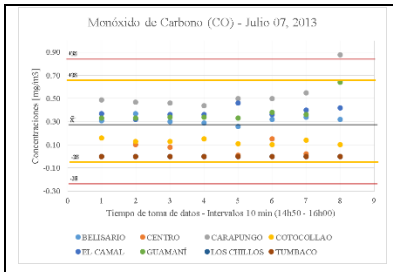


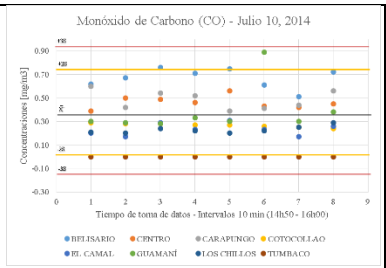

Dióxido de Azufre ($SO_2$) - Julio 7, 2013
Promedio de Concentraciones [µg/m³]
45.00
40.00
35.00
30.00
25.00
20.00
15.00
10.00
5.00
0.00
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO
7 de julio de 2013
Estaciones REMMAQ (Datos Horarios)
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23

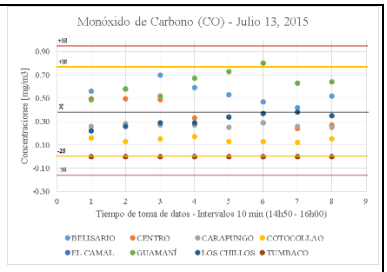

Dióxido de Azufre ($SO_2$) - Julio 10, 2014
Promedio de Concentraciones [µg/m³]
45.00
40.00
35.00
30.00
25.00
20.00
15.00
10.00
5.00
0.00
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO
10 de julio de 2014
Estaciones REMMAQ (Datos Horarios)
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23

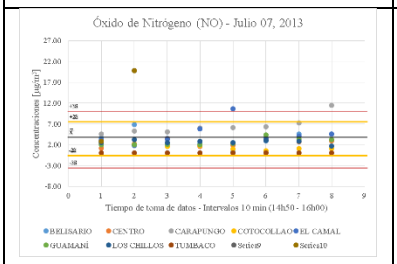

Dióxido de Azufre ($SO_2$) - Julio 13, 2015
Promedio de Concentraciones [µg/m³]
45.00
40.00
35.00
30.00
25.00
20.00
15.00
10.00
5.00
0.00
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO
13 de julio de 2015
Estaciones REMMAQ (Datos Horarios)
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23

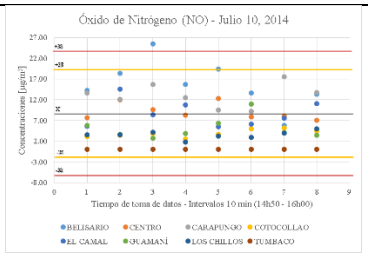
# 9. Gráficos de concentraciones de contaminantes criterio atmosféricos validados

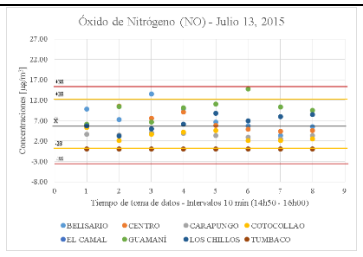


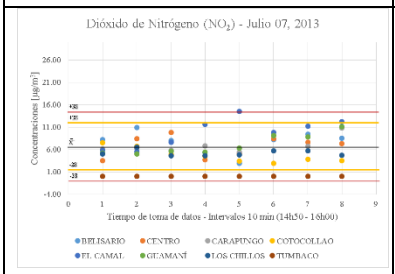



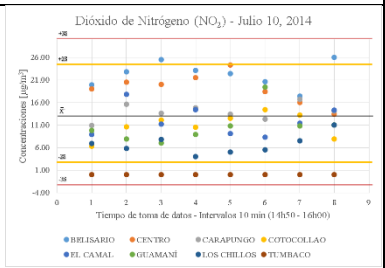



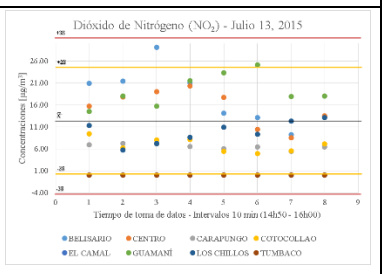



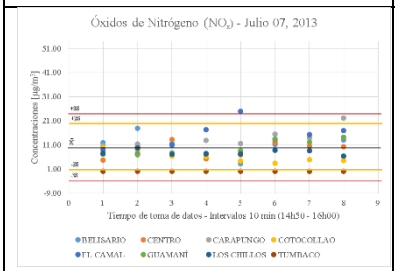



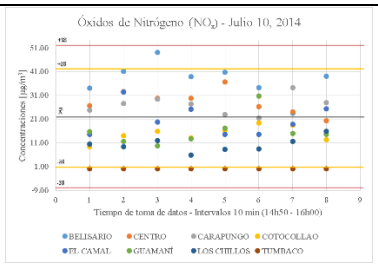



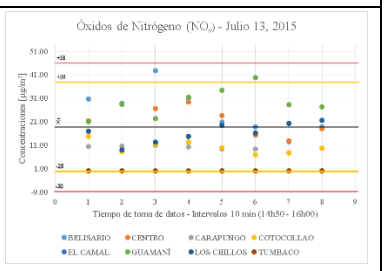



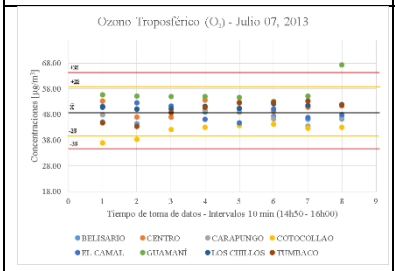



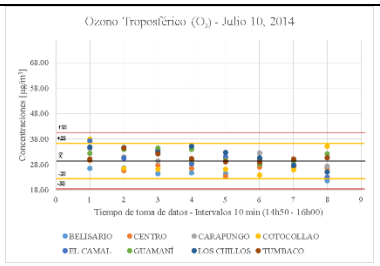



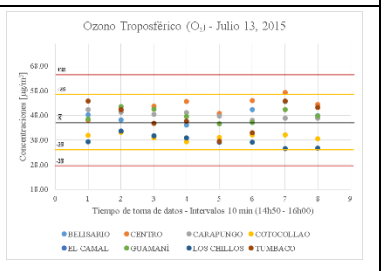



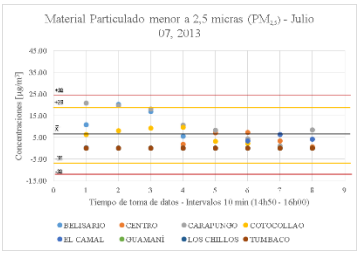



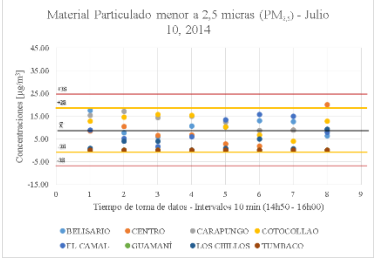



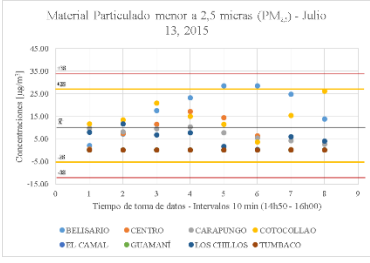



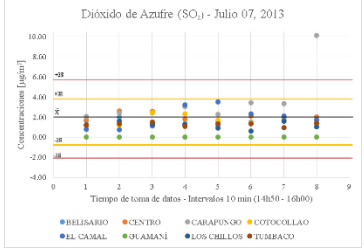



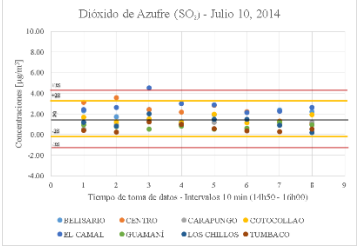



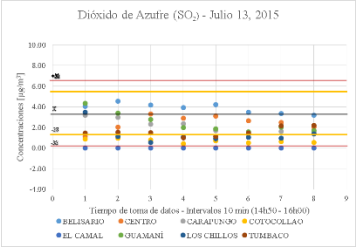




Dióxido de Azufre ($SO_2$) - Julio 07, 2013
Concentraciones [µg/m³]
Tiempo de toma de datos - Intervalos 10 min (14h50 - 16h00)
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO


