



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES PARA
LA GENERACIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL (ICA),
ENFOCADO AL SECTOR URBANO DEL DISTRITO
METROPOLITANO DE QUITO**

AUTORA: AYALA GÓMEZ, LIZETH ALEXANDRA

DIRECTOR: ROBAYO NIETO, ALEXANDER ALFREDO

SANGOLQUÍ

2019

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN****CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE****CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, ***“APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES PARA LA GENERACIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL (ICA), ENFOCADO AL SECTOR URBANO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”*** realizado por la señorita Ayala Gómez Lizeth Alexandra, el mismo que sido ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar a la señorita para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 04 de diciembre del 2018

Ing. Alexander Alfredo Robayo Nieto

DIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN****CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Lizeth Alexandra Ayala Gómez, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación "***APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES PARA LA GENERACIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL (ICA), ENFOCADO AL SECTOR URBANO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO***" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 18 de enero del 2019

Lizeth Alexandra Ayala Gómez

CI: 1722722483



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Yo, Lizeth Alexandra Ayala Gómez, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación “*APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES PARA LA GENERACIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL (ICA), ENFOCADO AL SECTOR URBANO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO*” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 18 de enero del 2019

Lizeth Alexandra Ayala Gómez

CI: 1722722483

DEDICATORIA

Alguien dijo alguna vez que no somos más que el resultado de nuestros antepasados, de su historia y de las raíces que nos heredaron. Entonces la historia que escribimos en nuestra vida resulta ser la huella que dejamos en el mundo y es la manera que tenemos de cambiarlo; tan sencillo como lo haría una niña al tomar el camino de la educación en un tiempo y entorno en el cual hacerlo es nada más que perder el tiempo y con el mínimo de apoyo mantener el coraje suficiente para forjarse un futuro diferente al que pudo soñar el resto de su familia.

Como una madre que al verse sola con sus dos pequeños se enfrenta a la vida con valentía y logra ser ejemplo de lucha y perseverancia para ellos o como aquella mujer en un mundo de hombres que se levanta tras cada tropiezo, que aguanta las lecciones y pruebas que se le ponen en frente y consigue ser dueña de sí misma y de sus decisiones, que no le tiene miedo al trabajo duro y cuya ética y principios se levantan por encima de toda la podredumbre que se encuentra en el camino. Esas tres mujeres son mi historia y son mi familia: la niña, la madre y la mujer, las tres a la vez reunidas en una sola son mi madre, gracias a quién he logrado llegar hasta aquí pues este logro es el resultado de su historia, de su trabajo y de su amor.

Es por esto que este trabajo está dedicado a ella, gracias por todas las madrugadas que te acostaste conmigo para que durmiera al menos una horita, por no dejarme salir a clases con el estómago vacío, por estar conmigo a lo largo de todo este camino y apoyarme incluso cuando tal vez no fui la mejor hija. Aquí estamos como te lo prometí mamita, este logro es para ti por ser mi única constante en este mundo de infinitas variables.

Para mi Sarita

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas y a la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, así como a todos los maestros que me transmitieron su conocimiento, sabiduría e inclusive me brindaron su amistad. A mi tutor el Ing. Alexander Robayo que me ayudó en la culminación de este proyecto y fue uno de los maestros que más impacto tuvo en mi formación; por todas sus enseñanzas, apoyo y ejemplo mi más sincero agradecimiento y mi más profunda admiración.

Una de las cosas de las cuales estoy más consiente es de la fortuna que representa el encontrarse con buenas personas en el camino, personas maravillosas que no solamente te honran con el regalo de su amistad, sino que también te ayudan a crecer y te dan aliento cuando más lo necesitas; a mis mejores amigas, a mis mayores confidentes y a mis compañeras voluntarias de tesis gracias por ser estas personas para mí porque no hubo momento en el cuál sus manos no estuvieran estiradas para ayudarme a continuar: Alicia, Angie y Danniba.

De entre las mayores alegrías que tuve en estos años estuvo la de compartir dentro de la cancha de fútbol con mis chicas y el descubrir que juntas como equipo somos indestructibles, gracias Vane, Raque, Dannio, Gaby y Joha por haber disfrutado conmigo de esta pasión, por haber dejado todo dentro de la cancha y por la alegría que vino con cada atajada y con cada gol.

Finalmente, qué sería de la vida universitaria sin los compinches, aquellos amigos con quienes compartí los mejores momentos y gracias a los cuales podré decir que estos fueron los mejores años de mi vida: Pedro, Lucho, Omar, Gordo, Jere, Kerby, Moyis, Dev, Bolón y a mi Alvarito, gracias por todas esas tardes de fugados.

Gracias especialmente a Henry por ser mi guía y mi apoyo en los momentos más difíciles y a mi negrita (Shushu) por siempre decirme los deberes.

A mi René por permanecer a mi lado con todo su amor, porque en todo lugar al que iba estuviste tú cuidando de mí y apoyándome para que llegar a este día fuera posible, gracias mi amor por terminar esta aventura de mi mano.

Alex

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
CAPÍTULO I.....	1
ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Estudios relacionados	2
1.3 Planteamiento del problema	3
1.4 Justificación e importancia.....	4
1.5 Descripción del área de estudio.....	5
1.6 Objetivos	6
1.6.1 Objetivo General.....	6
1.6.2 Objetivos Específicos	6
1.7 Metas del proyecto	6
CAPITULO II	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 Calidad Ambiental.....	7
2.1.1 Medición de la calidad ambiental urbana	7
2.1.2 Contaminación del aire por dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	8
2.1.3 Contaminación del aire por ozono (O ₃)	8
2.1.4 Radiación solar	9
2.1.5 Superficie verde urbana por habitante	9
2.1.6 Índice de calidad ambiental	9
2.2 Análisis Geoespacial	10
2.2.1 Teledetección.....	11
2.2.2 Espectro electromagnético.....	12
2.2.3 Tipos de sensor	13

2.2.4 Resolución de un sensor	14
2.2.5 Satélites de observación.....	17
2.2.6 Misiones Sentinel	17
2.2.7 Sentinel 2	17
2.2.8 Imagen satelital.....	18
2.2.9 Correcciones de una imagen satelital	19
2.3 Índices radiométricos.....	20
2.3.1 Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI)	20
2.3.2 Índice de suelos normalizados (NSI).....	21
2.3.3 Índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI).....	21
2.3.4 Índice de humedad en las hojas (LWCI)	21
2.4 Fundamentación Conceptual	22
2.5 Sistema de variables	23
2.5.1 Variables independientes	23
2.5.2 Variables dependientes	23
CAPITULO III	24
METODOLOGÍA	24
3.1 Modalidad de investigación	24
3.2 Software empleado.....	25
3.3 Recopilación y validación de la información.....	25
3.3.1 Datos de referencia de las estaciones de monitoreo de la REMMAQ.....	25
3.3.2 Imágenes satelitales	29
3.4 Cálculo de los índices meteorológicos	31
3.5 Cálculo de los índices radiométricos.....	32
3.5.1 índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI).....	32
3.5.2 Índice de suelos normalizados (NSI).....	33
3.5.3 Índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI).....	33
3.5.2 Índice de humedad en las hojas (LWCI)	34
3.6 Análisis por componentes principales.....	35
3.7 Prueba de hipótesis ANOVA	36
CAPITULO IV	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1 Caracterización de las variables	38
4.2 Información meteorológica	38

4.3 Cálculo de los índices de calidad atmosférica.....	43
4.4 Cálculo de los índices radiométricos.....	46
4.5 Análisis de correlación.....	50
4.6 Estadísticos de adecuación muestral.....	53
4.7 Análisis por componentes principales.....	54
CAPITULO V.....	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
5.1 Conclusiones.....	61
5.2 Recomendaciones.....	62
Referencias bibliográficas.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Límites numéricos de cada categoría del ICA ($\mu\text{g}/\text{m}^2$).....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2. Bandas que conforman el espectro electromagnético.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 3. Bandas de los sensores Sentinel 2A y 2B.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 4. Promedios mensuales del año 2016.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 5. Promedios mensuales del año 2017.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 6. Ubicación de las estaciones de monitoreo utilizadas.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 7. Matriz de correlación por épocas de estudio de índices meteorológicos.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8. Matriz de correlación por épocas de estudio de índices radiométricos.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 9. Matriz de correlación por índices para cada época de estudio.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 10. Resultados del test KMO y prueba de esfericidad de Bartlett.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 11. Varianza total explicada para las épocas de estudio.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 12. Matriz de componentes mayores a 1.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 13. Matriz de correlación de los ICA.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 14. Matriz de resultado de prueba ANOVA.....</i>	<i>58</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Localización geográfica del área de estudio</i>	5
<i>Figura 2. Formas de captación de información por teledetección</i>	11
<i>Figura 3. El espectro electromagnético</i>	12
<i>Figura 4. Sensores activos y pasivos</i>	14
<i>Figura 5. Resolución espacial</i>	14
<i>Figura 6. Resolución espectral</i>	15
<i>Figura 7. Resolución radiométrica</i>	16
<i>Figura 8. Resolución temporal</i>	16
<i>Figura 9. Esquema metodológico aplicado</i>	24
<i>Figura 10. Precipitación media mensual, 2016</i>	28
<i>Figura 11. Precipitación media mensual, 2017</i>	28
<i>Figura 12. Herramienta Sen2Cor</i>	30
<i>Figura 13. Herramienta Natural Neighbor</i>	31
<i>Figura 14. Herramienta NDVI a) I/O Parameters, b) Processing Parameters</i>	32
<i>Figura 15. Cálculo del índice NSI con la herramienta Raster Calculator</i>	33
<i>Figura 16. Herramienta TSAVI a) I/O Parameters, b) Processing Parameters</i>	34
<i>Figura 17. Herramienta Reclassify</i>	35
<i>Figura 18. Herramienta Principal Components</i>	36
<i>Figura 19. Límites de control, ozono 2016</i>	39
<i>Figura 20. Límites de control, ozono 2017</i>	40
<i>Figura 21. Límites de control, dióxido de nitrógeno 2016</i>	41
<i>Figura 22. Límites de control, dióxido de nitrógeno 2017</i>	41
<i>Figura 23. Límites de control, radiación solar 2016</i>	42
<i>Figura 24. Límites de control, radiación solar 2017</i>	42
<i>Figura 25. Comparación de O₃ para las distintas épocas de estudio</i>	43
<i>Figura 26. Comparación de NO₂ para las distintas épocas de estudio</i>	44
<i>Figura 27. Comparación de radiación solar para las distintas épocas de estudio</i>	45
<i>Figura 28. Comparación de NDVI para las distintas épocas de estudio</i>	46
<i>Figura 29. Comparación de NSI para las distintas épocas de estudio</i>	47
<i>Figura 30. Comparación de TSAVI para las distintas épocas de estudio</i>	48
<i>Figura 31. Comparación de LWCI para las distintas épocas de estudio</i>	49
<i>Figura 32. Comparación del ICA urbano para las distintas épocas de estudio</i>	57
<i>Figura 33. Comparación del ICA urbano para las distintas épocas de estudio</i>	59

RESUMEN

La calidad ambiental al interior de las urbes afecta de una u otra manera al desarrollo de sus poblaciones; siendo diversos los factores por los cuales esta se ve deteriorada, es necesario analizar las variables más influyentes que modifican sus condiciones ambientales y en consecuencia su desarrollo entorno al espacio geográfico. El presente proyecto de investigación planteó la elaboración de un índice de calidad ambiental (ICA), a partir de la utilización de tecnologías geoespaciales, considerando las épocas de lluvia y estiaje correspondientes a los años 2016 y 2017 dentro de la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito. Se propuso obtener cuatro índices ambientales combinando las bandas espectrales pertenecientes a imágenes del satélite Sentinel-2 a partir de la aplicación de algoritmos matemáticos y a su vez, mediante métodos de interpolación generar cuatro capas raster de los índices concernientes a la información alfanumérica. Una vez creados todos los índices se procedió a realizar el cálculo del índice de calidad ambiental (ICA). Para ello se empleó el Análisis de Componentes Principales (ACP) realizando una reclasificación de los datos de tal manera que conservasen su significancia, pero al mismo tiempo describan la mayor varianza de los índices individuales designándoles dimensiones diferentes. Finalmente se analizó la correlación existente entre épocas de estudio y se efectuó la prueba estadística ANOVA para evaluar el comportamiento de los cuatro índices generados, de la cual se obtuvo que de hecho existe una correlación alta entre las épocas de lluvia y estiaje de ambos años respectivamente y de esta manera se tomó a los índices generados del año 2017 como los índices de calidad ambiental urbanos.

PALABRAS CLAVE:

- **ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL (ICA)**
- **IMÁGENES SATELITALES**
- **SENTINEL 2**
- **COMPONENTES PRINCIPALES**
- **DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO (DMQ)**

ABSTRACT

Environmental quality within the cities affects one way or another to the development of their populations; being different factors by which this is deteriorated, it is necessary to analyze the most influential variables that modify environmental conditions and therefore their development environment to geographical space. This research project proposed the development of an environmental quality index (ICA), from the use of geospatial technologies, considering the rainy season and dry season for the years 2016 and 2017 within the urban area of the Metropolitan District Quito. It was proposed to obtain four environmental indices combining spectral bands belonging to satellite images Sentinel-2 from the application of mathematical algorithms and in turn, by interpolation methods generate four raster layers indices concerning alphanumeric information. Once created all indices proceeded to calculate the environmental quality index (ICA). For this, the Principal Component Analysis (PCA) performing a reclassification of data so that conservasen their significance, but also describe the greatest variance of individual indices designating them different dimensions was used. Finally the correlation between periods of study was analyzed and the statistical test ANOVA was conducted to evaluate the performance of the four indices generated, which was obtained that in fact there is a high correlation between the rainy and dry season in both years respectively and thus he took the indexes generated for 2017 as the rates of urban environmental quality.

KEY WORDS:

- **ENVIRONMENTAL QUALITY INDEX**
- **SATELLITE IMAGES**
- **SENTINEL 2**
- **MAIN COMPONENTS**
- **QUITO METROPOLITAN DISTRICT**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

Los ecosistemas urbanos representan focos contaminantes dentro del territorio, cuyas fuentes antrópicas requieren de la introducción en nuevas metodologías para su evaluación; por lo tanto, en este capítulo se exponen los aspectos generales de los cuales partirá la elaboración de este índice de calidad ambiental urbano mediante el análisis por componentes principales.

1.1 Antecedentes

Los estudios enfocados a la calidad ambiental dentro de las ciudades están sujetos a un conjunto de diversas metodologías que tienen como base la obtención de índices, mismos que dictaminan el estado de las variables ambientales que conforman el ecosistema, pero se orientan de diversas maneras para su análisis y posterior determinación, obteniendo resultados que servirán de apoyo para el cumplimiento de los objetivos del presente proyecto de investigación. Por consiguiente, se realizó una exhaustiva recopilación bibliográfica de los mismos encontrándose entre los más destacados el “*Estudio de la isla de calor urbano del Distrito Metropolitano de Quito mediante técnicas de percepción remota*” realizado por Bolaños (2017), en el cual realiza un análisis de la formación de islas de calor a través del uso de imágenes satelitales Landsat 7, Landsat ETM y Landsat 8. Para esto se basó principalmente en el cálculo de la temperatura superficial (TS), índice de vegetación normalizada (NDVI) y diferencia normalizada de construcciones (NDBI) y dentro del cual propone que para futuros estudios de la misma índole intervengan también variables cuya información describa las condiciones ambientales que influyen en la zona de estudio como son los cambios entre épocas de lluvia y estiaje propuestas en el presente trabajo en base al estudio realizado por Sánchez (2017) para la “*Elaboración de un índice de calidad ambiental (ICA), enfocado al sector urbano de la ciudad de Cuenca utilizando teledetección y análisis espacial*” a través de métodos multivariados analizando entonces su consistencia lógica tanto del índice por análisis multicriterio como del análisis por componentes principales, concluyendo que este último es el más adecuado. Se han realizado ya varios estudios de la calidad ambiental urbana con el uso de imágenes satelitales Landsat como el

que elaboraron Santana, Escobar & Capote (2010) empezando en primer lugar con la corrección geométrica y conversión a reflectividad de la imagen satelital Landsat ETM utilizada para posteriormente calcular los cinco índices seleccionados; finalmente se concluye que este estudio respalda la aplicación del análisis por componentes principales para este tipo de trabajos.

1.2 Estudios relacionados

Diversas investigaciones se han desarrollado en relación a la espectroscopia de reflectancia aplicada al estudio de suelos, algunas de ellas se presentan en la Tabla 1, pues complementan y respaldan la presente investigación; una de ellas se realizó en el Ecuador como tesis de pregrado y el resto a nivel internacional.

- **Tema:** Estimación de la concentración de ozono troposférico (O_3), a partir del análisis geoespacial de imágenes satelitales y la aplicación del modelo PLS, para las parroquias urbanas del cantón Quito

Autor: Michelle Burgos Tatés y Katherine Copo Pazmiño

Universidad: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE

Año: 2017

El proyecto se enfocó en la estimación del contaminante ozono troposférico en el ambiente, utilizando imágenes satelitales de los años 2014, 2015 y 2016, y datos obtenidos de las estaciones de monitoreo continuo de calidad del aire en el Distrito Metropolitano de Quito. Para esto, se determinó la temperatura superficial de la Tierra y varios índices ambientales mediante la aplicación de diversos algoritmos y finalmente se generó un modelo de predicción de la concentración de O_3 correspondiente a cada año, que fue construido en base a una matriz multivariable y corregido mediante la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS).

- **Tema:** Estudio de la isla de calor urbano del Distrito Metropolitano de Quito mediante técnicas de percepción remota

Autor: José Salazar

Universidad: Universidad Internacional SEK

Año: 2017

Este estudio analizó la Isla de Calor Urbano ICU del Distrito Metropolitano de Quito, a través del cálculo de temperatura superficial con imágenes multiespectrales de los sensores Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS. Se calcularon índices de vegetación NDVI y construcciones NDBI, y se analizó la relación entre las variables con temperatura superficial mediante aplicación de la Correlación Lineal de Pearson.