Dióxido de Azufre ($SO_2$) - Julio 10, 2014
Concentraciones [µg/m³]
Tiempo de toma de datos - Intervalos 10 min (14h50 - 16h00)
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO


Dióxido de Azufre ($SO_2$) - Julio 13, 2015
Concentraciones [µg/m³]
Tiempo de toma de datos - Intervalos 10 min (14h50 - 16h00)
BELISARIO
CENTRO
CARAPUNGO
COTOCOLLAO
EL CAMAL
GUAMANÍ
LOS CHILLOS
TUMBACO

## 10. Índice de correlación bivariada de Pearson para todos los datos –SPSS

| Correlations | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Longitud de la estación | Latitud de la estación | Altura de la estación |
| Longitud de la estación | Pearson Correlation | 1 | ,343 | -,952** |
| | Sig. (2-tailed) | | ,079 | ,000 |
| | N | 27 | 27 | 27 |
| Latitud de la estación | Pearson Correlation | ,343 | 1 | -,144 |
| | Sig. (2-tailed) | ,079 | | ,472 |
| | N | 27 | 27 | 27 |
| Altura de la estación | Pearson Correlation | -,952** | -,144 | 1 |
| | Sig. (2-tailed) | ,000 | ,472 | |
| | N | 27 | 27 | 27 |
| NDVI | Pearson Correlation | ,293 | ,475* | -,114 |
| | Sig. (2-tailed) | ,138 | ,012 | ,571 |
| | N | 27 | 27 | 27 |
| SAVI | Pearson Correlation | ,353 | ,219 | -,206 |
| | Sig. (2-tailed) | ,071 | ,273 | ,303 |
| | N | 27 | 27 | 27 |
| NSI | Pearson Correlation | -,061 | -,044 | -,028 |
| | Sig. (2-tailed) | ,761 | ,828 | ,888 |
| | N | 27 | 27 | 27 |
| Temperatura de Brillo | Pearson Correlation | ,229 | ,177 | -,267 |
| | Sig. (2-tailed) | ,250 | ,378 | ,178 |
| | N | 27 | 27 | 27 |
| Temperatura Superficial | Pearson Correlation | ,231 | ,179 | -,266 |
| | Sig. (2-tailed) | ,247 | ,372 | ,181 |
| | N | 27 | 27 | 27 |
| Monóxido de Carbono (CO) | Pearson Correlation | -,180 | -,139 | ,279 |
| | Sig. (2-tailed) | ,447 | ,560 | ,233 |
| | N | 20 | 20 | 20 |
| Dióxido de Nitrógeno (NO2) | Pearson Correlation | -,295 | -,075 | ,359 |
| | Sig. (2-tailed) | ,207 | ,752 | ,120 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | N | 20 | 20 | 20 |

| Correlations | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Temperatura Superficial | Monóxido de Carbono (CO) | Dióxido de Nitrógeno (NO2) |
| Longitud de la estación | Pearson Correlation | ,231 | -,180 | -,295** |
| | Sig. (2-tailed) | ,247 | ,447 | ,207 |
| | N | 27 | 20 | 20 |
| Latitud de la estación | Pearson Correlation | ,179 | -,139 | -,075 |
| | Sig. (2-tailed) | ,372 | ,560 | ,752 |
| | N | 27 | 20 | 20 |
| Altura de la estación | Pearson Correlation | -,266** | ,279 | ,359 |
| | Sig. (2-tailed) | ,181 | ,233 | ,120 |
| | N | 27 | 20 | 20 |
| NDVI | Pearson Correlation | ,062 | -,262* | -,271 |
| | Sig. (2-tailed) | ,759 | ,265 | ,247 |
| | N | 27 | 20 | 20 |
| SAVI | Pearson Correlation | ,002 | -,123 | -,240 |
| | Sig. (2-tailed) | ,991 | ,606 | ,309 |
| | N | 27 | 20 | 20 |
| NSI | Pearson Correlation | ,345 | ,010 | ,114 |
| | Sig. (2-tailed) | ,078 | ,968 | ,631 |
| | N | 27 | 20 | 20 |
| Temperatura de Brillo | Pearson Correlation | ,818 | -,321 | -,199 |
| | Sig. (2-tailed) | ,000 | ,167 | ,401 |
| | N | 27 | 20 | 20 |
| Temperatura Superficial | Pearson Correlation | 1 | -,043 | ,125 |
| | Sig. (2-tailed) | | ,856 | ,599 |
| | N | 27 | 20 | 20 |
| Monóxido de Carbono (CO) | Pearson Correlation | -,043 | 1 | ,902 |
| | Sig. (2-tailed) | ,856 | | ,000 |
| | N | 20 | 20 | 20 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dióxido de Nitrógeno (NO2) | Pearson Correlation | ,125 | ,902 | 1 |
| | Sig. (2-tailed) | ,599 | ,000 | |
| | N | 20 | 20 | 20 |

| **Correlations** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Monóxido de Nitrógeno (NO) | Óxidos de Nitrógeno (NOx) | Ozono Troposférico (O3) |
| Longitud de la estación | Pearson Correlation | -,004 | -,178 | -,027** |
| | Sig. (2-tailed) | ,988 | ,453 | ,901 |
| | N | 20 | 20 | 23 |
| Latitud de la estación | Pearson Correlation | ,041 | -,025 | -,129 |
| | Sig. (2-tailed) | ,863 | ,918 | ,558 |
| | N | 20 | 20 | 23 |
| Altura de la estación | Pearson Correlation | ,122** | ,269 | ,038 |
| | Sig. (2-tailed) | ,610 | ,251 | ,863 |
| | N | 20 | 20 | 23 |
| NDVI | Pearson Correlation | -,144 | -,222* | -,091 |
| | Sig. (2-tailed) | ,545 | ,346 | ,680 |
| | N | 20 | 20 | 23 |
| SAVI | Pearson Correlation | -,112 | -,190 | ,009 |
| | Sig. (2-tailed) | ,640 | ,421 | ,969 |
| | N | 20 | 20 | 23 |
| NSI | Pearson Correlation | ,062 | ,081 | -,124 |
| | Sig. (2-tailed) | ,796 | ,734 | ,574 |
| | N | 20 | 20 | 23 |
| Temperatura de Brillo | Pearson Correlation | -,116 | -,168 | -,281 |
| | Sig. (2-tailed) | ,625 | ,479 | ,194 |
| | N | 20 | 20 | 23 |
| Temperatura Superficial | Pearson Correlation | ,199 | ,165 | -,629 |
| | Sig. (2-tailed) | ,401 | ,487 | ,001 |
| | N | 20 | 20 | 23 |
| Monóxido de Carbono (CO) | Pearson Correlation | ,849 | ,915 | -,285 |
| | Sig. (2-tailed) | ,000 | ,000 | ,224 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | N | 20 | 20 | 20 |
| Dióxido de Nitrógeno (NO2) | Pearson Correlation | ,860 | ,975 | -,393 |
| | Sig. (2-tailed) | ,000 | ,000 | ,086 |
| | N | 20 | 20 | 20 |