- **Tema:** Aplicación de un índice de calidad ambiental a la región Pampeana Argentina (2010)

Autores: Guillermo Ángel Velazquez

Institución: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Año: 2010

El cálculo de este índice se basó en la obtención de 23 indicadores que incluyeron recursos recreativos de base natural, recursos socialmente construidos, y problemas ambientales. De esta manera el estudio no solo incluyó variables utilizadas con regularidad en el análisis de la calidad ambiental sino que además aplicó otras con una perspectiva distinta de como pueden ser la seguridad y amenidades urbanas.

1.3 Planteamiento del problema

El crecimiento exponencial de las ciudades ha traído consigo un aumento en los niveles de contaminación y generación de gases de efecto invernadero, así como la degradación del suelo, disminución de áreas verdes y cambios drásticos en las temperaturas superficiales; esto ha desembocado en efectos tales como la formación de islas de calor, disminución de la calidad ambiental urbana y por ende en la salud y bienestar de sus habitantes (Villanueva, Ranfla, & Quintanilla, 2012). Quito, a pesar de ser capital del Ecuador, no cuenta actualmente con un ICA (Índice de Calidad Ambiental) mismo que proporcionaría información sobre el comportamiento espacio-temporal de los componentes que determinan su situación actual y permitiría implantar estrategias de mitigación que contribuyan al desarrollo sostenible de la ciudad y sirvan de impulso al desarrollo social y económico de sus pobladores al tiempo que mejoraría su calidad de vida.

Por este motivo, el presente proyecto de investigación propone el uso de tecnologías geoespaciales para la obtención de índices ambientales como el índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI) y el índice de suelos normalizados (NSI) entre otros; estos conjuntamente con información de la base de datos de la REMMAQ del INAMHI formarán parte del cálculo de un ICA para la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito.

1.4 Justificación e importancia

Debido a diversos factores como pueden ser el incremento en la tasa de natalidad o la migración de las poblaciones rurales a la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito el crecimiento demográfico se ha disparado exponencialmente y a la vez los niveles de contaminación dentro de la ciudad. Según la Organización Mundial de la Salud (2003) estos cambios traen consigo una disminución en el confort y la salud de sus habitantes afectando al desarrollo de la capital del país.

La calidad ambiental en la ciudad se ha visto influenciada por diversos factores: concentraciones poblacionales, crecimiento infraestructural o diseño vial, entre otros. A causa de la distribución espacial de los mismos, la calidad ambiental puede modificarse considerablemente de un punto a otro evitando así su interpretación de forma práctica y sencilla. Es por esto que el uso de tecnologías geoespaciales, y específicamente el trabajar con archivos de formato raster, constituye una herramienta valiosa para la representación del comportamiento de las variables de estudio, permitiendo desarrollar un análisis de la realidad ambiental de forma continua dentro de todo el espacio geográfico.

El Distrito Metropolitano de Quito debido a su altitud se encuentra dentro de una zona templada húmeda en la cual las variaciones de temperatura durante el día, según las horas, son muy significativas (Distrito Metropolitano de Quito - DMQ, 2008). Sin embargo, la ciudad cuenta con dos épocas durante el año: lluviosa (octubre a diciembre) y de estiaje (mayo a septiembre); ambas temporalidades influyen directa o indirectamente en las variables ambientales que se tomarán como objeto de estudio, en sus características físico-químicas y por consiguiente en sus patrones de comportamiento, siendo estos claves para el cálculo de un índice de calidad ambiental (Sánchez L. , 2017).

Ecuador, asumiendo su responsabilidad con los objetivos de desarrollo sostenible se encuentra en el deber de generar nuevas herramientas que ayuden a mejorar la calidad de vida de sus habitantes dentro de las ciudades según el objetivo 11 de la Agenda 2030 (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, 2016); por este motivo es importante que Quito, al ser la capital no sólo política sino también económica y administrativa del país disponga de un Índice de Calidad Ambiental urbano (ICA) que otorgue a las autoridades ambientales y territoriales un referente técnico para la toma de decisiones en cuanto a la distribución de los recursos.

1.5 Descripción del área de estudio

Tomando en cuenta las limitaciones en la disponibilidad de información se tomó como área de estudio a la zona urbana y parte de la zona rural del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ, el cual se localiza en la provincia de Pichincha en la parte centro norte del Ecuador (Figura 1), de tal manera que abarcó las estaciones de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ); mismas que proporcionaron información de los contaminantes ambientales.

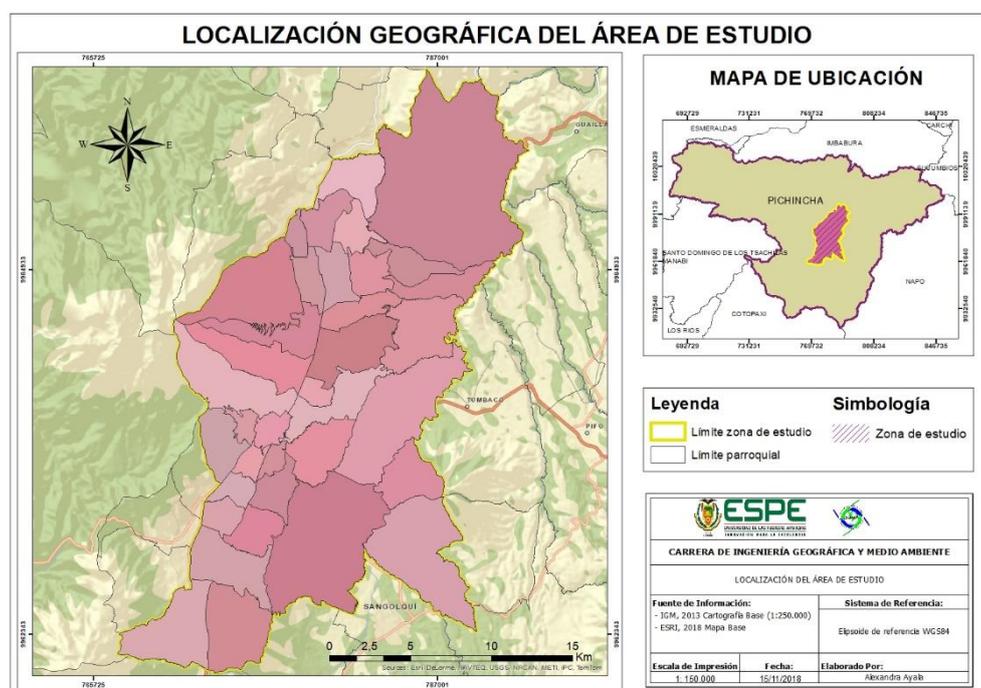


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Generar un Índice de Calidad Ambiental urbano (ICA) mediante la utilización de tecnologías geoespaciales, considerando las épocas de lluvia y estiaje de los años 2016 y 2017, para la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las variables ambientales que serán utilizadas mediante recopilación bibliográfica, para generar índices individuales.
- Recopilar y validar la información alfanumérica y geoespacial a través de la base de datos de la Secretaría del Ambiente de Quito (REMMAQ) y del catálogo de la Agencia Espacial Europea (ESA), para obtener datos interrelacionados en las mismas fechas de estudio.
- Procesar la información alfanumérica y geoespacial utilizando el software ArcGIS 9.3 para obtener los índices de calidad ambiental concernientes a las épocas de lluvia y estiaje.
- Construir un índice de calidad ambiental urbano para la ciudad de Quito, utilizando el método de componentes principales con el fin de evaluar la realidad ambiental de la zona de estudio.
- Determinar el comportamiento ambiental a través del análisis de la correlación espacial de los índices calculados, para representar su variación espacial y temporal dentro de la ciudad.

1.7 Metas del proyecto

- Una matriz de variables seleccionadas para el ICA compuesto.
- Una base de datos validados de información alfanumérica y geoespacial.
- Tres mapas comparativos de los índices meteorológicos.
- Cuatro mapas comparativos de los índices radiométricos.
- Dos mapas de los Índices de Calidad Ambiental urbanos (ICA).

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

El marco teórico expuesto en este capítulo, proporciona una base conceptual para la mejor comprensión del desarrollo de este estudio. Este se encuentra compuesto por tres partes: la primera, definición de calidad, índices y contaminantes ambientales; la segunda, referidas a la teledetección y a la aplicación de imágenes satelitales y la tercera, marco conceptual que contiene las principales definiciones de interés.

2.1 Calidad Ambiental

La calidad ambiental es la relación que existe entre los niveles de contaminación y su grado de afectación al ecosistema, debido al cual los procesos de intercambio de energía entre la superficie de la tierra y las variables que lo componen se ven modificados, desencadenando su disminución en la pérdida de los recursos agua, suelo y aire; así como de los seres vivos que habitan en ellos (Sánchez L. , 2017).

2.1.1 Medición de la calidad ambiental urbana

La calidad de vida dentro de las ciudades depende de algunos procesos poblacionales como son el crecimiento demográfico o la inmigración desde zonas rurales hacia las urbanas, provocando dentro de las ciudades un consumo excesivo de los recursos por una distribución poblacional deficiente, lo cual significa un freno en el desarrollo social y económico de sus pobladores. Es por esto que algunos autores han desarrollado metodologías para el cálculo del índice de calidad ambiental (ICA) para su estimación y control dentro de las urbes como es el caso del Ministerio del y Desarrollo sostenible de Colombia asociando los valores calculados de varios índices como: calidad de agua superficial o espacio público efectivo por habitante, entre otros; a una clasificación descriptiva (Díaz, Granados, & Valdés, 2013), misma metodología que fue adoptada por Orellana, Sellers & Martínez (2017) para la generación del ICA de la ciudad de Cuenca en el que incluyó el cálculo del índice de superficie de área verde por habitante y a su vez fue utilizado por Sánchez (2017) que incluyó entre sus objetivos la comparación entre dicha metodología y la de la obtención del ICA mediante el análisis de componentes principales.

2.1.2 Contaminación del aire por dióxido de nitrógeno (NO₂)

El deterioro de la calidad del aire producida por este contaminante es originado dentro de las ciudades por procesos de combustión, generalmente por parte de la congestión vehicular o por malos procesos industriales. Debido a la estrecha relación que se guarda entre estos productos y los altos niveles de dicho compuesto, se lo establece como un poderoso indicador de este tipo de emisiones dentro de la urbe permitiendo así una interpretación basada en una fuerte hipótesis sobre su naturaleza (Red Metropolitana de Monitoreo de Aire de Quito - REMMAQ, 2014).

Los procesos físico-químicos que ocurren dentro de la atmósfera modifican también la naturaleza del dióxido de nitrógeno, de tal manera que se da paso a la formación de otros compuestos como lo son el ozono (O₃), ácido nítrico (HNO₃) y ácido sulfúrico (SO₂), entre otros. Es así como los nuevos contaminantes generados, consecuencia de los altos niveles de NO₂, contribuyen a que se lo determine como el contaminante primario precursor de un compendio de contaminantes secundarios que producen graves afecciones a la salud humana (Organización Mundial de la Salud - OMS, 2003).

2.1.3 Contaminación del aire por ozono (O₃)

La presencia del ozono en cantidades normales representa un factor esencial en el aire de cualquier ecosistema, sin embargo, su acumulación excesiva, que es producida por la interacción entre el dióxido de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (COVS) dentro de las chimeneas de las industrias principalmente representa un contaminante de alto riesgo para la salud humana (Burgos & Copo, 2016).

Por otro lado, las afecciones resultantes por los niveles anormales de dichos contaminantes se ven reflejadas además en los procesos fotosintéticos dentro del área verde urbana, esenciales para la sustentabilidad de estos ecosistemas. Las elevadas concentraciones de O₃ provocan en las plantas la producción excesiva del carbono que llega a las hojas y a los tallos en detrimento al proceso normal en el cuál las raíces serían sus principales receptoras, generando de esta manera una gran pérdida del almacenamiento de carbono en los bosques que sirven como pulmón verde dentro de la ciudad (Ren, Tian, & Liu, 2007).

2.1.4 Radiación solar

La radiación solar constituye la primordial fuente de energía de los seres vivos en procesos como la fotosíntesis y la evapotranspiración; en el caso de las plantas y los árboles cuya función dentro de las ciudades es, entre otras, la de brindar sombra y por ende confort a las personas que ahí habitan los altos niveles de radiación solar pueden frenar fuertemente el crecimiento de algunas especies cuya respuesta fisiológica se convierte en poco tolerable hasta que el flujo de calor en el suelo se ve también afectado (Bader, van Geloof, & Rietkerk, 2006).

2.1.5 Superficie verde urbana por habitante

Se define al área o superficie verde urbana, como la extensión en metros cuadrados de vegetación existente por habitante (Orellana, Sellers, & Martínez, 2017). Al interior de las ciudades se considera su relevancia como medida de mitigación al efecto de las islas de calor, debido a que sus procesos naturales ayudan a restaurar la calidad del aire, a la vez que brindan el confort necesario a los habitantes que declinan de la utilización de otros métodos que representarían un mayor consumo energético y por ende mayor contaminación (Honjo & Takakura, 2003).

2.1.6 Índice de calidad ambiental

Los índices de calidad ambiental reúnen un conjunto de indicadores que modelan el estado del recurso o ecosistema a evaluar mediante modelos termodinámicos, de regresión, de diagramas, de simulación, modelos multivariable o inclusive mediante métodos de percepción remota y la integración de los SIG (Liang & Weng, 2011). La concepción de estos índices ambientales no parte únicamente de la necesidad de entender las condiciones del medio ambiente, sino también de una ausencia de bases técnicas para la formulación de políticas que garanticen el bienestar de las poblaciones (Díaz, Granados, & Valdés, 2013).

Lo que busca este tipo de índices es cuantificar el estado o la calidad de los elementos que conforman el ambiente, para su elaboración se analizan diversos enfoques que permitan compararlos tanto en comportamiento como en estructura. Dentro de la metodología de cada índice se comienza por seleccionar las variables de estudio que se adaptan a cada entorno

característico de manera representativa y permitan así analizar la contaminación, el cumplimiento de estándares o tendencias de degradación, entre otros parámetros (Pykh, Kennedy, & Grant, 2000). A partir de un índice urbano compuesto generalmente se estudia la calidad de una superficie representativamente grande, al ser así esta abarcará un compendio de aspectos fuertemente influyentes en la contaminación de las ciudades y ayudará a la obtención de la información clave para su proyección hacia el desarrollo sostenible de manera local, regional y finalmente nacional (Craik & Zube, 1976).

La Secretaría del Ambiente desarrolló un índice de calidad del aire para la ciudad de Quito, el cual establece categorías de tolerancia para los principales contaminantes presentes en el aire (ver tabla 1), entre los cuales se encuentran el ozono troposférico delimitado a concentraciones máximas aceptables para un promedio de ocho horas, así como el dióxido de nitrógeno para concentraciones máximas aceptables para un promedio de 24 horas.

Tabla 1.

Límites numéricos de cada categoría del ICA ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)

RANGO	CATEGORÍA	CO ^a	O ₃ ^b	NO ₂ ^c	SO ₂ ^d	PM _{2.5} ^e	PM ₁₀ ^f	COLOR
0-50	Nivel deseable	0-5000	0-50	0-100	0-62,5	0-25	0-50	Blanco
51-100	Nivel aceptable	5001-10000	51-100	101-200	63,5-125	26-50	51-100	Verde
101-200	Nivel de precaución	10001-15000	101-200	201-1000	126-200	51-150	101-250	Gris
201-300	Nivel de alerta	15001-30000	201-400	1001-2000	201-1000	151-250	251-400	Amarillo
301-400	Nivel de alarma	30001-40000	401-600	2001-3000	1001-1800	251-350	401-500	Naranja
401-500	Nivel de emergencia	>40000	>600	>3000	>1800	>350	>500	Rojo

^a: concentración máxima promedio en 8 horas; ^b: concentración máxima 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.

Fuente: (Secretaría del Ambiente, 2018)

2.2 Análisis Geoespacial

Cada fenómeno o suceso producido sobre la superficie terrestre ocurre dentro de un espacio geográfico en un momento determinado, y por consiguiente dicho fenómeno es susceptible a medición (Liang & Weng, 2011). El conjunto de las variables que determinan

los acontecimientos de manera continua en el espacio arrojan respuestas sobre su comportamiento u origen al ser analizados mediante el uso de tecnologías geospaciales como pueden ser los sistemas de información geográfica (SIG) o las imágenes satelitales a través de la teledetección; esto representa un mayor dominio de la información sobre el entorno sobre el cual se desenvuelve el ser humano (Santana, Escobar, & Capote, 2010).

2.2.1 Teledetección

Según Campbell & Wynne (2011), el estudio de la teledetección se refiere a la práctica de obtener información de las superficies terrestre y acuática utilizando imágenes adquiridas mediante percepción remota a través del análisis de una o más regiones del espectro electromagnético reflejado o emitido desde la superficie de la Tierra.

Esta observación a distancia puede ser llevada a cabo siempre y cuando el sensor cumpla con la condición de que exista una interacción entre él y los objetos, esta señal es conocida como radiación electromagnética; siendo estos tres elementos los principales elementos de la teledetección (Chuvieco, 1995). Las diferentes formas que tiene el sensor de captar la información dependerán del origen del flujo energético y pueden ser según Mora y Cañarte (2017): reflexión (i), emisión (ii) o emisión-reflexión (iii) como se muestra en la figura 1.

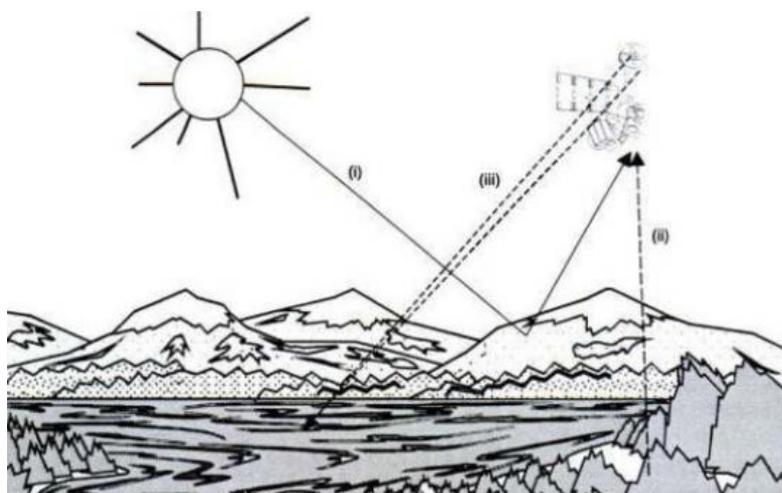


Figura 2. Formas de captación de información por teledetección

Fuente: (Chuvieco, 2008)

2.2.2 Espectro electromagnético

Las radiaciones solares generan un espectro completo de energía electromagnética que debido a la descomposición de sustancias y al movimiento térmico, entre otros fenómenos, dan paso a la formación de energía radiante emitida o reflejada que viaja a través de la atmósfera de la Tierra e interactúa con los objetos que ahí se encuentra variando en su longitud de onda y frecuencia (Campbell & Wynne, 2011).

Las frecuencias que presentan un comportamiento similar se agrupan en bandas, como es el caso de la luz visible caracterizada por ser la forma más familiar dentro del espectro electromagnético. Su longitud de onda (como se muestra en la figura 3) va de 0,4 a 0,7 μm (Chuvieco, 2008), esto permite divisar a simple vista elementos tales como vegetación, estructuras, suelos, rocas o cuerpos de agua en el Superficie de la Tierra.

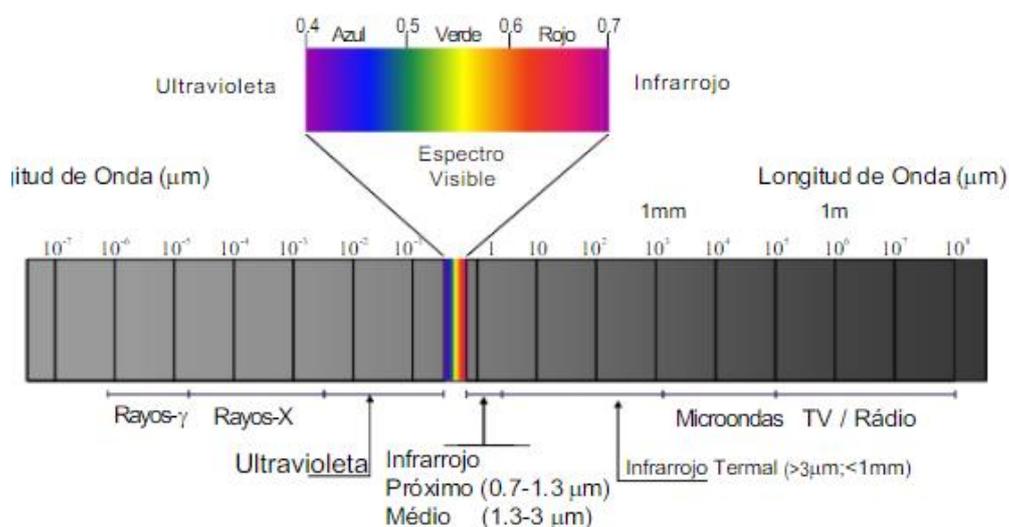


Figura 3. El espectro electromagnético
Fuente: (Pérez D. , 2007)

El espectro visible representa solo una pequeña parte del espectro electromagnético completo; según Peguero (2012) los grandes segmentos de este que se encuentran fuera del rango de la visión humana se convierten en objeto del estudio de la Teledetección, donde además se distinguen las siguientes bandas espectrales que muestra la Tabla 2:

Tabla 2.
Bandas que conforman el espectro electromagnético

	Denominación	Longitud de onda
Radiación indirectamente ionizante	Rayos Gamma Rayos X	< 10pm 10 pm – 10 nm
Luz ultravioleta	Ultravioleta extremo Ultravioleta medio Ultravioleta cercano	10 - 280 nm 280 – 315nm 315- 400 nm
Luz visible	Luz visible	0,4 – 0,7 μm
Luz infrarroja	Infrarrojo Cercano Infrarrojo medio Infrarrojo Lejano	0,7 μm – 1,3 μm 1,3 μm – 8 μm 8 μm – 14 μm
Microondas	Microondas	14 μm – 30 cm
Radio	Ultra alta frecuencia de radio (UHF) Muy alta frecuencia de radio (VHF) Radio de onda corta Radio de onda media (AM) Radio de onda larga Radio de onda muy larga	30 cm – 1 cm 1 cm – 10 m 10 m – 180 m 180 m – 650 m 650 m – 1 km >10 km

Fuente: (Ordiales, 2007)

2.2.3 Tipos de sensor

Los sensores activos y pasivos son los dos grandes grupos de sensores según su forma de captación de radiación electromagnética como se muestra en la figura 4:

- **Sensores Activos:** Este tipo de sensores se distinguen por poseer su propia fuente de energía lo que significa que produce por sí mismo el flujo de energía necesario para interactuar con la superficie terrestre, dentro de esta rama se distinguen sensores como los radar (Radio Detectcion and Ranging) y los microondas (Sánchez F. , 2011).
- **Sensores Pasivos:** Este tipo de sensores cumplen con la función de registrar la radiación emitida por la superficie o la radiación solar reflejada, encargándose de la detección de sus características reflectantes (Sobrino, Raissouni, & Oliosio, 2000).

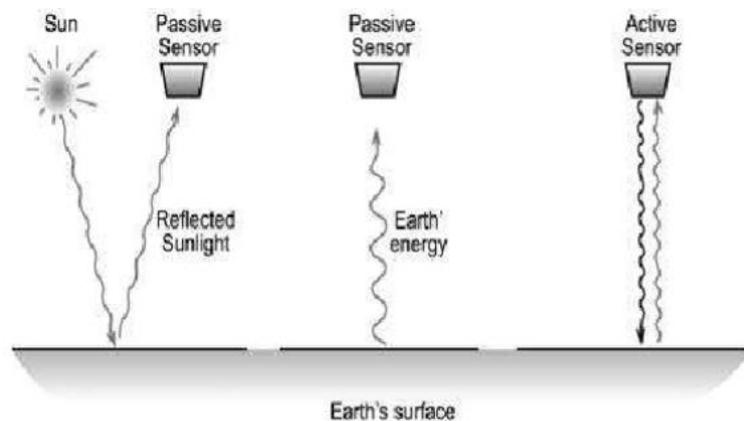


Figura 4. Sensores activos y pasivos

Fuente: (Peguero C. , 2016)

2.2.4 Resolución de un sensor

Las resoluciones de un sensor se pueden clasificar dependiendo de sus capacidades técnicas de la siguiente manera:

- Resolución espacial: La imagen generalmente está limitada con respecto al tamaño de la celda, en otras palabras, según Chuvieco (1995) el tamaño del píxel determina el objeto mínimo visible que se puede obtener de la imagen. La capacidad para lograr captar estos detalles está ligada a la capacidad del sensor y a la altitud en la que este se encuentre; como se puede observar en la figura 5 la complejidad de la escena restringe también en gran magnitud la posibilidad distinguir los detalles (Campbell & Wynne, 2011).

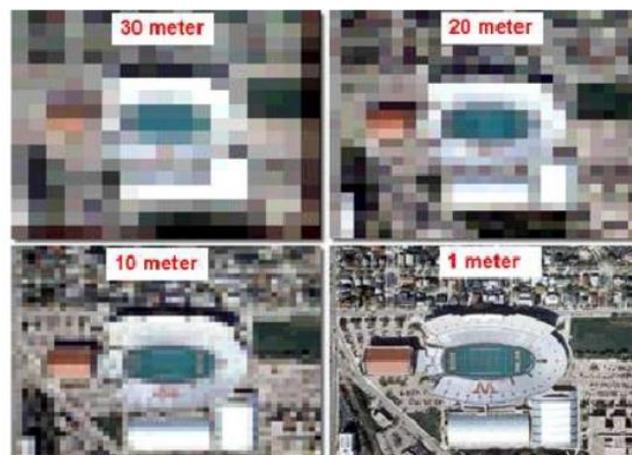


Figura 5. Resolución espacial

Fuente: (Pérez D. , 2007)

- Resolución espectral: Se orienta específicamente a observar la respuesta espectral de una característica en las diferentes longitudes de onda reflejadas o emitidas por la superficie de interés (ver figura 6) y la cantidad de bandas que registra (Chuvieco, 2008). Dicho de otro modo, esta resolución distingue los colores de los objetos a pesar de tratarse en su mayoría de las longitudes de onda que se hallan fuera del espectro visible, siendo que esta información difiere de un sensor a otro y determina en gran medida el uso principal del mismo (Basso, Cammarano, & De Vita, 2004).

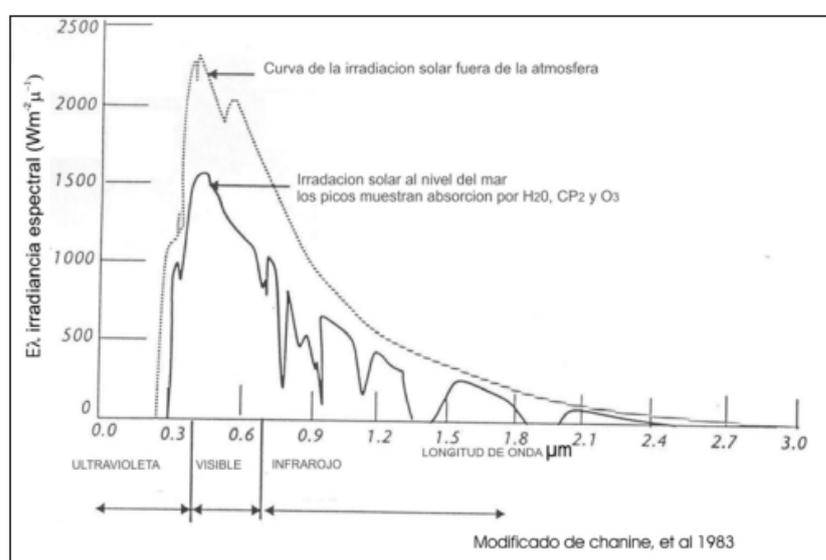


Figura 6. Resolución espectral
Fuente: (Villegas, 2008)

- Resolución radiométrica: El análisis de toda imagen adquirida desde un sensor remoto depende de las diferenciaciones en el brillo de los objetos y sus rasgos, es decir de los cambios de radiancia que logra captar (Peguero C. , 2016). La sensibilidad del instrumento de detección remota debe tener la capacidad de grabar el contraste y brillo entre la escena y sus fondos y asignar a cada pixel un nivel digital (Basili, Bonafoni, Biondi, & Pelliccia, 2006).

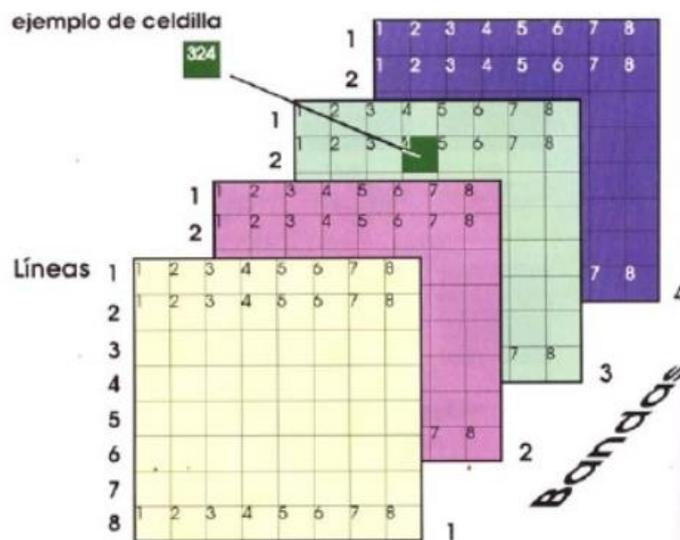


Figura 7. Resolución radiométrica

Fuente: (Pérez D. , 2007)

- Resolución temporal: Se refiere al lapso de tiempo entre toma y toma de una región, la cual además depende de la velocidad, tipo de órbita y ángulo de barrido del sensor (ver figura 8) que varía dependiendo la plataforma utilizada y de sus condiciones atmosféricas (Basso, Cammarano, & De Vita, 2004). A pesar de que con una sola imagen se puede obtener la información deseada, su veracidad se demuestra mejor mediante el uso de repetidas imágenes en diferentes épocas para ampliar la capacidad de estudio de los datos obtenidos con la teledetección (Peguero C. , 2012).

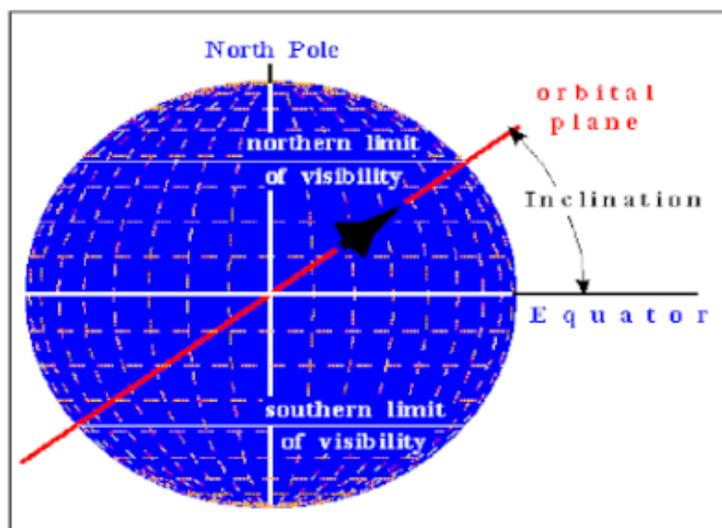


Figura 8. Resolución temporal

Fuente: (Pérez & Muñoz, 2006)

2.2.5 Satélites de observación

Los satélites de observación son plataformas artificiales colocadas por el hombre en una órbita alrededor del planeta sobre las que se montan sensores o cámaras que captan imágenes de gran valor debido a que se encuentra en longitudes de onda indivisibles para el ojo humano, además por la gran distancia a la que se encuentran son capaces de captar grandes extensiones en una sola barrida cumpliendo criterios según sus características específicas como son los satélites de vigilancia o satélites meteorológicos entre otros (Sobrino, Raissouni, & Oliosio, 2000).

2.2.6 Misiones Sentinel

La fase operacional el programa Copérnico fue lanzada bajo la iniciativa de la Agencia Espacial Europea (ESA) junto con la Comisión Europea (CE) cuyo propósito es brindar información de calidad y fácil acceso para mejorar la gestión de los recursos naturales y la seguridad civil gracias a sus satélites medioambientales entre los cuales se encuentran las cinco familias de misiones Sentinel (ESA, 2015).

2.2.7 Sentinel 2

Según la ESA (2015) la misión Sentinel-2 consta de dos satélites multiespectrales de alta resolución (Sentinel 2A y Sentinel 2B) ubicados a 786 km de altura de la superficie terrestres, ambos describen una órbita polar con una resolución temporal de 5 días en el ecuador y fueron diseñados para adquirir información sobre la superficie vegetal y zonas costeras principalmente. La característica que se destacan de esta misión son la alta calidad en cuanto a su resolución espacial (10 a 60 m) y su capacidad de cobertura dada su frecuencia de visitas ya que de esta manera contribuye al monitoreo de las condiciones medioambientales del planeta (Drusch, y otros, 2012). Las cámaras de estos satélites realizan tomas compuestas por trece bandas espectrales que van desde el espectro visible hasta el infrarrojo de onda corta con un campo de visión de 290 km como se presenta en la tabla 2 (ESA, 2015).

Tabla 3.*Bandas de los sensores Sentinel 2A y 2B*

	MISION SENTINEL		SENTINEL 2A	SENTINEL 2B
Banda	Sensor	Tamaño del pixel (m)	Centro de banda (nm)	Centro de banda (nm)
1	Coastal aerosol	60	443,9	442,3
2	Banda 2 - Blue	10	496,6	492,1
3	Green	10	560	559
4	Red	10	664,5	665
5	Vegetación Red Edge	20	703,9	703,8
6	Vegetación Red Edge	20	740,2	739,1
7	Vegetación Red Edge	20	783,5	779,7
8	NIR	10	835,1	833
8A	Vegetación Red Edge	20	864,8	864
9	Water vapor	60	945	943,2
10	SWIR	60	1373,5	1376,9
11	SWIR	20	1613,7	1610,4
12	SWIR	20	2202,4	2185,7

Fuente: (ESA, 2015)

2.2.8 Imagen satelital

Las imágenes satelitales son fotografías tomadas desde el espacio a grandes distancias de la superficie terrestre y, según el INEGI (1999), representan una poderosa herramienta para su estudio, con bases en el conocimiento sobre el espectro electromagnético y de esta manera sabiendo destacar las características del producto que se maneja.

Generalmente la calidad de los datos recolectados depende mucho de las características del sensor y del satélite en el cual se encuentra colocado. La existencia de cada vez más misiones satelitales ha aportado en gran medida al entendimiento de la evolución de muchos fenómenos que ocurren en la Tierra, así como a la facilidad de brindar soluciones inmediatas a diversas situaciones de interés (Pérez & Muñoz, 2006).

2.2.9 Correcciones de una imagen satelital

Algunas alteraciones como el movimiento de los sensores, colocados a grandes distancias de la Tierra sobre satélites artificiales, la interacción de la atmósfera o la superficie de toma produce interferencias en la captura de las imágenes, las cuales se ven reflejadas en el producto final (Pérez & Muñoz, 2006). Para corregir estas anomalías se debe pasar a las imágenes por un tratamiento previo a su utilización que garantice la veracidad de los datos deseados, pudiendo ser su objetivo final el uso agrícola, meteorológico, entre otros (Campbell & Wynne, 2011). Son algunas técnicas las que se utilizan para el tratamiento digital de las imágenes, sin embargo las correcciones más utilizadas según Chuvieco (1995) son las que se describen a continuación:

- **Corrección geométrica:** Al momento de captura de las imágenes se pueden generar algunos tipos de distorsiones producidas por el movimiento ya sea del sensor, como de los mismos efectos de rotación y traslación del planeta (Pérez D. , 2007). El resultado de estos movimientos arroja imágenes con ciertos desplazamientos; para ubicar la imagen en concordancia con la realidad de la superficie de toma se recurre a diferentes métodos como son modelos de deformación o toma de puntos de control (GCPs) sobre el área de estudio, dependiendo de la extensión que sea esta (Peguero C. , 2016). En definitiva, lo que hacen estos métodos es básicamente definir los centros de los píxeles en su ubicación real sobre el terreno.
- **Corrección radiométrica:** Son algunos fenómenos los que pueden modificar los valores de píxel de una imagen como son las variaciones en la atmósfera o cambios de la radiación solar, mismos que afectan a la respuesta de radiación dentro del espectro electromagnético (Chuvieco, 2008). Generalmente el proveedor de la imagen se encarga de realizar las correcciones de rayado de líneas o ruido entre otros fenómenos, aplicando métodos adecuados según la gravedad de la distorsión (Peguero C. , 2016).
- **Corrección atmosférica:** Para la aplicación de esta corrección es indispensable tener conocimiento de las condiciones y características de la superficie de toma, ya que

son estas las que determinan la radiación que es capaz de captar el sensor (Teggi, Musacchio, & Buongiorno, 2005). Es importante aplicar este tipo de correcciones principalmente cuando se trata de zonas costeras o zonas heterogéneas donde se observa mayores variaciones de absorción y distorsión en la atmósfera (Muñoz, Sobrino, & Sòria, 2011).