**Correlations**

| | | Material Particulado Menor a 2.5 micra (PM2.5) | Dióxido de Azufre (SO2) |
|---|---|---|---|
| Longitud de la estación | Pearson Correlation | -,053 | -,351 |
| | Sig. (2-tailed) | ,845 | ,109 |
| | N | 16 | 22 |
| Latitud de la estación | Pearson Correlation | ,417 | ,054 |
| | Sig. (2-tailed) | ,108 | ,811 |
| | N | 16 | 22 |
| Altura de la estación | Pearson Correlation | ,315** | ,406 |
| | Sig. (2-tailed) | ,235 | ,061 |
| | N | 16 | 22 |
| NDVI | Pearson Correlation | ,324 | -,475* |
| | Sig. (2-tailed) | ,221 | ,026 |
| | N | 16 | 22 |
| SAVI | Pearson Correlation | ,065 | -,394 |
| | Sig. (2-tailed) | ,811 | ,070 |
| | N | 16 | 22 |
| NSI | Pearson Correlation | ,014 | ,368 |
| | Sig. (2-tailed) | ,958 | ,092 |
| | N | 16 | 22 |
| Temperatura de Brillo | Pearson Correlation | -,162 | -,143 |
| | Sig. (2-tailed) | ,548 | ,525 |
| | N | 16 | 22 |
| Temperatura Superficial | Pearson Correlation | ,126 | -,134 |
| | Sig. (2-tailed) | ,641 | ,552 |
| | N | 16 | 22 |
| Monóxido de Carbono (CO) | Pearson Correlation | ,380 | ,391 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Sig. (2-tailed) | ,146 | ,097 |
| | N | 16 | 19 |
| Dióxido de Nitrógeno (NO2) | Pearson Correlation | ,478 | ,492 |
| | Sig. (2-tailed) | ,061 | ,032 |
| | N | 16 | 19 |

| **Correlations** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Longitud de la estación | Latitud de la estación | Altura de la estación |
| Monóxido de Nitrógeno (NO) | Pearson Correlation | -,004 | ,041 | ,122** |
| | Sig. (2-tailed) | ,988 | ,863 | ,610 |
| | N | 20 | 20 | 20 |
| Óxidos de Nitrógeno (NOx) | Pearson Correlation | -,178 | -,025 | ,269 |
| | Sig. (2-tailed) | ,453 | ,918 | ,251 |
| | N | 20 | 20 | 20 |
| Ozono Troposférico (O3) | Pearson Correlation | -,027** | -,129 | ,038 |
| | Sig. (2-tailed) | ,901 | ,558 | ,863 |
| | N | 23 | 23 | 23 |
| Material Particulado Menor a 2.5 micra (PM2.5) | Pearson Correlation | -,053 | ,417* | ,315 |
| | Sig. (2-tailed) | ,845 | ,108 | ,235 |
| | N | 16 | 16 | 16 |
| Dióxido de Azufre (SO2) | Pearson Correlation | -,351 | ,054 | ,406 |
| | Sig. (2-tailed) | ,109 | ,811 | ,061 |
| | N | 22 | 22 | 22 |

| **Correlations** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | NDVI | SAVI | NSI | Temperatura de Brillo |
| Monóxido de Nitrógeno (NO) | Pearson Correlation | -,144 | -,112 | ,062** | -,116 |
| | Sig. (2-tailed) | ,545 | ,640 | ,796 | ,625 |
| | N | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Óxidos de Nitrógeno (NOx) | Pearson Correlation | -,222 | -,190 | ,081 | -,168* |
| | Sig. (2-tailed) | ,346 | ,421 | ,734 | ,479 |
| | N | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Ozono Troposférico (O3) | Pearson Correlation | -,091** | ,009 | -,124 | -,281 |
| | Sig. (2-tailed) | ,680 | ,969 | ,574 | ,194 |
| | N | 23 | 23 | 23 | 23 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Material Particulado Menor a 2.5 micra (PM2.5) | Pearson Correlation | ,324 | ,065* | ,014 | -,162 |
| | Sig. (2-tailed) | ,221 | ,811 | ,958 | ,548 |
| | N | 16 | 16 | 16 | 16 |
| Dióxido de Azufre (SO2) | Pearson Correlation | -,475 | -,394 | ,368 | -,143** |
| | Sig. (2-tailed) | ,026 | ,070 | ,092 | ,525 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 |

**Correlations**

| | | Temperatura Superficial | Monóxido de Carbono (CO) | Dióxido de Nitrógeno (NO2) |
|---|---|---|---|---|
| Monóxido de Nitrógeno (NO) | Pearson Correlation | ,199 | ,849 | ,860** |
| | Sig. (2-tailed) | ,401 | ,000 | ,000 |
| | N | 20 | 20 | 20 |
| Óxidos de Nitrógeno (NOx) | Pearson Correlation | ,165 | ,915 | ,975 |
| | Sig. (2-tailed) | ,487 | ,000 | ,000 |
| | N | 20 | 20 | 20 |
| Ozono Troposférico (O3) | Pearson Correlation | -,629** | -,285 | -,393 |
| | Sig. (2-tailed) | ,001 | ,224 | ,086 |
| | N | 23 | 20 | 20 |
| Material Particulado Menor a 2.5 micra (PM2.5) | Pearson Correlation | ,126 | ,380* | ,478 |
| | Sig. (2-tailed) | ,641 | ,146 | ,061 |
| | N | 16 | 16 | 16 |
| Dióxido de Azufre (SO2) | Pearson Correlation | -,134 | ,391 | ,492 |
| | Sig. (2-tailed) | ,552 | ,097 | ,032 |
| | N | 22 | 19 | 19 |

**Correlations**

| | | Monóxido de Nitrógeno (NO) | Óxidos de Nitrógeno (NOx) | Ozono Troposférico (O3) |
|---|---|---|---|---|
| Monóxido de Nitrógeno (NO) | Pearson Correlation | 1 | ,951 | -,499** |
| | Sig. (2-tailed) | | ,000 | ,025 |
| | N | 20 | 20 | 20 |
| Óxidos de Nitrógeno (NOx) | Pearson Correlation | ,951 | 1 | -,458 |
| | Sig. (2-tailed) | ,000 | | ,042 |
| | N | 20 | 20 | 20 |
| Ozono Troposférico (O3) | Pearson Correlation | -,499** | -,458 | 1 |
| | Sig. (2-tailed) | ,025 | ,042 | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | N | 20 | 20 | 23 |
| Material Particulado Menor a 2.5 micra (PM2.5) | Pearson Correlation | ,342 | ,448* | -,146 |
| | Sig. (2-tailed) | ,195 | ,082 | ,589 |
| | N | 16 | 16 | 16 |
| Dióxido de Azufre (SO2) | Pearson Correlation | ,272 | ,413 | ,298 |
| | Sig. (2-tailed) | ,260 | ,079 | ,178 |
| | N | 19 | 19 | 22 |

**Correlations**

| | | Material Particulado Menor a 2.5 micra (PM2.5) | Dióxido de Azufre (SO2) |
|---|---|---|---|
| Monóxido de Nitrógeno (NO) | Pearson Correlation | ,342 | ,272 |
| | Sig. (2-tailed) | ,195 | ,260 |
| | N | 16 | 19 |
| Óxidos de Nitrógeno (NOx) | Pearson Correlation | ,448 | ,413 |
| | Sig. (2-tailed) | ,082 | ,079 |
| | N | 16 | 19 |
| Ozono Troposférico (O3) | Pearson Correlation | -,146** | ,298 |
| | Sig. (2-tailed) | ,589 | ,178 |
| | N | 16 | 22 |
| Material Particulado Menor a 2.5 micra (PM2.5) | Pearson Correlation | 1 | ,482* |
| | Sig. (2-tailed) | | ,058 |
| | N | 16 | 16 |
| Dióxido de Azufre (SO2) | Pearson Correlation | ,482 | 1 |
| | Sig. (2-tailed) | ,058 | |
| | N | 16 | 22 |

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

## 11. Script base de regresión lineal múltiple – RStudio (Ejemplo $O_3$)

```
#import dataset#
O3_dat_CSV <- read.csv("C:/Users/hp1/Desktop/Tesis/Softw_R/O3_dat_CSV.csv", sep=";")

#Rename#
datO3<-O3_dat_CSV

#testing#
class(datO3)
class(datO3[,"O3"])
class(datO3[,"NDVI"])
class(datO3[,"SAVI"])
class(datO3[,"NSI"])
class(datO3[,"TB"])
class(datO3[,"TS"])

#multiple regression analysis#
Model25<-lm(formula = O3~NDVI+NSI+TB, data = datO3)
summary(Model25)
Model26<-lm(formula = O3~SAVI+NSI+TB, data = datO3)
summary(Model26)
Model27<-lm(formula = O3~NDVI+NSI+TS, data = datO3)
summary(Model27)
Model28<-lm(formula = O3~SAVI+NSI+TS, data = datO3)
summary(Model28)
Model29<-lm(formula = O3~NDVI+NSI, data = datO3)
summary(Model29)
Model30<-lm(formula = O3~SAVI+NSI, data = datO3)
summary(Model30)
Model31<-lm(formula = O3~NSI+TB, data = datO3)
summary(Model31)
Model32<-lm(formula = O3~NSI+TS, data = datO3)
summary(Model32)
Model33<-lm(formula = O3~NDVI+TB, data = datO3)
summary(Model33)
Model34<-lm(formula = O3~SAVI+TB, data = datO3)
summary(Model34)
Model35<-lm(formula = O3~NDVI+TS, data = datO3)
summary(Model35)
Model36<-lm(formula = O3~SAVI+TS, data = datO3)
summary(Model36)

#saveScript#
source('C:/Users/hp1/Desktop/Tesis/Softw_R/O3/O3_script.R')
source('C:/Users/hp1/Desktop/Tesis/Softw_R/O3/O3_script.R')
source('C:/Users/hp1/Desktop/Tesis/Softw_R/O3/O3_analisis.R')
save.image("C:/Users/hp1/Desktop/Tesis/Softw_R/O3/O3_globenv.RData")
save.image("C:/Users/hp1/Desktop/Tesis/Softw_R/O3/O3.RData")
```

## 12. Tabla de $R^2$ y $R^2_{adj}$ para contaminantes criterio atmosférico

| *Valor $R^2$* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Ecuación base* | **Monóxido de Carbono (CO)** | **Dióxido de Nitrógeno ($NO_2$)** | **Monóxido de Nitrógeno (NO)** | **Ozono Troposférico (O3)** | **Dióxido de Azufre (SO2)** |
| *X~NDVI+NSI+TB* | 0.163 | 0.119 | 0.037 | 0.086 | 0.310 |
| *X~SAVI+NSI+TB* | 0.132 | 0.122 | 0.035 | 0.081 | 0.295 |
| *X~NDVI+NSI+TS* | 0.074 | 0.093 | 0.069 | 0.411 | 0.313 |
| *X~SAVI+NSI+TS* | 0.019 | 0.074 | 0.051 | 0.413 | 0.304 |
| *X~NDVI+NSI* | 0.074 | 0.075 | 0.021 | 0.036 | 0.276 |
| *X~SAVI+NSI* | 0.016 | 0.067 | 0.015 | 0.016 | 0.249 |
| *X~NSI+TB* | 0.126 | 0.082 | 0.027 | 0.080 | 0.211 |
| *X~NSI+TS* | 0.003 | 0.020 | 0.040 | 0.411 | 0.215 |
| *X~NDVI+TB* | 0.159 | 0.103 | 0.031 | 0.082 | 0.232 |
| *X~SAVI+TB* | 0.115 | 0.089 | 0.024 | 0.080 | 0.164 |
| *X~NDVI+TS* | 0.071 | 0.093 | 0.063 | 0.398 | 0.232 |
| *X~SAVI+TS* | 0.018 | 0.071 | 0.050 | 0.396 | 0.166 |

| *Valor $R^2_{adj}$* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Ecuación base* | **Monóxido de Carbono (CO)** | **Dióxido de Nitrógeno ($NO_2$)** | **Monóxido de Nitrógeno (NO)** | **Ozono Troposférico (O3)** | **Dióxido de Azufre (SO2)** |
| *X~NDVI+NSI+TB* | 0.006 | -0.046 | -0.144 | -0.058 | 0.195 |
| *X~SAVI+NSI+TB* | -0.030 | -0.043 | -0.146 | -0.064 | 0.178 |
| *X~NDVI+NSI+TS* | -0.099 | -0.077 | -0.105 | 0.318 | 0.198 |
| *X~SAVI+NSI+TS* | -0.165 | -0.100 | -0.126 | 0.320 | 0.188 |
| *X~NDVI+NSI* | -0.035 | -0.034 | -0.094 | -0.061 | 0.200 |
| *X~SAVI+NSI* | -0.100 | 0.043 | -0.101 | -0.083 | 0.170 |
| *X~NSI+TB* | 0.023 | -0.026 | -0.088 | -0.012 | 0.128 |
| *X~NSI+TS* | -0.114 | -0.095 | -0.073 | 0.352 | 0.132 |
| *X~NDVI+TB* | 0.060 | -0.003 | -0.083 | -0.009 | 0.151 |
| *X~SAVI+TB* | 0.011 | -0.018 | -0.091 | -0.012 | 0.076 |
| *X~NDVI+TS* | -0.038 | -0.014 | -0.047 | 0.338 | 0.151 |
| *X~SAVI+TS* | 0.022 | -0.038 | -0.061 | 0.336 | 0.078 |

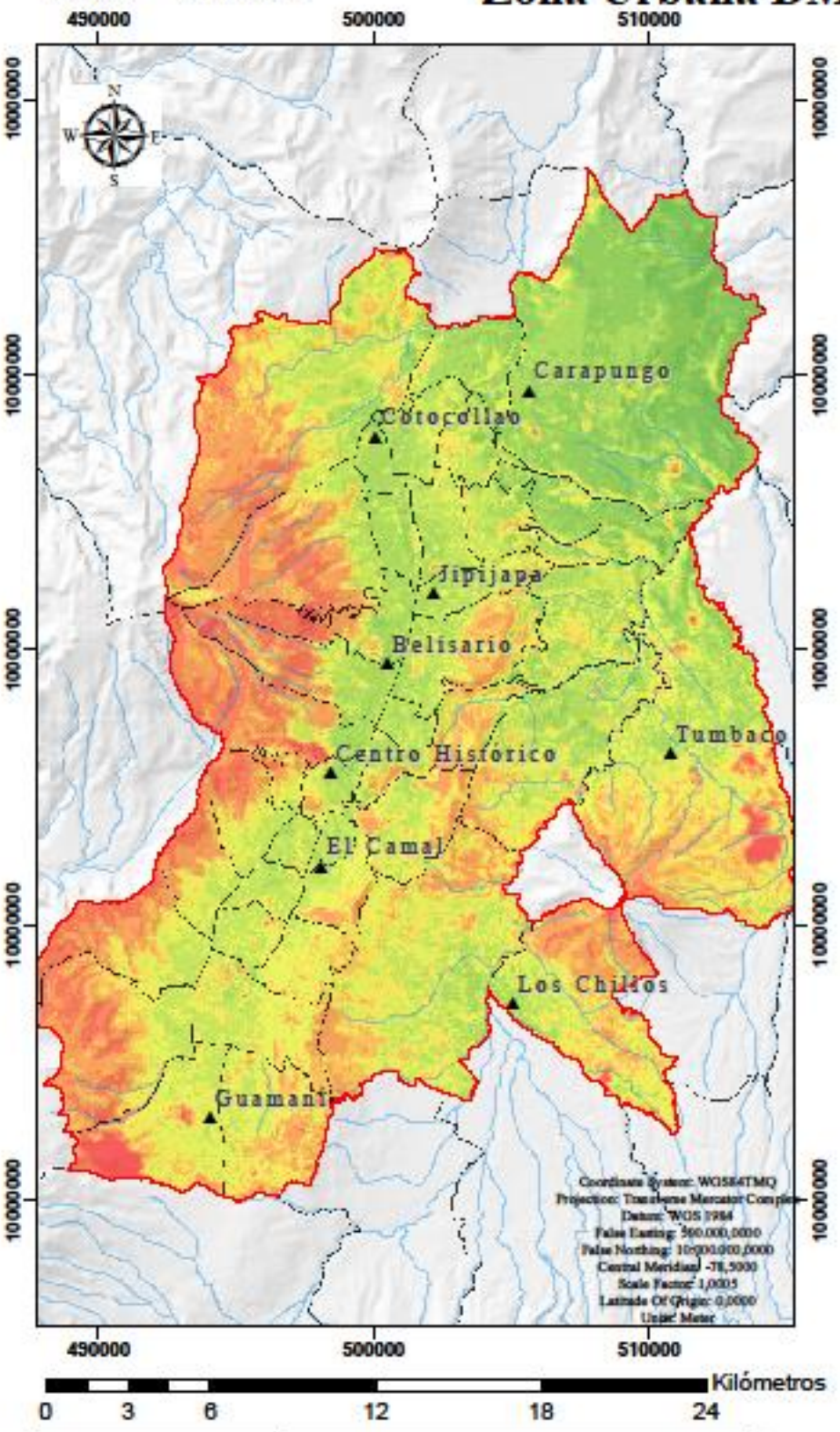
## 13. Script base de cálculo de RMSE – RStudio (Ejemplo $SO_2$)

```
Model13<-lm(formula = SO2~NDVI+NSI+TB, data = datSO2)
summary(Model13)
PreMod13 <- predict(Model13)
DifMod13 <- datSO2$SO2 - PreMod13
sqrt(mean(DifMod13^2))
Model15<-lm(formula = SO2~NDVI+NSI+TS, data = datSO2)
summary(Model15)
PreMod15 <- predict(Model15)
DifMod15 <- datSO2$SO2 - PreMod15
sqrt(mean(DifMod15^2))
Model17<-lm(formula = SO2~NDVI+NSI, data = datSO2)
summary(Model17)
PreMod17 <- predict(Model17)
DifMod17 <- datSO2$SO2 - PreMod17
sqrt(mean(DifMod17^2))
```