- Corrección topográfica: Al tratarse de imágenes satelitales se entiende que el área que cubrirá cada imagen corresponde a una superficie bastante extensa por lo cual las condiciones del terreno, así como las condiciones de iluminación variarán debido a la distancia, estas condiciones propias del terreno se corrigen a partir de un modelo de elevaciones (MDE) (Álvarez & Padilla, 2016).

2.3 Índices radiométricos

Se trata de índices generados a partir de la combinación de bandas espectrales, los cuales se rigen a algoritmos matemáticos que destacan las propiedades características producidas por ejemplo por la reflectancia del dosel de la vegetación y se ubican en ciertos rangos de longitud de onda (Gilbert, Gonzáles, & García, 1997); características basadas en la respuesta espectral de algunos componentes químicos son de importante valor para estudios agrícolas que buscan conocer el vigor de la planta con el objetivo optimizar recursos o llevar un control de su producción (Basso, Cammarano, & De Vita, 2004).

2.3.1 Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI)

El índice normalizado diferencial de vegetación es un índice utilizado para obtener una respuesta espectral sobre el estado de salud de la cubierta vegetal y se calcula a través de la fórmula 1 (Basso, Cammarano, & De Vita, 2004).

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (1)$$

Donde:

NIR = infrarrojo cercano (Banda 8 en Sentinel 2).

VIS = Rojo visible (Banda 4 en Sentinel 2).

2.3.2 Índice de suelos normalizados (NSI)

El índice de suelos normalizados proporciona la cantidad de área construida o impermeable del suelo concerniente a la superficie de la ciudad y se calcula en base a la fórmula 2 (Sánchez L. , 2017).

$$NSI = \frac{(SWIR-NIR)}{SWIR+NIR} \quad (2)$$

Donde:

NIR = infrarrojo cercano (Banda 8 en Sentinel 2).

$SWIR$ = Infrarrojo de onda corta (Banda 11 en Sentinel 2).

2.3.3 Índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI)

El índice de vegetación ajustado al suelo transformado es una modificación del NDVI, el cual agrega la corrección de la perturbación que causa el suelo en áreas con cobertura vegetal baja; se calcula a través de la fórmula 3 (Baret & Guyot, 1991).

$$TSAVI = \frac{b(NIR-bRED-a)}{aNIR+RED-(ab)+X(1+b^2)} \quad (3)$$

Donde:

X = Factor de corrección del suelo (0,08).

a y b = Composiciones del color natural y los valores de reflectancia de las bandas NIR y RED.

2.3.4 Índice de humedad en las hojas (LWCI)

El índice de humedad en las hojas permite obtener la relación existente entre las bandas NIR Y SWIR y describen el contenido de humedad de la hoja, para lo cual su cálculo se lo realiza mediante la fórmula 4 (Álvarez & Padilla, 2016).

$$LWCI = \frac{-\log(1-(NIR-SWIR))}{-\log(1-(NIR_{FT}-swir_{FT}))} \quad (4)$$

Donde:

NIR = infrarrojo cercano (Banda 8 en Sentinel 2).

SWIR = Infrarrojo de onda corta (Banda 11 en Sentinel 2).

NIRFT = reflectividad máxima de la banda NIR para zonas con vegetación.

SWIRFT = reflectividad máximo de la banda SWIR para zonas con vegetación.

2.4 Fundamentación Conceptual

- **Índice de Calidad Ambiental (ICA)**

Un índice de calidad ambiental se obtiene como resultado de la unión de un conjunto de índices ambientales, la cual proporciona información unificada de fenómenos que ocurren dentro de un espacio geográfico, con una apreciación que se asemeja a la realidad (Sánchez L. , 2017).

- **Contaminación Ambiental**

Se denomina contaminación ambiental al cambio dañino o perjudicial en las características físicas, químicas y biológicas en el agua, suelo y aire, que modifican las condiciones en el ambiente y puede afectar la calidad de vida en la tierra (Atilio, 2013)

- **Red de Monitoreo Atmosférico de Quito**

Proporciona información confiable acerca de los contaminantes presentes en la atmósfera, obtenida desde sus estaciones remotas de monitoreo las cuales se encuentran dentro del Distrito Metropolitano de Quito (Secretaría del Ambiente, 2018).

- **Teledetección espacial**

Se ha definido a la teledetección espacial como la técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, debido a la interacción energética artificial, ya por emisión existente entre la Tierra y el sensor (Chuvieco, Fundamentos de Teledetección Espacial, 1995).

- **Índices de diferencia normalizada**

Los índices de diferencia normalizada son parámetros que proporcionan información de las propiedades ópticas del suelo y se obtienen a partir de la combinación de valores de reflectividad de pares de bandas (Bolaños, 2017).

- **Componentes principales**

El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica estadística multivariante de simplificación, que permite transformar un conjunto de variables originales correlacionadas entre sí, en un conjunto sintético de variables no correlacionados denominados factores o componentes principales (Zapotitla, 1996)

2.5 Sistema de variables

2.5.1 Variables independientes

Dentro de la elaboración del índice de Calidad Ambiental urbano compuesto se estableció como variables independientes a los siguientes índices, por un lado los resultados del procesamiento de las imágenes del sensor Sentinel-2: índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI), índice de los suelos normalizados (NSI), índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI), índice de humedad en las hojas (LWCI); por otro lado los índices meteorológicos calculados a partir de la información alfanumérica: concentración de ozono (O₃), concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), radiación solar y superficie verde urbana por habitante (SVUH) (ver Anexo 1).

2.5.2 Variables dependientes

Para conocer la variabilidad de influencia del conjunto de índices ambientales más influyentes dentro del DMQ se tomó al índice de Calidad Ambiental urbano (ICA) como única variable dependiente (ver Anexo 1).

CAPITULO III

METODOLOGÍA

Este capítulo desglosa la metodología empleada en el presente proyecto de investigación, el mismo que se basa en uno de los métodos propuestos por Sánchez (2017), en su elaboración de un índice de calidad ambiental (ICA) para la zona urbana de la ciudad de Cuenca, el sector elegido para el presente trabajo fue adaptado en las dos fases que se observan en la figura 9: fase preliminar y fase de procesamiento.

3.1 Modalidad de investigación

Dentro de la fase preliminar se definen tanto el área de estudio, como la temporalidad y las variables más representativas según las condiciones ambientales de la ciudad. Esto se lo realizó tras analizar el comportamiento y la disponibilidad de los datos proporcionados por tres fuentes secundarias de información: la base de datos de la Secretaría del Ambiente de Quito, en la cual se encuentran registros anuales y mensuales de datos tomados diariamente cada diez minutos en cada una de las nueve estaciones que forman parte de la Red Metropolitana de Monitoreo de Quito (REMMAQ), del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y de las imágenes satelitales correspondientes a los años 2016 y 2017 del satélite Sentinel-2.

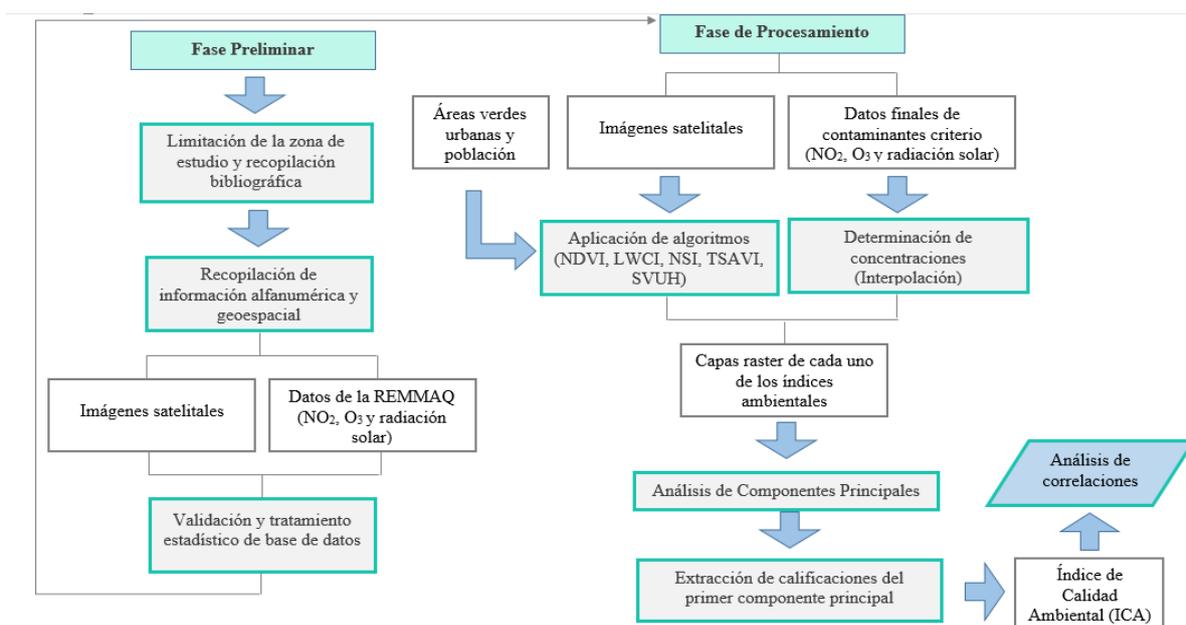


Figura 9. Esquema metodológico aplicado

3.2 Software empleado

Tres softwar son utilizados para el correcto análisis de cada etapa como se detallan a continuación; el software SNAP 6.0 para el procesamiento de las imágenes utilizadas y generación de los índices radiométricos, el software Arcgis 9.3 empleado en el cálculo del índice ambiental compuesto y finalmente el software estadístico IBM SPSS Statistics versión gratuita, para el análisis estadístico de los resultados.

3.3 Recopilación y validación de la información

Se cuenta con tres fuentes secundarias de información: la base de datos de la Secretaría del Ambiente de Quito, en la cual se encuentran registros anuales y mensuales de datos tomados diariamente cada diez minutos en cada una de las nueve estaciones que forman parte de la Red Metropolitana de Monitoreo de Quito (REMMAQ), los datos de las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMI) que se encuentran dentro de la zona de estudio y de las imágenes satelitales correspondientes a los años 2016 y 2017 del satélite Sentinel-2 que abarcan el área de influencia.

3.3.1 Datos de referencia de las estaciones de monitoreo de la REMMAQ

Una vez obtenidos los datos de las épocas seca y lluviosa de los años 2016 y 2017 correspondientes a la base de datos de la REMMAQ, se procede a discernir dicha información de tal manera que se asegurase su continuidad en cuanto a la concentración de los contaminantes como a su distribución espacial y temporal; para esto se tabula la información que contenía mediciones de cada hora diariamente y con un total de 720 valores mensuales aproximadamente se realizó una depuración de los datos que no mostraron una lectura continua para cada estación o a su vez presentaron datos atípicos que pudiesen interferir en el análisis dentro sus variaciones temporales y espaciales; una vez hecho esto se procede a calcular el promedio mensual para cada variable, obteniendo finalmente 12 lecturas anuales por estación como se presenta a continuación en las tablas 4 y 5.

Tabla 4.
Promedios mensuales del año 2016

	Mes	Cotocollao	Carapungo	Belisario	El Camal	Centro	Guamaní	Los Chillos
OZONO - µg/m³	ENE	18,43	27,23	18,34	21,27	27,91	29,62	23,37
	FEB	19,45	26,30	22,16	20,46	29,43	29,57	21,81
	MAR	18,31	23,62	17,66	17,09	24,77	26,19	20,97
	ABR	19,14	22,98	15,91	15,24	20,16	24,42	23,35
	MAY	17,36	20,15	14,63	15,35	18,19	21,72	20,91
	JUN	19,74	22,32	17,50	17,99	25,29	22,71	20,08
	JUL	22,70	25,93	21,85	21,76	30,86	25,55	23,28
	AGO	33,88	32,71	37,09	31,59	43,84	30,16	31,87
	SEP	30,52	34,39	34,52	28,72	45,23	28,17	28,95
	OCT	27,48	34,59	29,52	27,69	34,90	38,24	29,79
	NOV	25,01	33,12	24,12	22,38	30,65	34,67	28,28
	DIC	22,39	30,70	20,71	18,85	25,81	30,01	23,99
NO₂ (µg/m³)	ENE	16,56	19,89	28,85	26,07	24,62	20,65	-
	FEB	16,83	18,25	28,79	29,66	23,80	25,93	-
	MAR	17,97	20,27	30,24	30,13	24,87	26,19	-
	ABR	21,69	19,47	25,25	29,92	22,98	21,12	-
	MAY	18,97	18,29	20,77	29,50	20,55	17,78	-
	JUN	21,21	23,89	22,02	23,53	17,47	17,90	-
	JUL	22,84	22,66	23,41	23,80	18,10	18,43	-
	AGO	22,00	23,40	21,30	23,57	15,97	20,56	-
	SEP	29,09	27,34	27,82	36,34	21,46	24,23	-
	OCT	26,67	23,69	31,00	34,13	26,42	22,68	-
	NOV	24,92	21,27	29,14	31,15	24,96	21,91	42,21
	DIC	26,53	24,24	32,85	33,86	29,86	26,01	38,18
RAD_SOLAR (W/m²)	ENE	252,39	244,61	212,42	-	-	-	236,33
	FEB	225,65	232,18	198,88	-	-	-	223,72
	MAR	201,41	205,68	170,82	-	-	-	202,15
	ABR	210,19	216,83	175,64	-	-	-	217,23
	MAY	226,84	226,40	198,99	-	-	-	222,23
	JUN	210,40	209,25	195,02	-	-	-	210,18
	JUL	215,04	218,62	206,68	-	-	-	226,03
	AGO	-	257,33	0,00	244,88	-	-	-
	SEP	-	227,97	0,00	218,23	-	216,13	211,15
	OCT	-	245,74	140,36	245,66	-	231,26	236,41
	NOV	-	259,73	209,61	256,64	218,11	240,98	228,89
	DIC	-	227,32	183,78	229,47	212,69	208,21	207,35

Fuente: (Secretaría del Ambiente, 2018)

Tabla 5.
Promedios mensuales del año 2017

	Mes	Cotocollao	Carapungo	Belisario	El Camal	Centro	Guamaní	Los Chillos
OZONO (µg/m³)	ENE	18,83	25,16	17,81	17,09	13,47	22,20	25,36
	FEB	19,75	25,79	20,18	20,18	15,26	22,74	27,79
	MAR	17,41	23,22	16,70	18,03	13,63	21,90	26,87
	ABR	18,55	21,10	15,89	16,87	13,20	21,44	22,50
	MAY	16,65	19,27	13,80	14,19	11,36	18,28	22,34
	JUN	14,42	19,69	15,46	16,70	13,11	23,79	21,53
	JUL	16,05	23,33	23,08	25,32	19,94	32,14	26,68
	AGO	18,19	28,22	25,19	26,80	24,36	36,89	30,72
	SEP	39,01	37,85	32,41	36,63	31,23	46,71	39,89
	OCT	25,60	26,63	18,96	21,21	15,83	31,87	27,15
	NOV	24,53	25,01	16,68	19,76	13,00	29,24	29,29
	DIC	24,37	24,40	16,18	22,37	17,00	28,28	28,44
NO2 (µg/m³)	ENE	21,08	19,45	26,09	32,69	28,57	24,83	18,21
	FEB	18,73	18,78	26,12	30,86	26,49	25,30	16,69
	MAR	21,90	18,03	16,70	23,22	13,63	26,87	17,41
	ABR	17,79	23,04	25,67	33,13	28,46	24,94	19,24
	MAY	17,54	19,68	24,67	29,42	26,34	22,10	16,00
	JUN	14,70	25,49	23,45	30,64	27,61	18,19	18,62
	JUL	12,67	24,53	17,95	23,14	21,65	11,27	17,51
	AGO	13,87	28,64	24,81	32,72	27,53	18,41	22,05
	SEP	25,79	29,17	25,40	33,47	30,53	19,86	22,66
	OCT	25,18	27,44	23,91	33,67	30,11	23,67	20,93
	NOV	26,23	25,90	25,56	34,91	31,76	27,04	22,28
	DIC	21,91	20,09	21,78	28,75	27,65	22,51	20,19
RAD_SOLAR (W/m²)	ENE	-	220,34	170,73	211,67	199,25	196,15	-
	FEB	153,75	192,17	157,77	191,81	183,13	189,29	-
	MAR	142,12	187,29	142,49	182,54	148,69	171,23	193,27
	ABR	185,59	216,39	182,48	219,04	194,28	200,91	241,93
	MAY	169,99	198,57	171,00	199,89	179,13	194,90	209,39
	JUN	183,50	207,31	192,68	209,95	189,18	197,38	215,91
	JUL	226,22	247,90	235,74	239,50	225,82	232,95	229,33
	AGO	215,38	221,05	212,37	222,61	218,02	220,82	243,02
	SEP	219,59	245,35	226,72	241,56	225,57	224,83	250,64
	OCT	203,63	232,94	199,51	231,99	213,81	218,25	247,25
	NOV	195,16	236,55	197,64	237,32	216,26	216,61	247,86
	DIC	196,29	228,89	199,04	229,01	212,84	217,07	240,50

Fuente: (Secretaría del Ambiente, 2018)

Las variables meteorológicas seleccionadas para este análisis fueron tomadas de la base de la Secretaría del Ambiente, sin embargo, al observarse valores inconsistentes de precipitación se recurre como apoyo a las bases del INAMHI para determinar los meses donde hubiese registro de picos que indiquen épocas marcadas de lluvia y estiaje, esta información se indica en las figuras 10 y 11; y contienen datos de tres estaciones: La Tola, Izobamba e Iñaquito. En ambos años se denota altos niveles de lluvia entre los meses de enero a mayo incluidos octubre y diciembre, mientras que por otro lado estos disminuyen notablemente entre los meses de julio y septiembre.

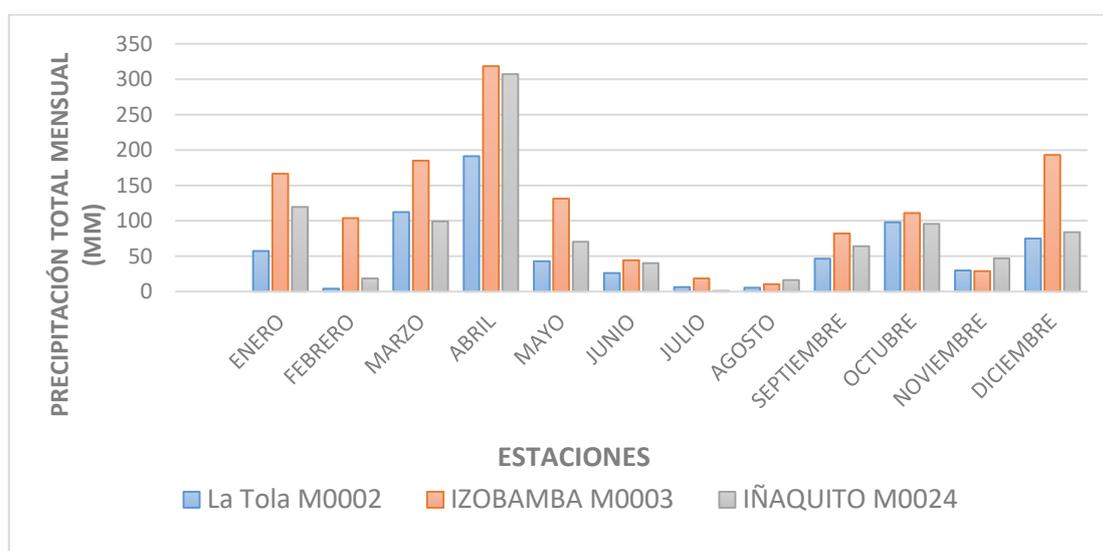


Figura 10. Precipitación media mensual, 2016

Fuente: (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMHI, 2018)

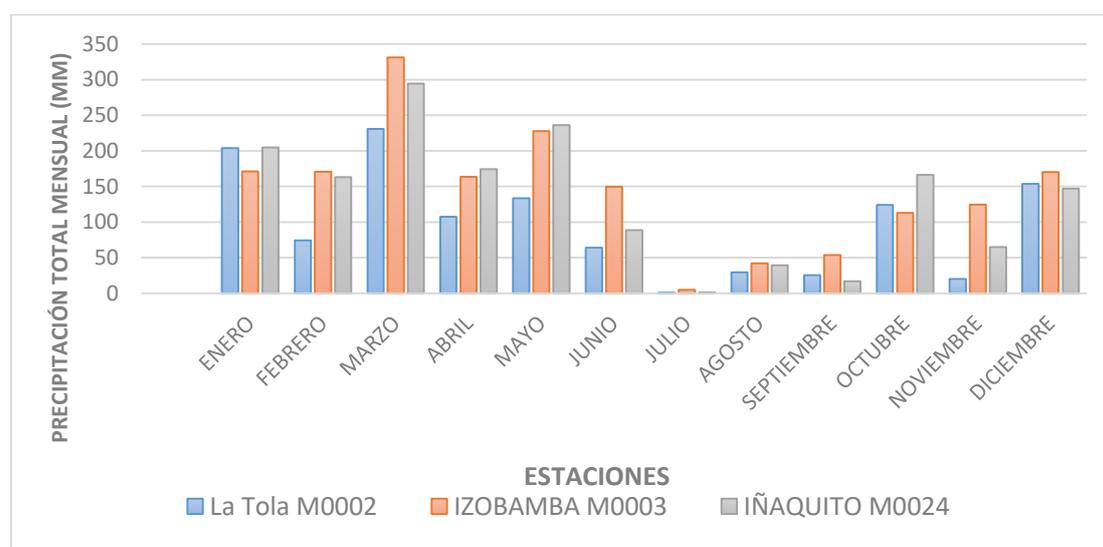


Figura 11. Precipitación media mensual, 2017

Fuente: (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMHI, 2018)

Posteriormente se realizaron gráficos de validación para mostrar el comportamiento de las variables a lo largo de los meses en cada año, dentro de las gráficas que se generaron se utilizaron los siguientes límites (Montgomery, 2001):

- Límites de control (3 sigma)
- Límites de advertencia (2 sigma)

Una vez obtenidos un total de 12 valores anuales para cada variable por estación, a todas estas mediciones se las colocó dentro de diagramas de dispersión teniendo en cuenta que, al calcular la media aritmética para cada variable, todas sus observaciones deberían seguir una distribución similar. Para monitorear dicho comportamiento se grafican dos límites de control ($\bar{x} \pm 3\sigma$) y dos límites de advertencia ($\bar{x} \pm 2\sigma$), dentro de los cuales debían ubicarse todos los puntos correspondientes a las mediciones (Toscana, Moretto, & Villareal, 2009). Para verificar su calidad se observó la distancia a la que cada una se encontraba del valor medio y de los citados límites, facilitando así el reconocimiento de la presencia de errores, haciendo uso de las siguientes reglas según Ruiz (2006):

- Si uno de los puntos se encuentra fuera del rango de los límites de control, la variable se encuentra fuera de control.
- Si de tres puntos consecutivos, al menos dos se encuentran fuera del rango de los límites de advertencia y del mismo lado de la media.
- Si al menos ocho puntos consecutivos se encuentran del mismo lado de la media.
- Si nueve puntos son consecutivos y al menos siete crecen monótonamente.

3.3.2 Imágenes satelitales

Las imágenes de la misión Sentinel-2 fueron obtenidas y seleccionadas de la página del Centro de acceso abierto de Copernicus (Copernicus Open Access Hub) en base a su disponibilidad y niveles de nubosidad en las épocas establecidas para este estudio, se seleccionó una imagen satelital Sentinel 2B y tres imágenes 2A ya que ambos sensores brindan el mismo nivel de procesamiento 1C, lo que significa que contienen datos radiométricos y geoméricamente corregidos (Martínez M. , 2018). Para la época de lluvia se

trabajó con las imágenes tomadas el 18 de diciembre del 2016 y el 13 de diciembre del 2017; en cambio al analizar la época de estiaje se trabajó con las imágenes tomadas el 29 de septiembre del 2016 y el 19 de septiembre del 2017, adoptando a estos meses finalmente como las épocas referenciales de inicio para los siguientes pasos en la metodología (ver figura 9).

Para la corrección y tratamiento de las imágenes se hace uso del software libre Sentinels Application Platform, mayormente conocido como SNAP. Este software tiene la ventaja de contar con la herramienta Sen2Cor ubicada dentro de “Thematic Land Processing” en el menú “Optical” (ver figura 12), la cual es sumamente eficaz ya que realiza dos correcciones de forma paralela: corrección atmosférica, la cual se basa en la utilización de radiancia y reflectividad para pasar de un nivel de superficie TOA (parte superior de la atmósfera) a BOA (parte inferior de la atmósfera) (L'Ecuyer, Wood, Haladay, Stephens, & Stackhouse Jr, 2008); y corrección topográfica a partir de la utilización de un modelo digital de elevaciones SRTM de 90 metros. Una vez corregidas las imágenes se procedió a realizar el cálculo de los índices radiométricos.

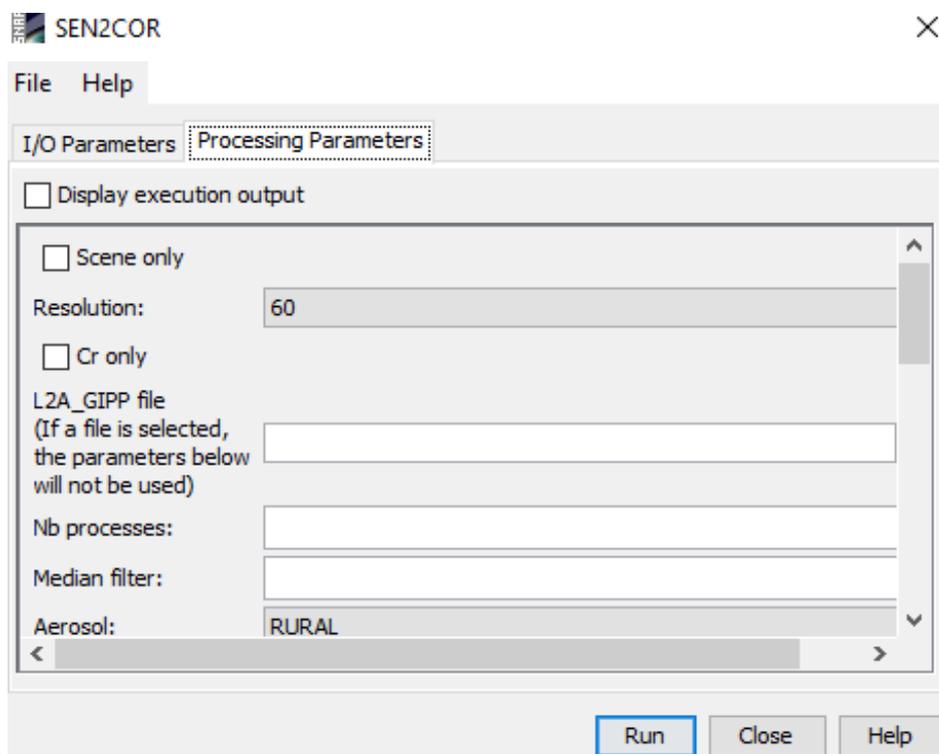


Figura 12. Herramienta Sen2Cor

3.4 Cálculo de los índices meteorológicos

Debido a la baja densidad de puntos, para el cálculo de los índices de calidad atmosféricos se llega a la decisión de aplicar una interpolación por vecinos naturales con el fin de generar capas raster que presenten superficies continuas donde a cada pixel le fuese asignado un valor propio. Para esto fue necesaria la ayuda de la herramienta “Natural Neighbor” del software ArcGIS 9.3 (ver figura 13) que asigna automáticamente un tamaño de celda de 46,425 m, el cual se mantuvo con el fin de evitar errores en la generación de los modelos de interpolación.

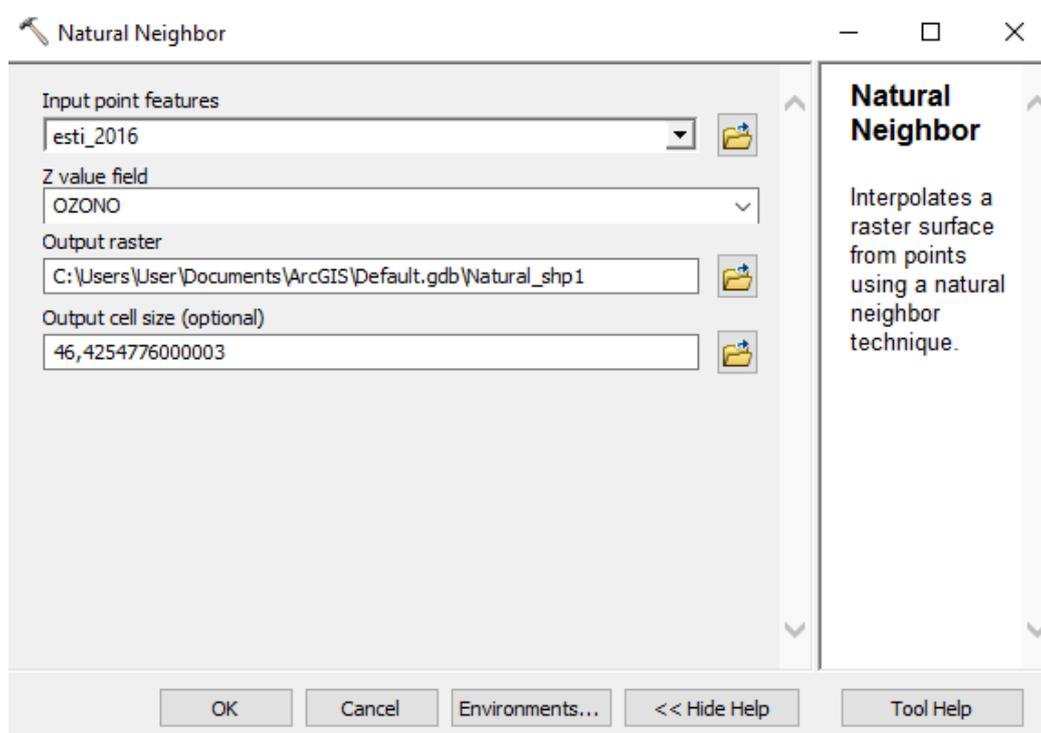


Figura 13. Herramienta Natural Neighbor

Una vez obtenidos todos los modelos de interpolación se procede a la normalización estadística de escalado de variables con la fórmula 5, ya que de esta manera se obtienen modelos de interpolación con valores que van de 0 a 1 al igual que los índices radiométricos facilitando así el cálculo de componentes principales (Márquez, 1999).

$$V_i = \frac{V_o - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} * (0,1) \quad (5)$$

Donde:

V_i = Valor normalizado.

V_o = Valor original.

V_{min} = Valor máximo.

V_{max} = Valor mínimo.

3.5 Cálculo de los índices radiométricos

En el cálculo de los índices radiométricos se utilizaron las bandas del rojo (B4), infrarrojo cercano (B8) e infrarrojo de onda corta (B11) de las imágenes satelitales Sentinel 2 para ambas fechas de estudio de los años 2016 y 2017. Esto se lo realizó a partir de los algoritmos correspondientes a cada índice, los cuales fueron mencionados previamente en las fórmulas (1), (2), (3) y (4) del capítulo II.

3.5.1 índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)

Una vez realizada la corrección de las imágenes el mismo software SNAP permite realizar el cálculo de una larga lista de índices de vegetación entre los cuales se encuentra el índice diferencial de vegetación NDVI, mismo que se encuentra en la opción “Thematic Land Processing” del menú “Optical” y una vez cargada la imagen corregida en la pestaña “I/O parameters” se seleccionaron las bandas RED y NIR respectivamente como se observa en la figura 14.

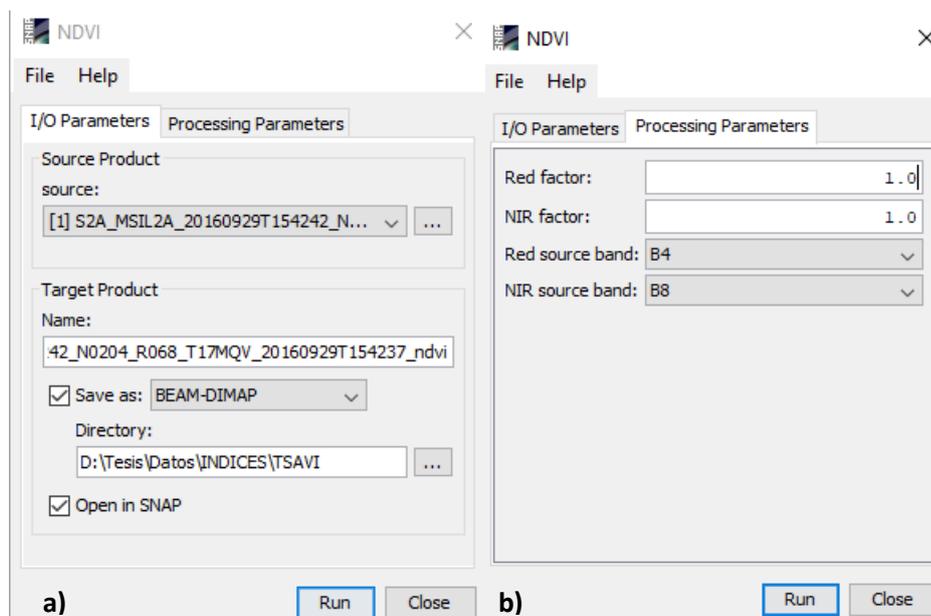


Figura 14. Herramienta NDVI a) I/O Parameters, b) Processing Parameters

3.5.2 Índice de suelos normalizados (NSI)

El cálculo del índice de suelos normalizados se lo realizó en el software ArcGIS 9.3, mediante la herramienta “Raster Calculator” (ver figura 15). Esta herramienta permite la manipulación de capas raster a través de expresiones algebraicas, gracias a esta característica se logró aplicar el algoritmo correspondiente a la fórmula (2) cargando como capas las bandas NIR (infrarrojo cercano) y SWIR (infrarrojo de onda corta) en el entorno de ArcGIS.

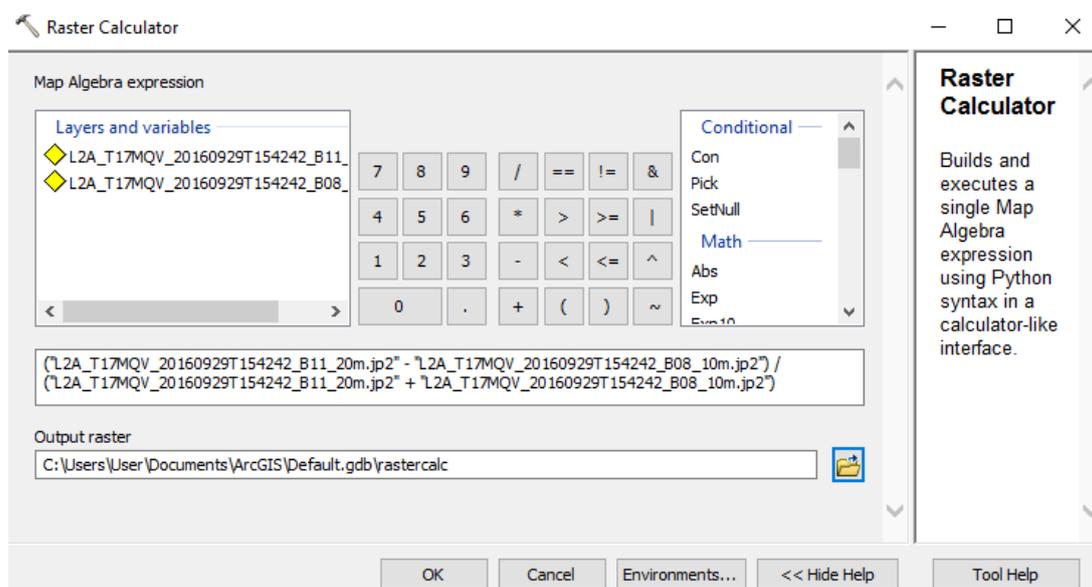


Figura 15. Cálculo del índice NSI con la herramienta Raster Calculator

3.5.3 Índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI)

Dentro del entorno de SNAP se hallan diversas herramientas que permiten la obtención de índices radiométricos, entre los disponibles se encuentra el índice de vegetación ajustado al suelo transformado TSAVI localizado en la opción “Thematic Land Processing” del menú “Optical” y su cálculo se basa en la fórmula (3); una vez cargada la imagen corregida en la pestaña “I/O parameters” se seleccionaron las bandas RED y NIR de las cuatro imágenes respectivamente como se observa en la figura 16.