**14. Mapas de interpolación IDW para ozono troposférico y dióxido de azufre (07, 10 y 13 de julio de 2013, 2014 y 2015 respectivamente)**

# Concentración Estimada de Ozono Troposférico al 07/07/2013
## Zona Urbana DMQ

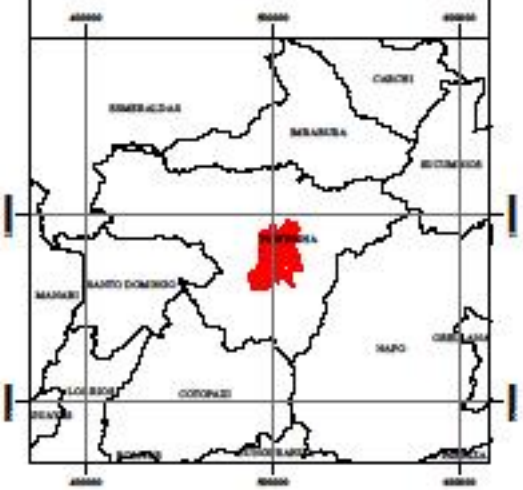
1:250.000 ECUADOR




## Simbología

- Estaciones REMMAQ
- Límite de Zona de Estudio
- División Parroquial
- Ríos

**Ubicación del DMQ en la provincia de Pichincha**



## Leyenda

**Concentración de O3 - 07/07/13 [µg/m3]**

| |
|---|
| 26,9 - 35,1 |
| 35,2 - 38,4 |
| 38,5 - 41 |
| 41,1 - 43,5 |
| 43,6 - 46,3 |
| 46,4 - 49,2 |
| 49,3 - 52,2 |
| 52,3 - 55,3 |
| 55,4 - 59,6 |
| 59,7 - 76,9 |

PUCE

**Pontificia Universidad Católica del Ecuador**
**Facultad de Ciencias Humanas**
**Escuela de Ciencias Geográficas**
**Ing. Geográfica y Medio Ambiente**

Análisis espacio-temporal de los Contaminantes Criterio Atmosféricos en la Zona Urbana del Distrito Metropolitano de Quito, mediante el uso de tecnologías geoespaciales para los años 2013, 2014 y 2015.

**Mapa:** Concentración Estimada de Ozono Troposférico al 07/07/2013 - Zona Urbana DMQ.

**Realizado por:** Tobar Luis Daniel.

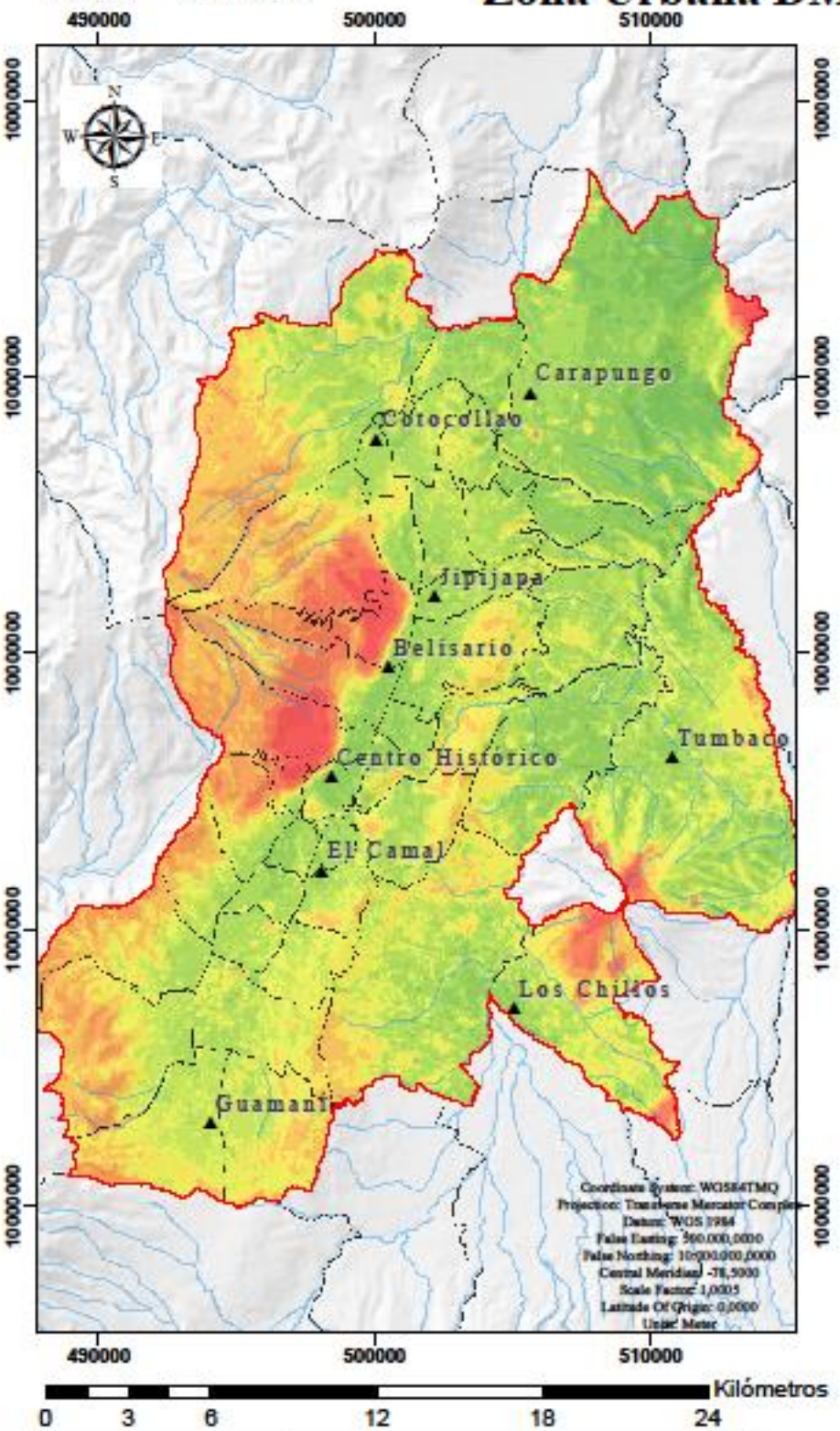
| | | |
|---|---|---|
| **Fecha:** 16/Nov./2018 | **Proyección:** UTM - Zona 17S | **Datum:** WGS 1984 |
| **Escala de fuente:** 1:50.000/1:100.000 | **Escala de Gráfica:** 1:250.000 | |

**Revisado por:** Ing. Armando Echeverría, Mg.

**Fuentes:** IGM, 2013, Municipio DMQ, 2017 & USGS, 2017.

# Concentración Estimada de Ozono Troposférico al 10/07/2014
## Zona Urbana DMQ

1:250.000 ECUADOR




### Simbología

- Estaciones REMMAQ ▲
- Límite de Zona de Estudio
- División Parroquial
- Ríos

**Ubicación del DMQ en la provincia de Pichincha**



### Leyenda

**Concentración de O3 - 10/07/14 [µg/m3]**

| | |
|---|---|
| 20,5 - 31,3 | |
| 31,4 - 35,9 | |
| 36 - 39,5 | |
| 39,6 - 43,1 | |
| 43,2 - 47,2 | |
| 47,3 - 51,7 | |
| 51,8 - 56,2 | |
| 56,3 - 61,9 | |
| 62 - 69,4 | |
| 69,5 - 78,2 | |


**Pontificia Universidad Católica del Ecuador**
**Facultad de Ciencias Humanas**
**Escuela de Ciencias Geográficas**
**Ing. Geográfica y Medio Ambiente**


Análisis espacio-temporal de los Contaminantes Criterio Atmosféricos en la Zona Urbana del Distrito Metropolitano de Quito, mediante el uso de tecnologías geoespaciales para los años 2013, 2014 y 2015.