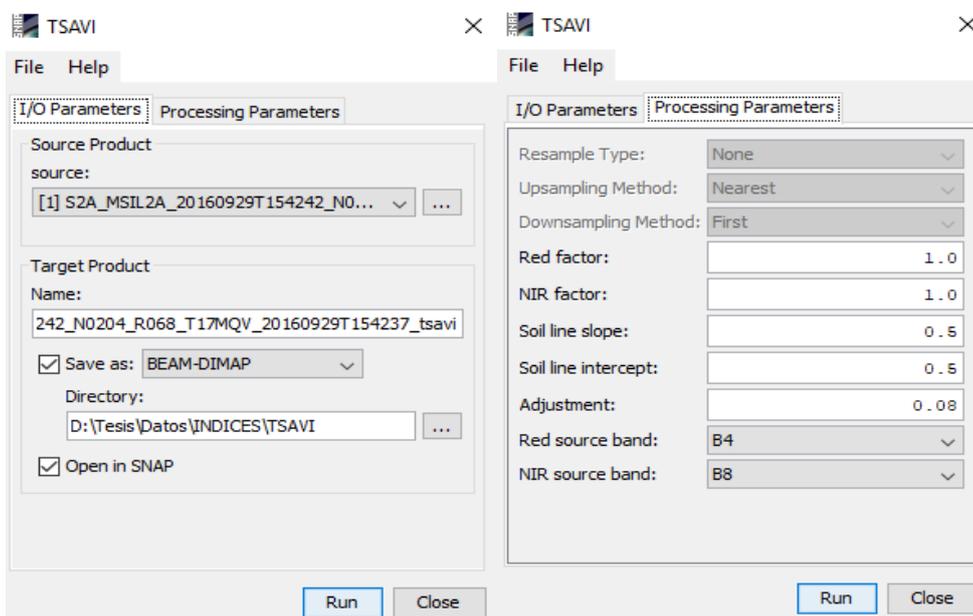


Figura 16. Herramienta TSAVI a) I/O Parameters, b) Processing Parameters

3.5.2 Índice de humedad en las hojas (LWCI)

Para el cálculo de este último índice se utiliza de igual manera la herramienta “Raster Calculator” en ArcGIS por medio de la fórmula (4). Sin embargo, previo a la obtención del índice LWCI fue necesario realizar un análisis individual de las cuatro imágenes con el fin de obtener los valores NIR_{FT} y $SWIR_{FT}$ para las zonas de vegetación con mayor humedad (Sánchez L. , 2017).

Para esto se partió de las capas raster NDVI (Índice diferencial de vegetación normalizado) obtenidas anteriormente, con el propósito de discernir la vegetación de otros elementos que también pudiesen presentar niveles altos de reflectividad como pueden ser las vías o inclusive zonas con mucha nubosidad. Una vez obtenida la zona de estudio para cada capa raster se realizó una reclasificación de la vegetación con valores de NDVI mayores a 0,7 a través de la herramienta “Reclassify” (ver figura 17).

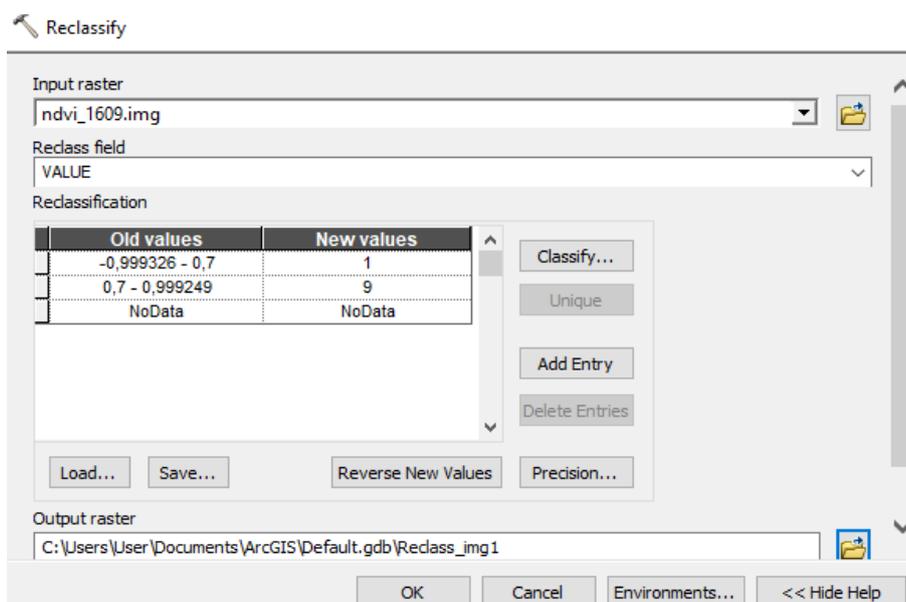


Figura 17. Herramienta Reclassify

Posteriormente se transformaron las capas raster resultantes a formato polígono con la herramienta “Raster to Polygon” (ver figura 18) y sobre el área extraída se realizó un análisis para obtener el mayor nivel digital de las bandas NIR y SWIR en dichas zonas. Finalmente se dividieron estos valores para el máximo nivel digital que en este caso al tratarse de imágenes de 16 bits fue de 65535.

3.6 Análisis por componentes principales

Con las capas raster que fueron obtenidas para los índices de cada fecha, se aplicó la prueba KMO (Kaiser Meyer Olkin) también conocida como la medida de adecuación muestral, utilizada para valorar si las variables objeto de estudio son apropiadas para el análisis factorial (Williams, Onsmann, & Brown, 2010). Los resultados de esta prueba arrojan valores en un rango de cero a uno donde según Sánchez (2017) valores cercanos a 1 brindaran resultados excelentes, o en detrimento valores por debajo del 0,5 o próximos a cero no mostrarán resultados relevantes tras el análisis de componentes principales.

Una vez realizado el test y habiendo seleccionado las capas más representativas para la aplicación de esta metodología se procede a normalizar las variables según la fórmula (5) para que de esta manera los índices mantuviesen una escala similar y pudiesen ser ingresados como componentes que proporcionaran información con un comportamiento

similar para el análisis de la calidad ambiental (López & Estañol, 2007); utilizando una vez más la herramienta “Raster Calculator” del software ArcGIS.

Para el cálculo de los componentes principales se hace uso de la herramienta “Principal Components” (ver figura 18) la cual se basa en el cálculo de la matriz de varianza-covarianza y de los valores y vectores eigen (auto valor) para la creación de los nuevos ejes análogos a cada componente (Esri, 2006). Se culmina esta operación con el análisis de la varianza capturada por cada uno de los componentes para proceder con extracción de aquellos que presentaron valores eigen cercanos o mayores a 1 (Santana, Escobar, & Capote, 2010).

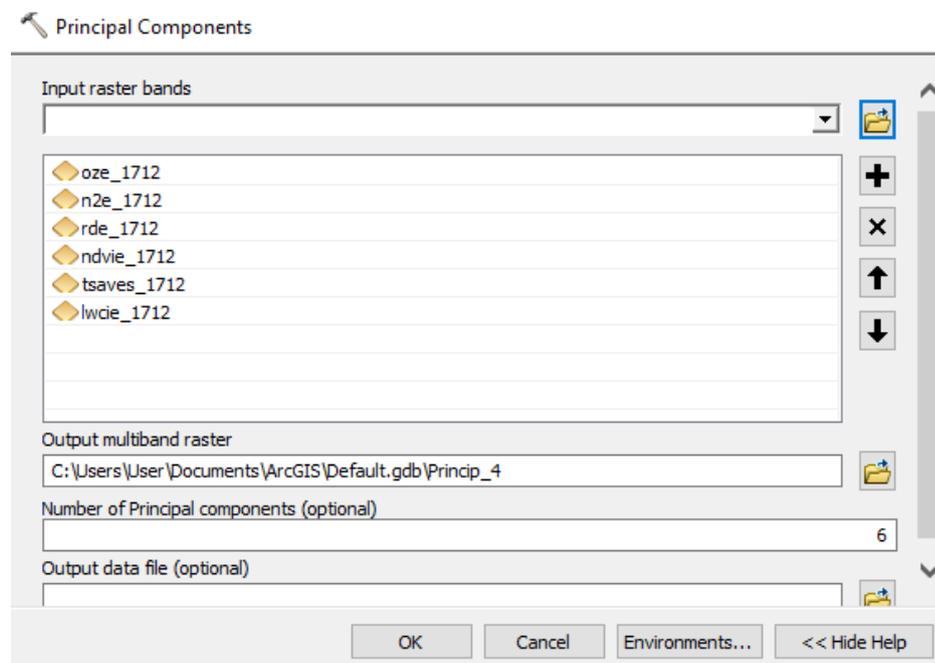


Figura 18. Herramienta Principal Components

3.7 Prueba de hipótesis ANOVA

La prueba estadística ANOVA es aplicada con el fin de destacar la existencia o ausencia de relación entre los cuatro índices de calidad ambiental generados, para lo cual se parte del planteamiento de una hipótesis nula (H_0) y una alternativa (H_a) y el resultado dependerá de la aceptación o rechazo de ellas (Rubio & Berlanga, 2007); siendo las hipótesis que se plantearon para este análisis las siguientes:

Ho: No existen diferencias significativas entre los índices de calidad ambiental urbana generados para las diferentes épocas de estudio.

Ha: Si existen diferencias significativas entre los índices de calidad ambiental urbana generados para las diferentes épocas de estudio.

Una vez aplicada la prueba estadística sus resultados fueron evaluados a un nivel de significancia de $\alpha=5$ (95% de confianza), esta confiabilidad de los resultados arrojados por la prueba se determina a través del “p-valor” cuya regla de decisión según Benavides & Bonilla (2001) viene dada por:

$$\begin{cases} H_o = p > 0.05 \\ H_a = p \leq 0.05 \end{cases}$$

Se debe tomar en cuenta que el p-valor dependerá tanto de la diferencia que se intenta probar como del tamaño de muestra de las variables independientes (Manterola & Pineda, 2008).

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se despliegan los resultados de la metodología expuesta en el capítulo anterior para la elaboración de un índice de calidad ambiental urbano. Lo cual implicó el estudio de variables meteorológicas y radiométricas, y su validación tanto en representatividad como en continuidad para garantizar el resultado de la factorización realizada posteriormente y concluyendo con un análisis estadístico de los resultados que garantizan su factibilidad.

4.1 Caracterización de las variables

La disponibilidad y continuidad de los datos proporcionados por la REMMAQ y el INAMHI fueron determinantes al momento de seleccionar las variables que entrarían dentro de este análisis, además de su caracterización mediante recopilación bibliográfica la cual se encuentra en el anexo 1. En la tabla 1 se pueden observar los límites permisibles para las concentraciones de ozono (O_3) y de dióxido de nitrógeno (NO_2) establecidos por el Ministerio del Ambiente (2015) en el índice quiteño de calidad del aire (ICAQ) con los cuales se compararon los resultados mostrados posteriormente.

4.2 Información meteorológica

Obtenida la información meteorológica se seleccionaron por su ubicación las siete estaciones que se encuentran dentro del área de estudio, estas se observan a continuación en la tabla 6. Una vez extraídos los datos proporcionados por ellas se procede a realizar el control estadístico de validación en busca de datos atípicos para llevar un control de su variabilidad y que la misma se mantenga dentro de límites que permitan aumentar el conocimiento de su comportamiento (Ruiz, 2006).

Tabla 6.
Ubicación de las estaciones de monitoreo utilizadas

	ESTACIONES	ESTE	NORTE
1	COTOCOLLAO	778585,22	9988075,87
2	CARAPUNGO	784154,50	9989120,34
3	BELISARIO	779388,77	9980085,36
4	EL CAMAL	777159,88	9972341,20
5	CENTRO	777160,47	9975660,25
6	GUAMANI	772548,13	9963399,33
7	LOS CHILLOS	782727,80	9966808,15
8	TUMBACO	789412,99	9976764,61

Fuente: (Secretaría del Ambiente, 2018)

Para el análisis de las mediciones de Ozono (O_3) se toma como referencia los valores obtenidos de la estación Guamaní ubicada al sur de la ciudad, los cuales mantienen una misma tendencia según el valor promedio de $28,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mensuales a lo largo del año 2016. Estos valores se encuentran dentro de los límites de advertencia con una única excepción en el pico que se puede observar dentro de la figura 19 para el mes de octubre con una concentración de $38,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$; pero al tratarse de un solo punto que a su vez se halla bajo el límite de control superior ($42,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$) según Ruiz (2006) esta variable no incumple con ninguna regla por lo cual se afirma que encuentra bajo control.

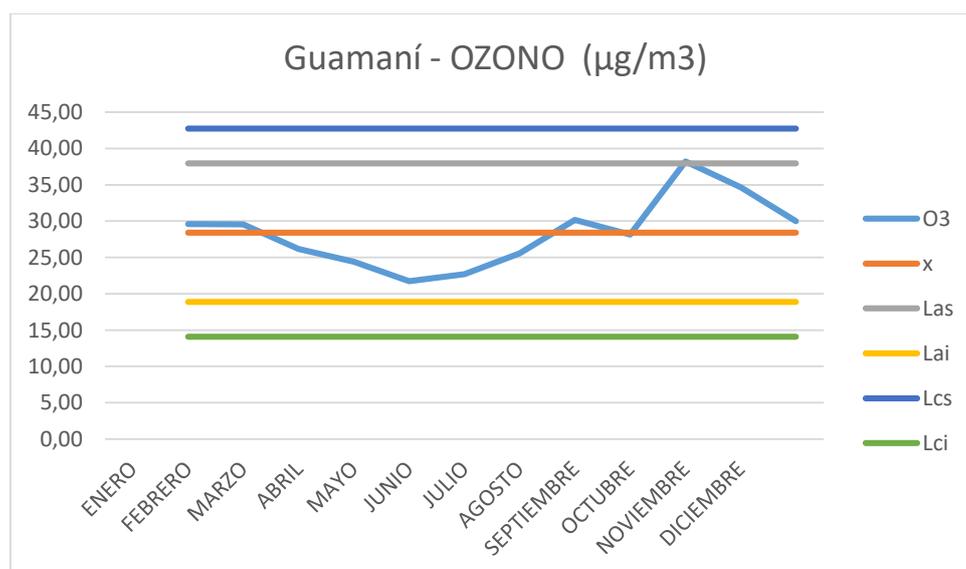


Figura 19. Límites de control, ozono 2016

Fuente: (Red Metropolitana de Monitoreo de Aire de Quito - REMMAQ, 2014)

De igual manera en 2017 se presenta la misma tendencia de valores bajos de ozono en los primeros meses del año con un notable aumento a partir del mes de julio y una clara disminución dentro de los meses de noviembre y diciembre como se visualiza en la figura 20. Sin embargo, a pesar de que hay meses en los cuales las concentraciones son claramente menores que en otros su evolución mantiene una equidistancia distancia regular con respecto a la media de $27,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, encontrándose dentro de los límites de control y manteniéndose con un único pico de $46,71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de septiembre sobre el límite de advertencia superior ($44,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que según la figura 10 corresponde a las épocas de estiaje y esto podría interpretarse como la causa de dicha anomalía en las mediciones debido a que según Bravo, Nava & Muhlia (2000), este es un factor de gran influencia para la presencia de altos niveles de ozono en la atmósfera.

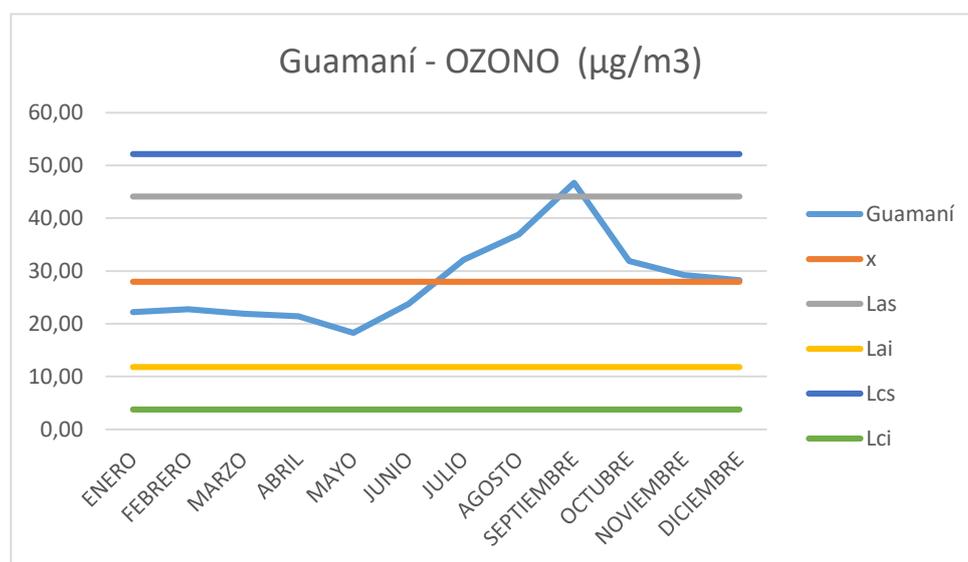


Figura 20. Límites de control, ozono 2017

Fuente: (Red Metropolitana de Monitoreo de Aire de Quito - REMMAQ, 2014)

Las mediciones de dióxido de nitrógeno (NO_2) del año 2016 por otro lado no presentan mayor variabilidad en la figura 21 ya que ninguno de los valores alcanza ni siquiera los límites de advertencia [$15,72$; $28,17$] $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y a su vez todos estos se encuentran ubicados dentro de los límites de control [$12,61$; $31,29$] $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Es importante recalcar que una vez más el comportamiento de esta variable es coherente con las cantidades de precipitación mensuales expuestas en la figura 9, lo que según Alvarez (2012) origina una causa asignable para el comportamiento de dicha variable y esto a su vez es síntoma de una calidad aceptable.