**Mapa:** Concentración Estimada de Ozono Troposférico al 10/07/2014 - Zona Urbana DMQ.

**Realizado por:** Tobar Luis Daniel.

**Fecha:** 16/Nov./2018 | **Proyección:** UTM - Zona 17S | **Datum:** WGS 1984

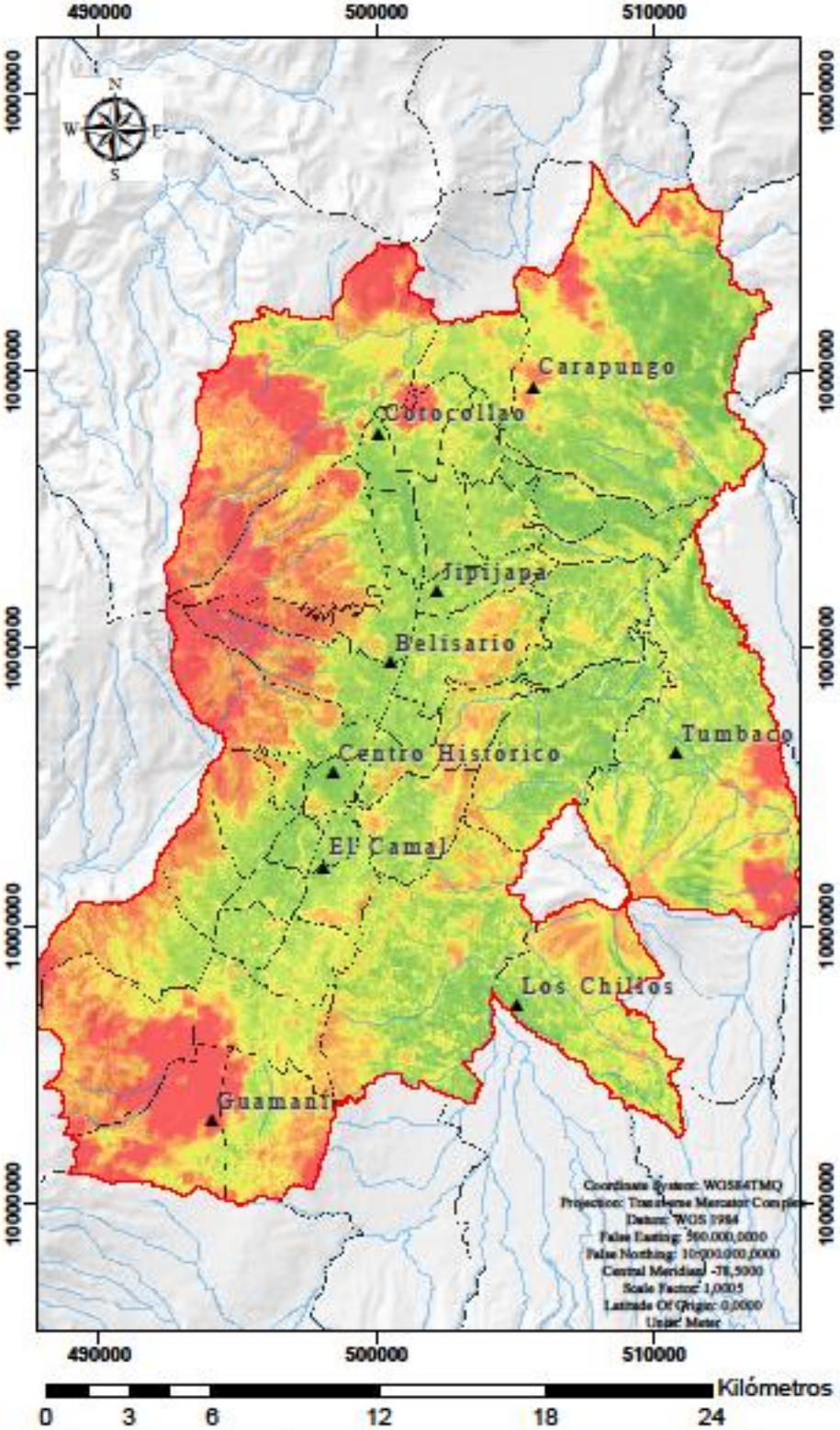
**Escala de fuente:** 1:50.000/1:100.000 | **Escala de Gráfica:** 1:250.000

**Revisado por:** Ing. Armando Echeverría, Mg.

**Fuentes:** IGM, 2013, Municipio DMQ, 2017 & USGS, 2017.

# Concentración Estimada de Ozono Troposférico al 13/07/2015
## Zona Urbana DMQ

1:250.000 ECUADOR




## Simbología

- Estaciones REMMAQ
- Límite de Zona de Estudio
- División Parroquial
- Ríos

**Ubicación del DMQ en la provincia de Pichincha**



## Leyenda

**Concentración de O3 - 13/07/15 [µg/m3]**

| |
|---|
| 31,8 - 39,3 |
| 39,4 - 41,4 |
| 41,5 - 43,3 |
| 43,4 - 45,5 |
| 45,6 - 48,1 |
| 48,2 - 50,8 |
| 50,9 - 53,6 |
| 53,7 - 56,6 |
| 56,7 - 59,8 |
| 59,9 - 64,7 |

PUCE

**Pontificia Universidad Católica del Ecuador**
**Facultad de Ciencias Humanas**
**Escuela de Ciencias Geográficas**
**Ing. Geográfica y Medio Ambiente**

Análisis espacio-temporal de los Contaminantes Criterio Atmosféricos en la Zona Urbana del Distrito Metropolitano de Quito, mediante el uso de tecnologías geoespaciales para los años 2013, 2014 y 2015.

**Mapa:** Concentración Estimada de Ozono Troposférico al 13/07/2015 - Zona Urbana DMQ.

**Realizado por:** Tobar Luis Daniel.

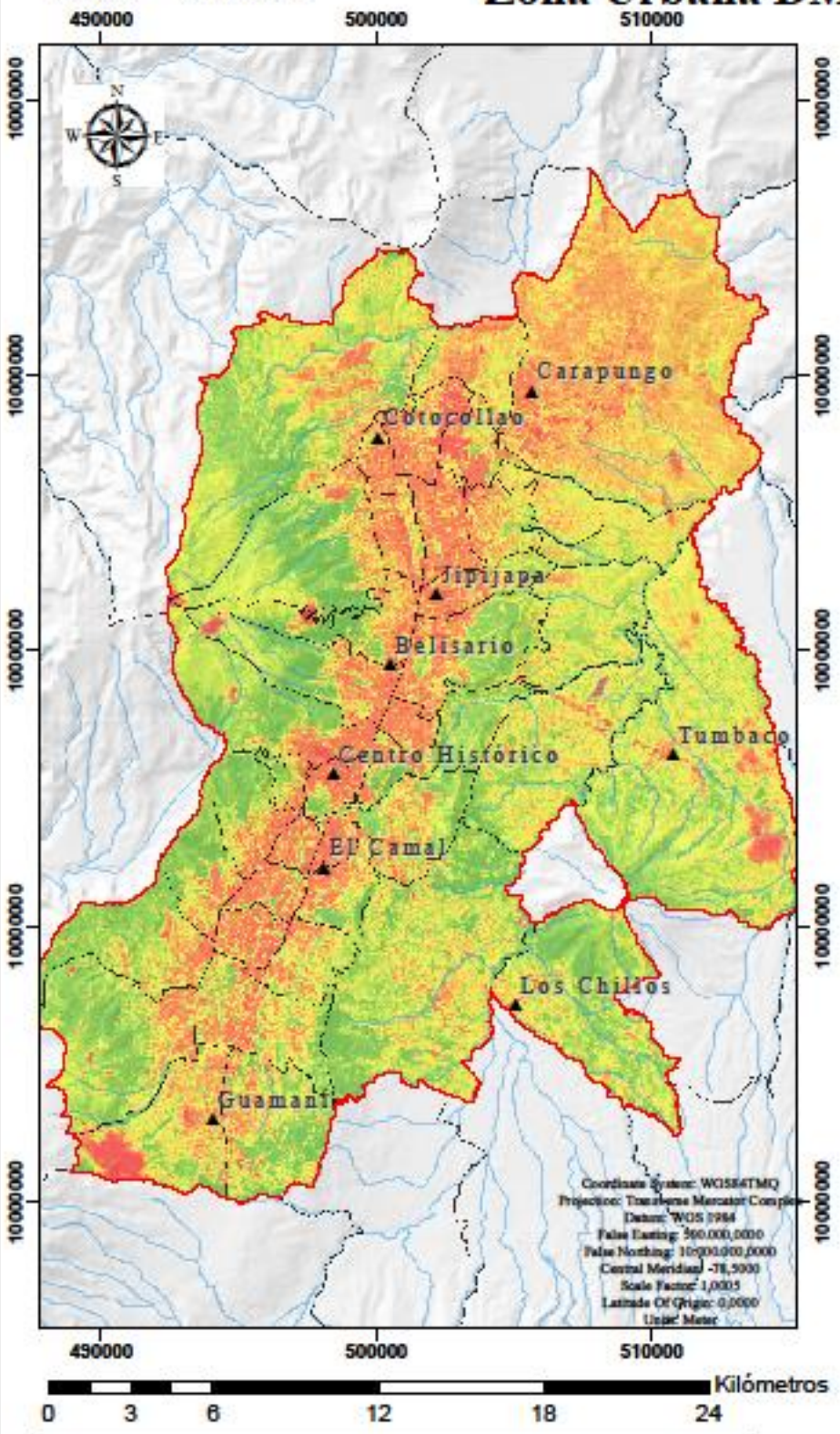
| | | |
|---|---|---|
| **Fecha:** 16/Nov./2018 | **Proyección:** UTM - Zona 17S | **Datum:** WGS 1984 |
| **Escala de fuente:** 1:50.000/1:100.000 | **Escala de Gráfica:** 1:250.000 | |

**Revisado por:** Ing. Armando Echeverría, Mg.

**Fuentes:** IGM, 2013, Municipio DMQ, 2017 & USGS, 2017.

# Concentración Estimada de Dióxido de Azufre al 07/07/2013
# Zona Urbana DMQ

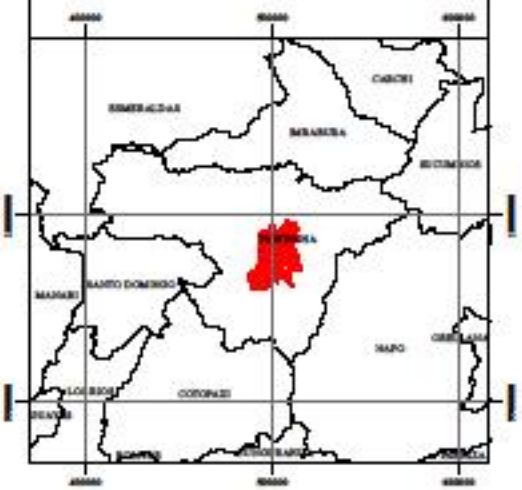
1:250.000 ECUADOR




## Simbología

- Estaciones REMMAQ
- Límite de Zona de Estudio
- División Parroquial
- Ríos

**Ubicación del DMQ en la provincia de Pichincha**



## Leyenda

**Concentración de SO2 - 07/07/13 [µg/m3]**

| | |
|---|---|
| -1,8 - -0,77 | |
| -0,769 - -0,383 | |
| -0,382 - 0,00419 | |
| 0,0042 - 0,391 | |
| 0,392 - 0,778 | |
| 0,779 - 1,2 | |
| 1,21 - 1,55 | |
| 1,56 - 1,87 | |
| 1,88 - 2,29 | |
| 2,3 - 6,42 | |

| | |
|---|---|
| PUCE | **Pontificia Universidad Católica del Ecuador**<br>**Facultad de Ciencias Humanas**<br>**Escuela de Ciencias Geográficas**<br>**Ing. Geográfica y Medio Ambiente** |

Análisis espacio-temporal de los Contaminantes Criterio Atmosféricos en la Zona Urbana del Distrito Metropolitano de Quito, mediante el uso de tecnologías geoespaciales para los años 2013, 2014 y 2015.

**Mapa:** Concentración Estimada de Dióxido de Azufre al 07/07/2013 - Zona Urbana DMQ.

**Realizado por:** Tobar Luis Daniel.

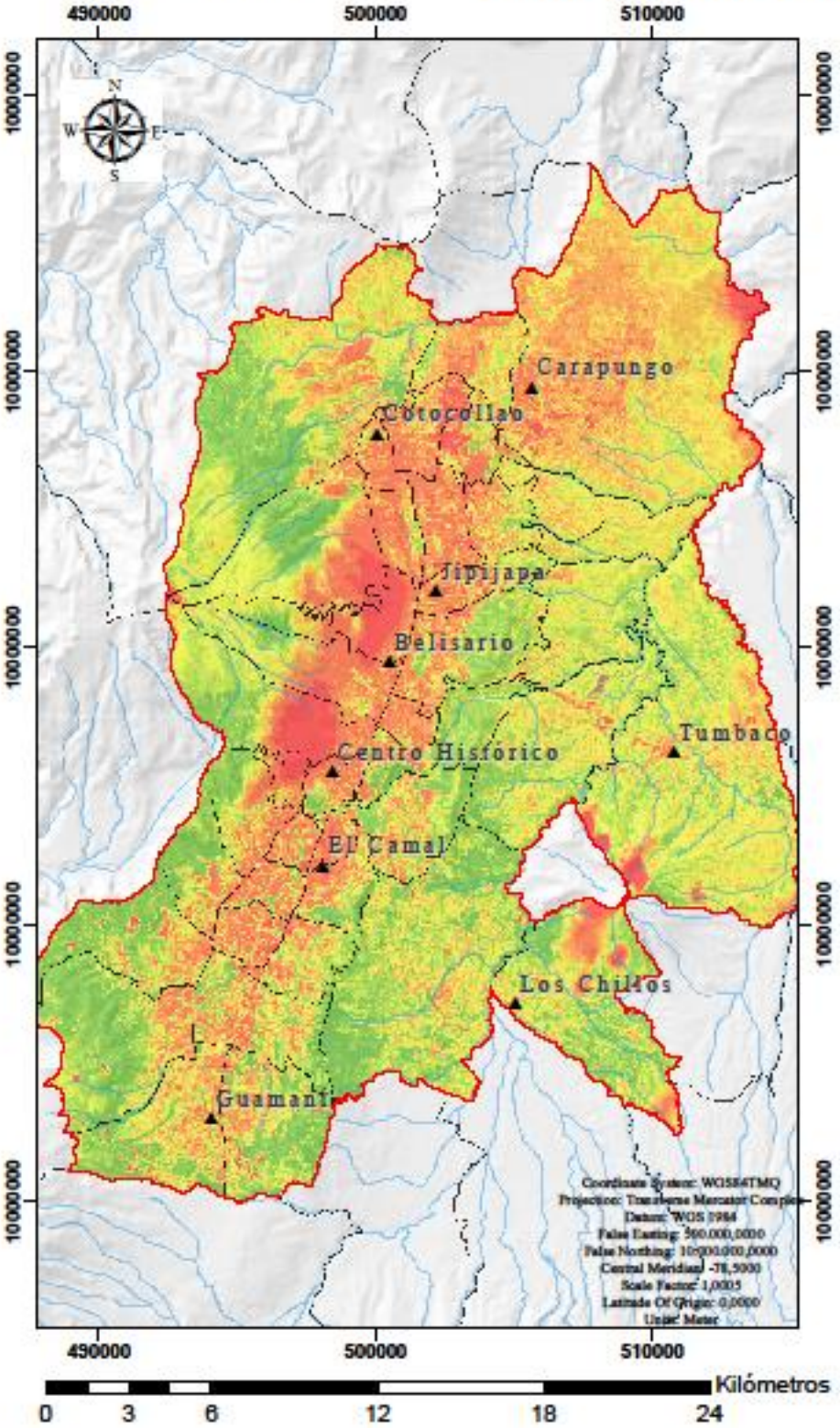
| | | |
|---|---|---|
| **Fecha:** 16/Nov./2018 | **Proyección:** UTM - Zona 17S | **Datum:** WGS 1984 |
| **Escala de fuente:** 1:50.000/1:100.000 | **Escala de Gráfica:** 1:250.000 | |