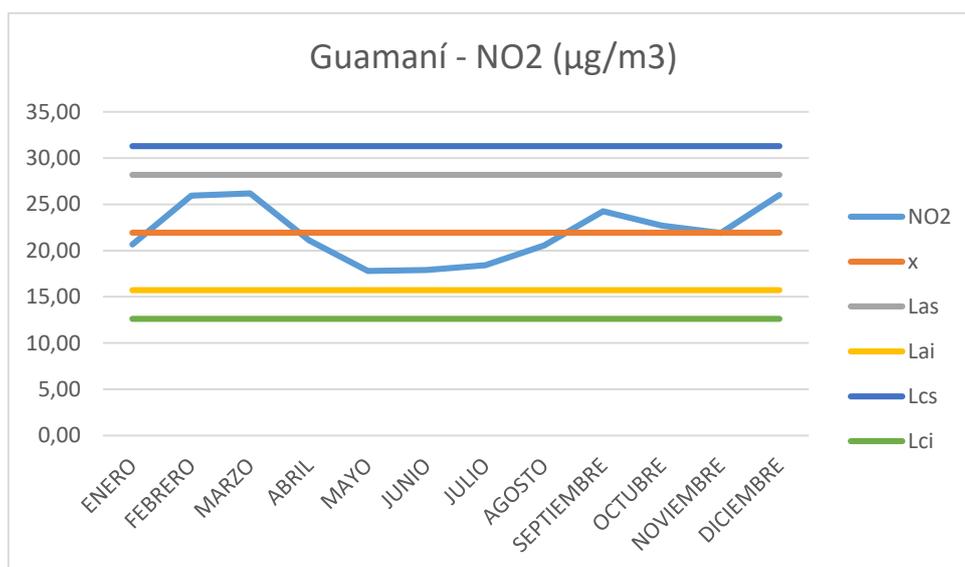


Figura 21. Límites de control, dióxido de nitrógeno 2016

Fuente: (Red Metropolitana de Monitoreo de Aire de Quito - REMMAQ, 2014)

Durante ambos años en 2016 y 2017 los valores de dióxido de nitrógeno actúan de forma similar como se observa en la figura 22, a diferencia del mes de julio durante el cual se evidencian valores bajos de concentración ($11,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$) es que sobrepasan el límite inferior de advertencia de $13,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, de acuerdo a Alvarez (2012), al encontrarse estos valores anómalos dentro del rango de control la variable sigue siendo aceptable, ya que esto puede deberse a una causa no asignable cuyo efecto se reconoce como despreciable.

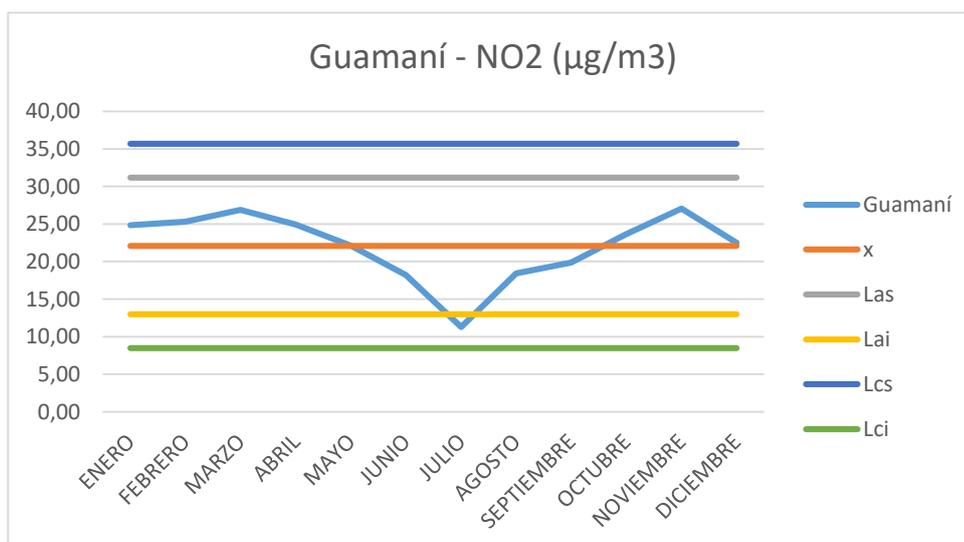


Figura 22. Límites de control, dióxido de nitrógeno 2017

Fuente: (Red Metropolitana de Monitoreo de Aire de Quito - REMMAQ, 2014)

Las estaciones de la REMMAQ no realizaron mediciones durante los primeros meses del año 2016 razón por la cual apenas se pudo realizar un análisis de los valores obtenidos desde el mes de agosto como indica la figura 23; no obstante, este problema no se presentó en el año 2017 y al comparar ambas gráficas se puede corroborar que los valores de radiación solar oscilan muy cerca del valor medio mensual ($224,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) lo que según Burgos & Copo (2016) las convierte en válidas para ser utilizadas como variables de estudio.

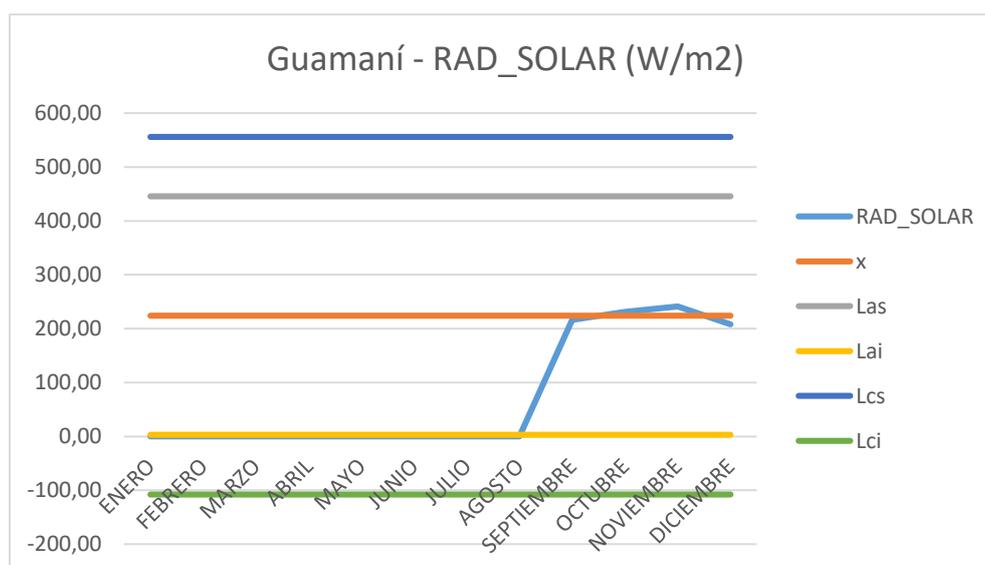


Figura 23. Límites de control, radiación solar 2016

Fuente: (Red Metropolitana de Monitoreo de Aire de Quito - REMMAQ, 2014)

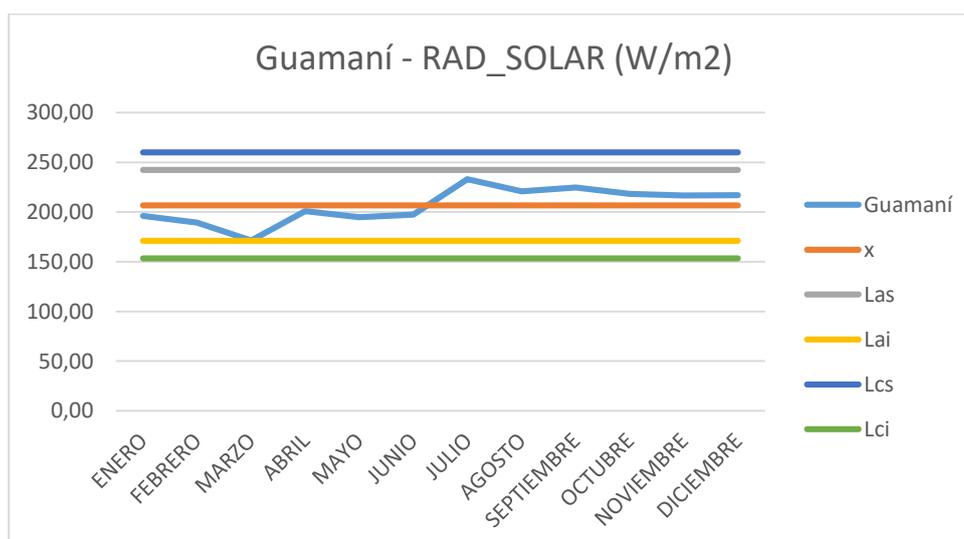


Figura 24. Límites de control, radiación solar 2017

Fuente: (Red Metropolitana de Monitoreo de Aire de Quito - REMMAQ, 2014)

4.3 Cálculo de los índices de calidad atmosférica

Con el fin de realizar un análisis visual dentro del área de estudio se generaron mapas comparativos para las diferentes épocas. En la figura 25 se puede observar que las concentraciones más altas de O₃ se dan en las épocas de estiaje de ambos años con valores que según la Secretaría del ambiente (2016) en su índice quiteño de la calidad aire se encuentran en un nivel deseable cercano a aceptable. Sin embargo, en 3 de las 4 épocas se aprecia que a partir de la zona del Centro Histórico empieza a mejorar con una evidente disminución en la zona central donde se ubica el parque de La Carolina.

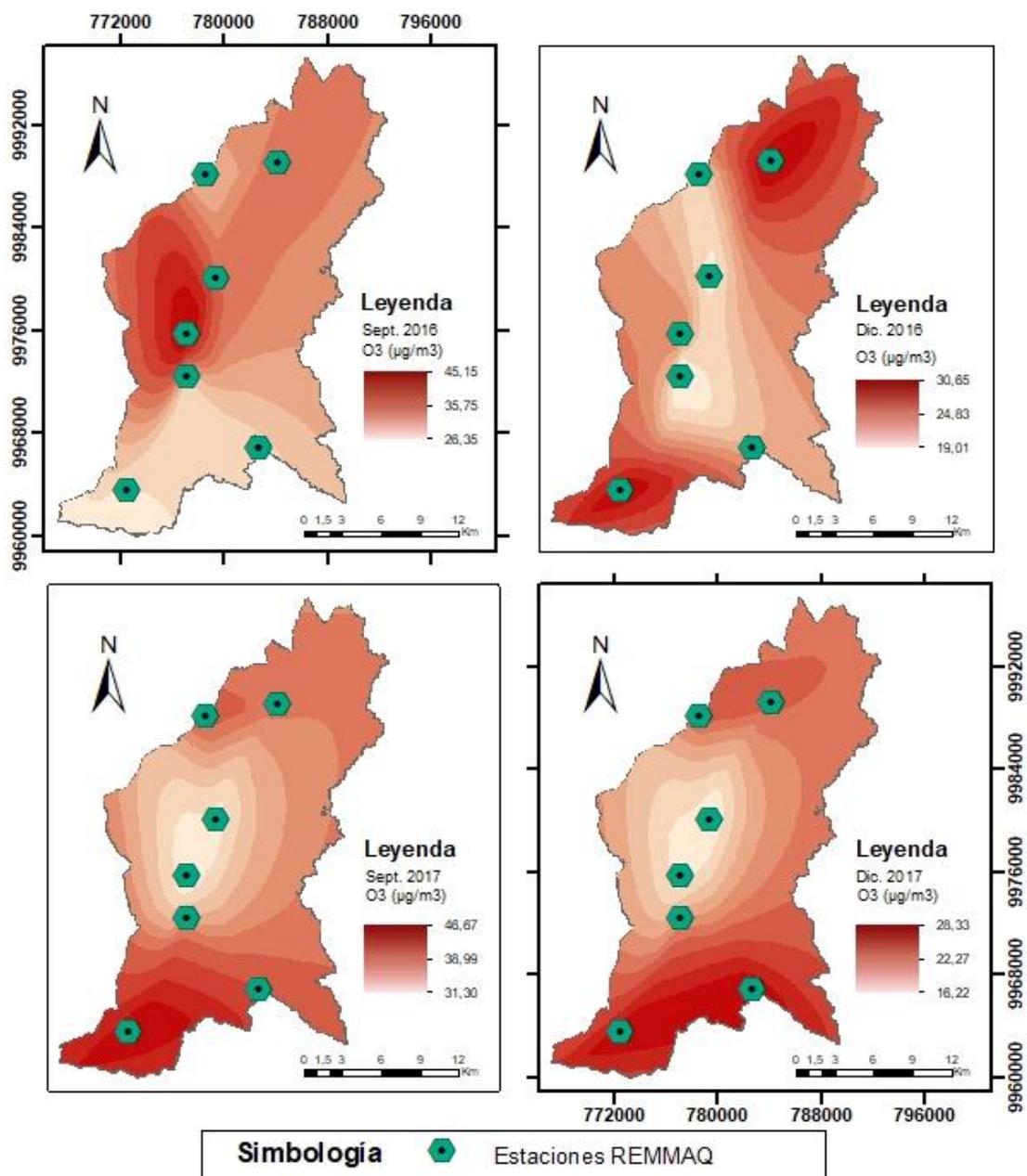


Figura 25. Comparación de O₃ para las distintas épocas de estudio

Con respecto al dióxido de nitrógeno los valores más altos que se registran llegan a $37,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$, concentrándose sobre todo en la zona de Conocoto durante la época lluviosa de 2017 a diferencia de las otras temporalidades en las cuales esta zona presenta los valores más bajos de concentración. A pesar de esta particularidad, alrededor de las estaciones cercanas al Centro Histórico, las cuatro épocas mantienen en común valores de entre 20 y $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, producto de la generación de contaminantes primarios cuya fuente principal en dichas zonas es el tráfico vehicular (Sánchez L. , 2017).

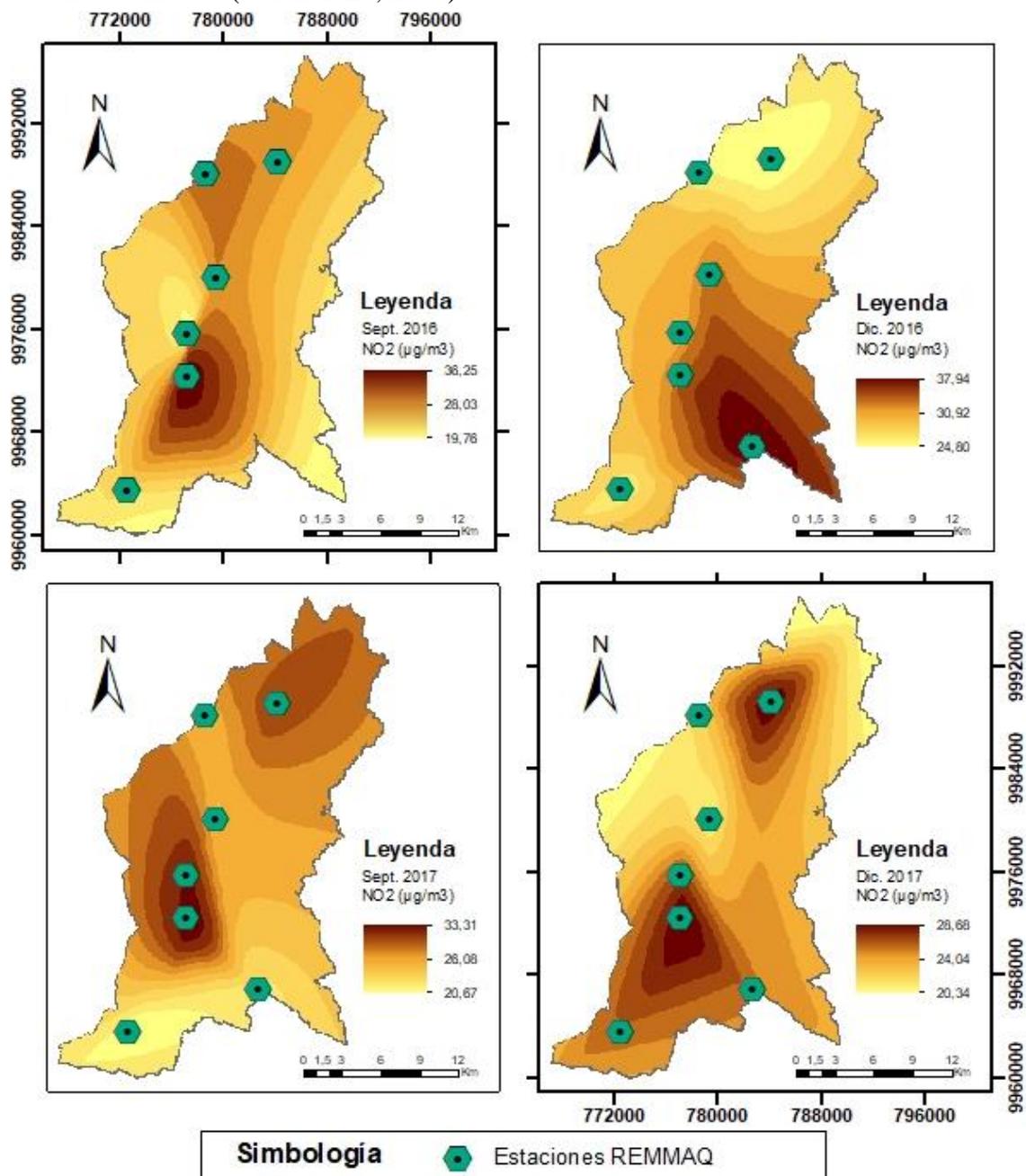


Figura 26. Comparación de NO₂ para las distintas épocas de estudio

Por otro lado, los niveles de radiación solar son semejantes en los alrededores de la estación Belisario que se encuentra cerca de las faldas del volcán Rucu Pichincha, en la zona oeste de la ciudad, con valores mínimos de $105,15 \text{ W/m}^2$ y máximos de hasta $250,12 \text{ W/m}^2$ en los sectores de Cumbayá y Conocoto que son las zonas de menor altitud, estos valores concuerdan con los expuestos por el CONELEC (2008) en su Atlas solar del Ecuador.