**Revisado por:** Ing. Armando Echeverría, Mg.

**Fuentes:** IGM, 2013, Municipio DMQ, 2017 & USGS, 2017.

# Concentración Estimada deDióxido de Azufre al 10/07/2014
# Zona Urbana DMQ

1:250.000 ECUADOR




## Simbología

- Estaciones REMMAQ
- Límite de Zona de Estudio
- División Parroquial
- Ríos

**Ubicación del DMQ en la provincia de Pichincha**



## Leyenda

**Concentración de SO2 - 10/07/14**

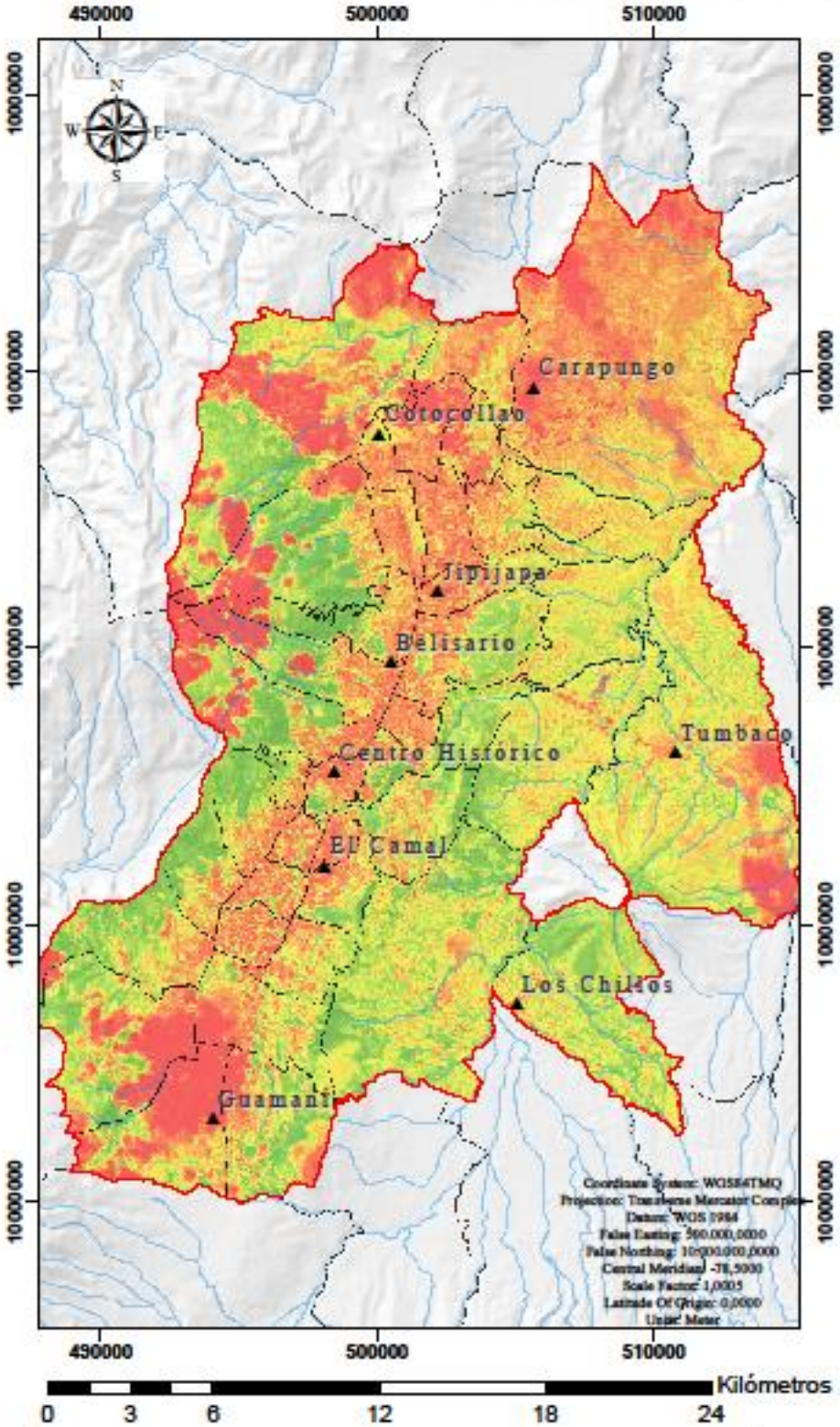
**[µg/m3]**

| | |
|---|---|
| -1,8 - -0,752 | |
| -0,751 - -0,36 | |
| -0,359 - 0,0313 | |
| 0,0314 - 0,401 | |
| 0,402 - 0,749 | |
| 0,75 - 1,12 | |
| 1,13 - 1,49 | |
| 1,5 - 1,84 | |
| 1,85 - 2,27 | |
| 2,28 - 3,75 | |

| | |
|---|---|
| PUCE | **Pontificia Universidad Católica del Ecuador**<br>**Facultad de Ciencias Humanas**<br>**Escuela de Ciencias Geográficas**<br>**Ing. Geográfica y Medio Ambiente** |
| Análisis espacio-temporal de los Contaminantes Criterio Atmosféricos en la Zona Urbana del Distrito Metropolitano de Quito, mediante el uso de tecnologías geoespaciales para los años 2013, 2014 y 2015. | |
| **Mapa:** Concentración Estimada deDióxido de Azufre al 10/07/2014 - Zona Urbana DMQ. | |
| **Realizado por:** Tobar Luis Daniel. | |
| **Fecha:** 16/Nov./2018 | **Proyección:** UTM - Zona 17S **Datum:** WGS 1984 |
| **Escala de fuente:** 1:50.000/1:100.000 | **Escala de Gráfica:** 1:250.000 |
| **Revisado por:** Ing. Armando Echeverría, Mg. | |
| **Fuentes:** IGM, 2013, Municipio DMQ, 2017 & USGS, 2017. | |

# Concentración Estimada de Dióxido de Azufre al 13/07/2015
## Zona Urbana DMQ

1:250.000 ECUADOR




### Simbología

- Estaciones REMMAQ
- Límite de Zona de Estudio
- División Parroquial
- Ríos

**Ubicación del DMQ en la provincia de Pichincha**



### Leyenda

**Concentración de SO2 - 13/07/15 [µg/m3]**

| | |
|---|---|
| -1,75 - -0,784 | |
| -0,783 - -0,353 | |
| -0,352 - 0,0779 | |
| 0,078 - 0,509 | |
| 0,51 - 0,889 | |
| 0,89 - 1,24 | |
| 1,25 - 1,6 | |
| 1,61 - 1,93 | |
| 1,94 - 2,23 | |
| 2,24 - 4,72 | |

PUCE

**Pontificia Universidad Católica del Ecuador**
**Facultad de Ciencias Humanas**
**Escuela de Ciencias Geográficas**
**Ing. Geográfica y Medio Ambiente**

Análisis espacio-temporal de los Contaminantes Criterio Atmosféricos en la Zona Urbana del Distrito Metropolitano de Quito, mediante el uso de tecnologías geoespaciales para los años 2013, 2014 y 2015.

**Mapa:** Concentración Estimada de Dióxido de Azufre al 13/07/2015 - Zona Urbana DMQ.

**Realizado por:** Tobar Luis Daniel.

| | | |
|---|---|---|
| **Fecha:** 16/Nov./2018 | **Proyección:** UTM - Zona 17S | **Datum:** WGS 1984 |
| **Escala de fuente:** 1:50.000/1:100.000 | **Escala de Gráfica:** 1:250.000 | |

**Revisado por:** Ing. Armando Echeverría, Mg.

**Fuentes:** IGM, 2013, Municipio DMQ, 2017 & USGS, 2017.