Cabe recalcar que la interpolación realizada para la generación de estos mapas se la realizó con la información obtenida de las estaciones de monitoreo de la REMMAQ, en consecuencia, los valores fuera del área que estas encierran se alejan de la realidad.

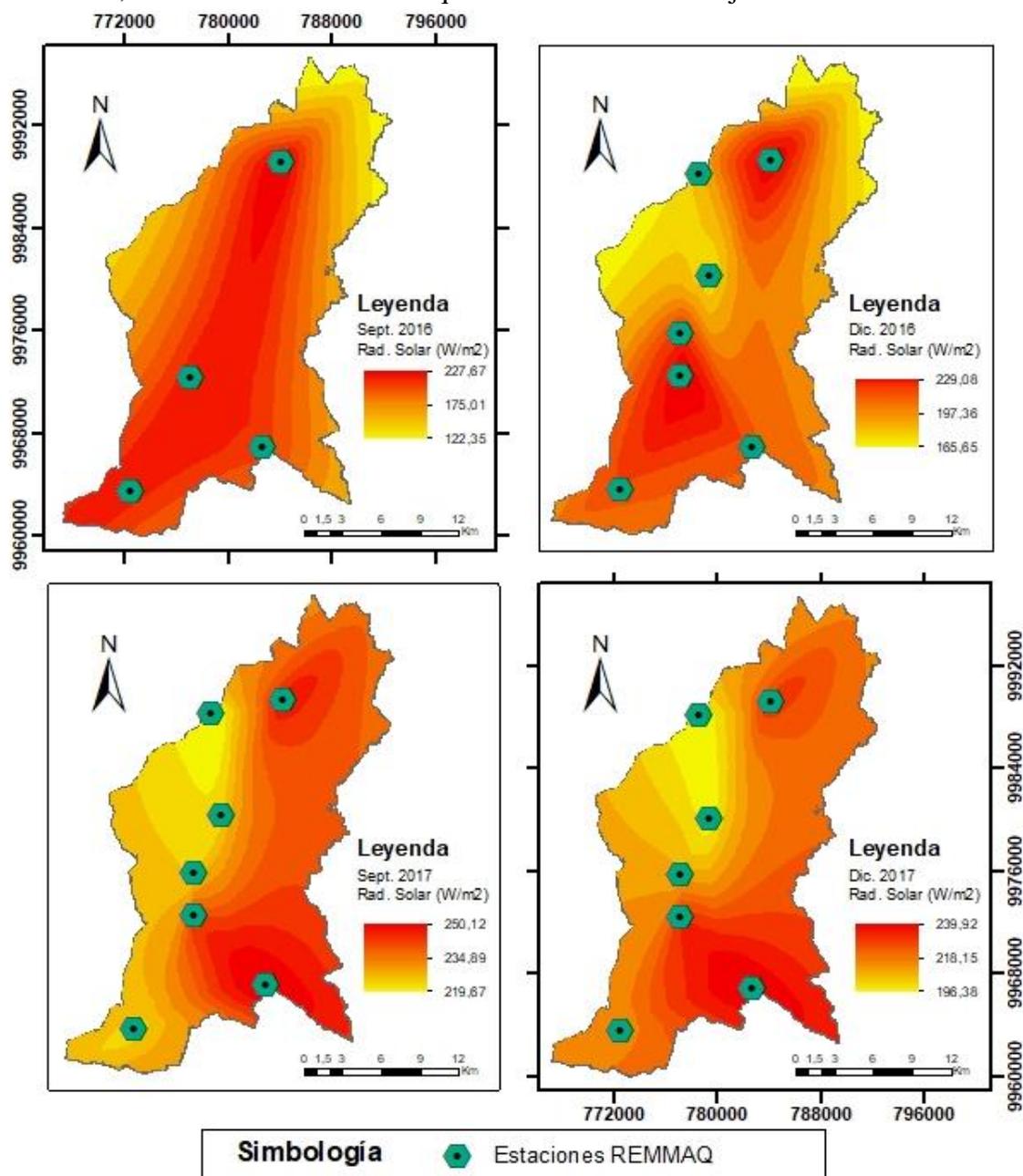


Figura 27. Comparación de radiación solar para las distintas épocas de estudio

4.4 Cálculo de los índices radiométricos

Como complemento a los índices meteorológicos se adicionó información generada por la respuesta espectral de las imágenes satelitales, de las cuales se derivó el cálculo de cuatro índices radiométricos que se muestran a continuación. Debido a que el objeto de estudio fue la zona urbana del DMQ, dentro de la figura 28 se aprecia mayor área de suelo desnudo y vegetación rala con valores del índice NDVI menores a 0,5 destacándose valores mayores a 0,7 en las épocas de lluvia cerca de lugares con mayor extensión de área verde en la ciudad tal como lo exponen Carlson & Ripley (1997).

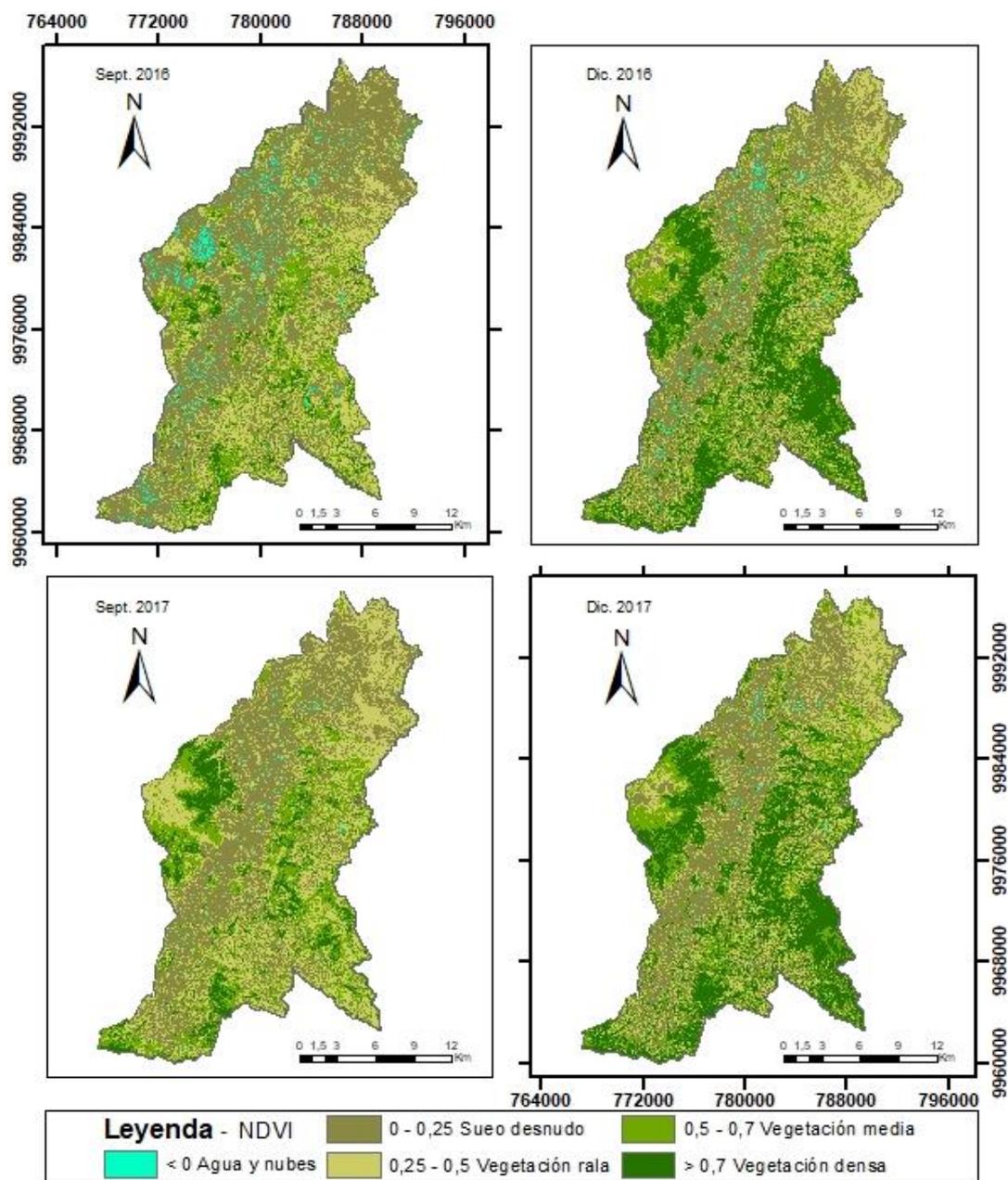


Figura 28. Comparación de NDVI para las distintas épocas de estudio

Tras el cálculo del índice NSI se pudo discernir la proporción de superficie verde y suelo desnudo de la superficie construida tal como lo proponen Santana, Escobar & Capote (2010), con valores mayores a cero para este último (ver figura 29). A pesar de tratarse de una zona urbana se aprecia que existe una proporción representativa de áreas verdes en la periferia del polígono, así como dentro del mismo; los parques La Carolina y Metropolitano forman parte de esta flora urbana, además de ser considerados como pulmones de la ciudad y gracias a su estado fenológico se pudo apreciar la diferencia entre épocas para posteriormente comprender cómo su presencia afecta a la calidad ambiental urbana.

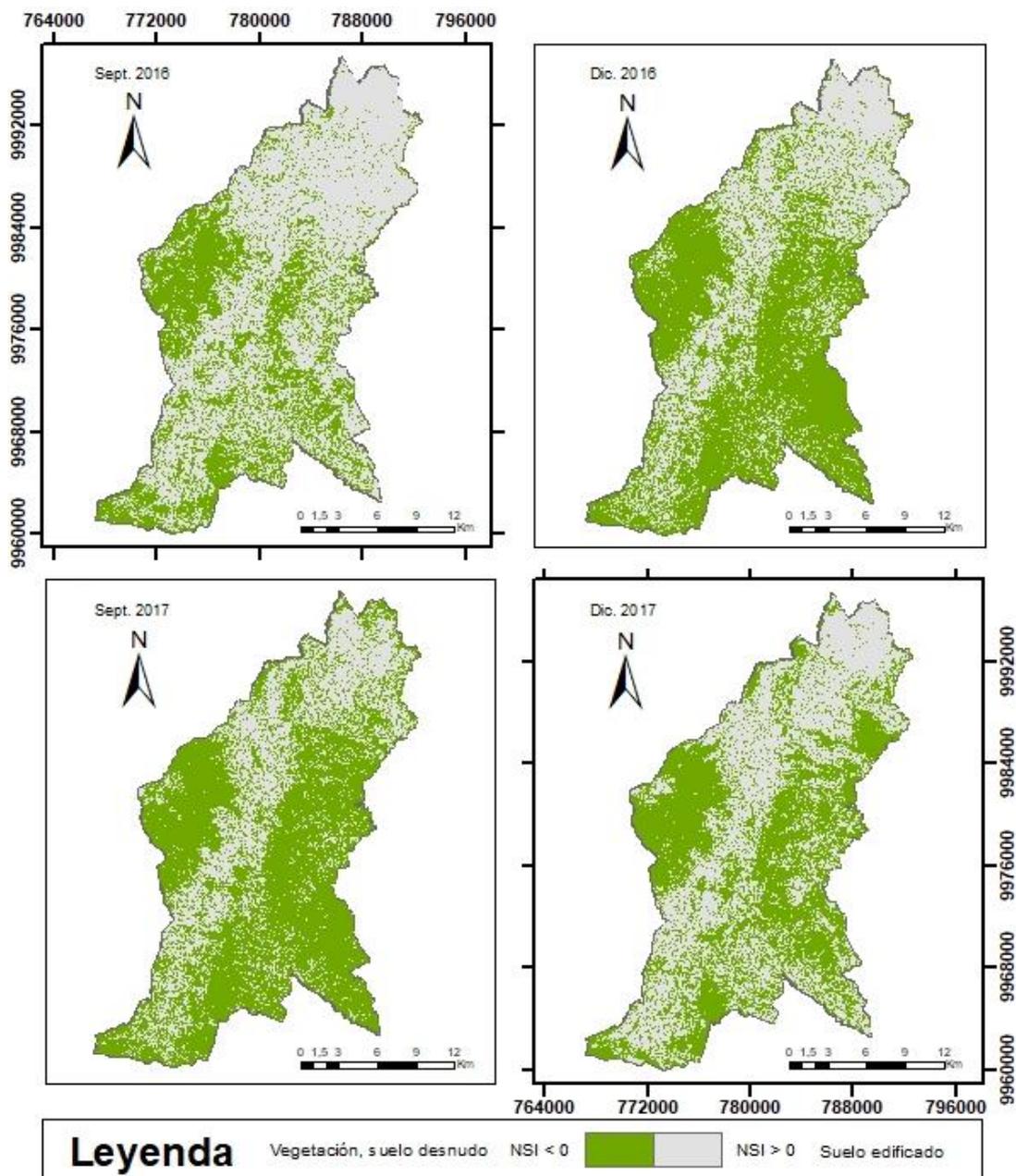


Figura 29. Comparación de NSI para las distintas épocas de estudio

Gracias a la información que brinda el índice TSAVI en la figura 30, se denota claramente la diferencia entre la proporción de suelo desnudo y la vegetación de mayor vigor misma que se halla cercana a los ríos en la zona este del polígono con valores mayores a cero (Sánchez L. , 2017). Sin embargo, la diferencia entre las épocas de lluvia (septiembre) y estiaje (diciembre) apenas es sustancial; estos valores encajan con la comparación temporal del índice TSAVI realizada por Rodríguez & Bullock (2013) donde registraron un débil crecimiento de dicho índice en un año con altos niveles de precipitación

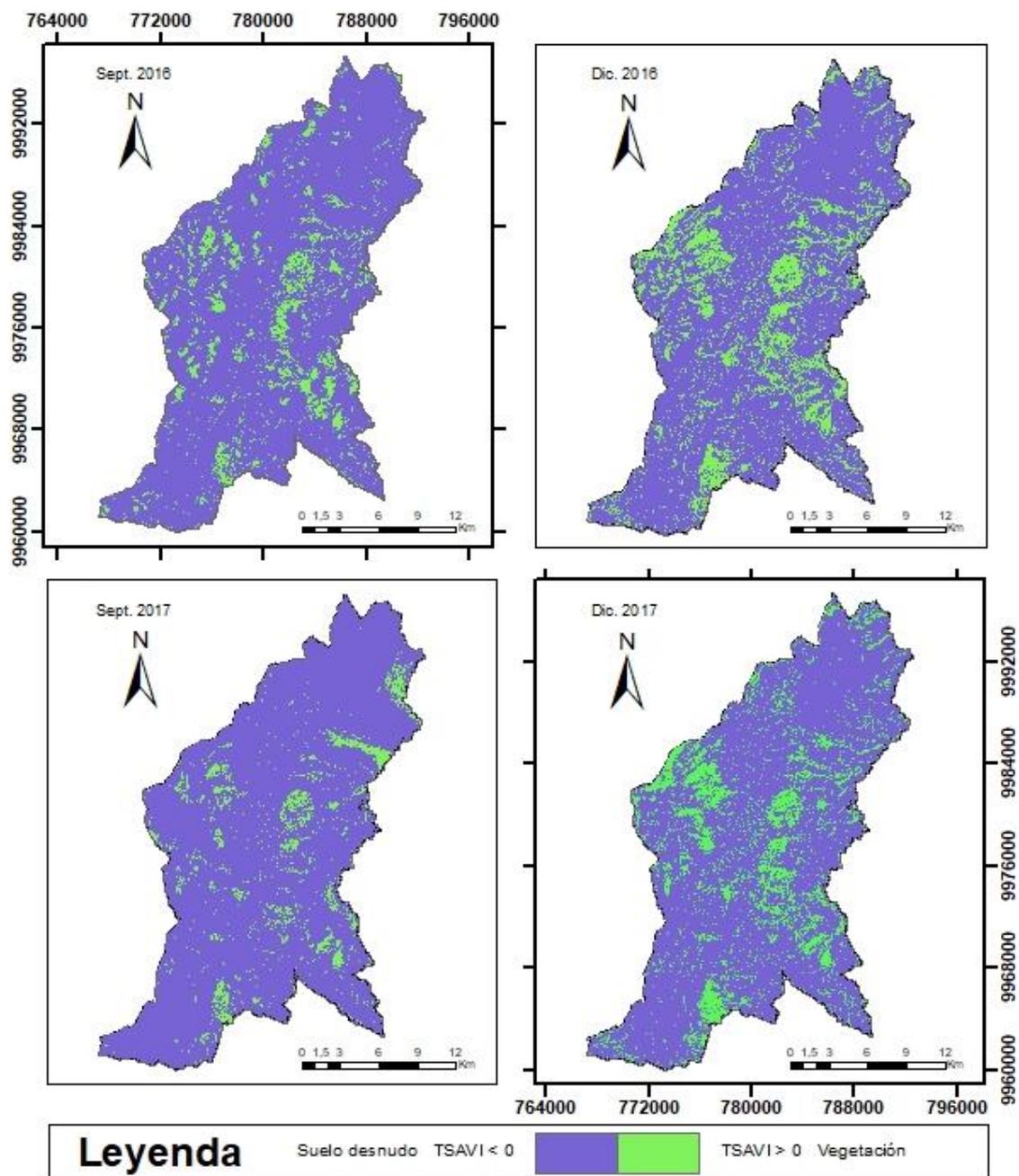


Figura 30. Comparación de TSAVI para las distintas épocas de estudio

En cuanto a la cantidad de humedad en las hojas el índice LWCI demostró ser sumamente útil al momento de distinguir las zonas de vegetación con diferentes cantidades de agua, así como al discriminar la respuesta espectral de los ríos como se aprecia en la figura 31 donde estas zonas están representadas por valores mayores a 0,12 y las superficies de suelo desnudo y vegetación rala tienen valores menores. Adicional, al momento de realizar una breve comparación visual entre sus variaciones asociadas al área de estudio, estas mantienen una estrecha relación espacial con el índice NDVI lo cual corrobora lo expuesto en el análisis realizado por Cohen & Corvallis (1991) realizado para estudiar la respuesta de los índices de vegetación a cambios.

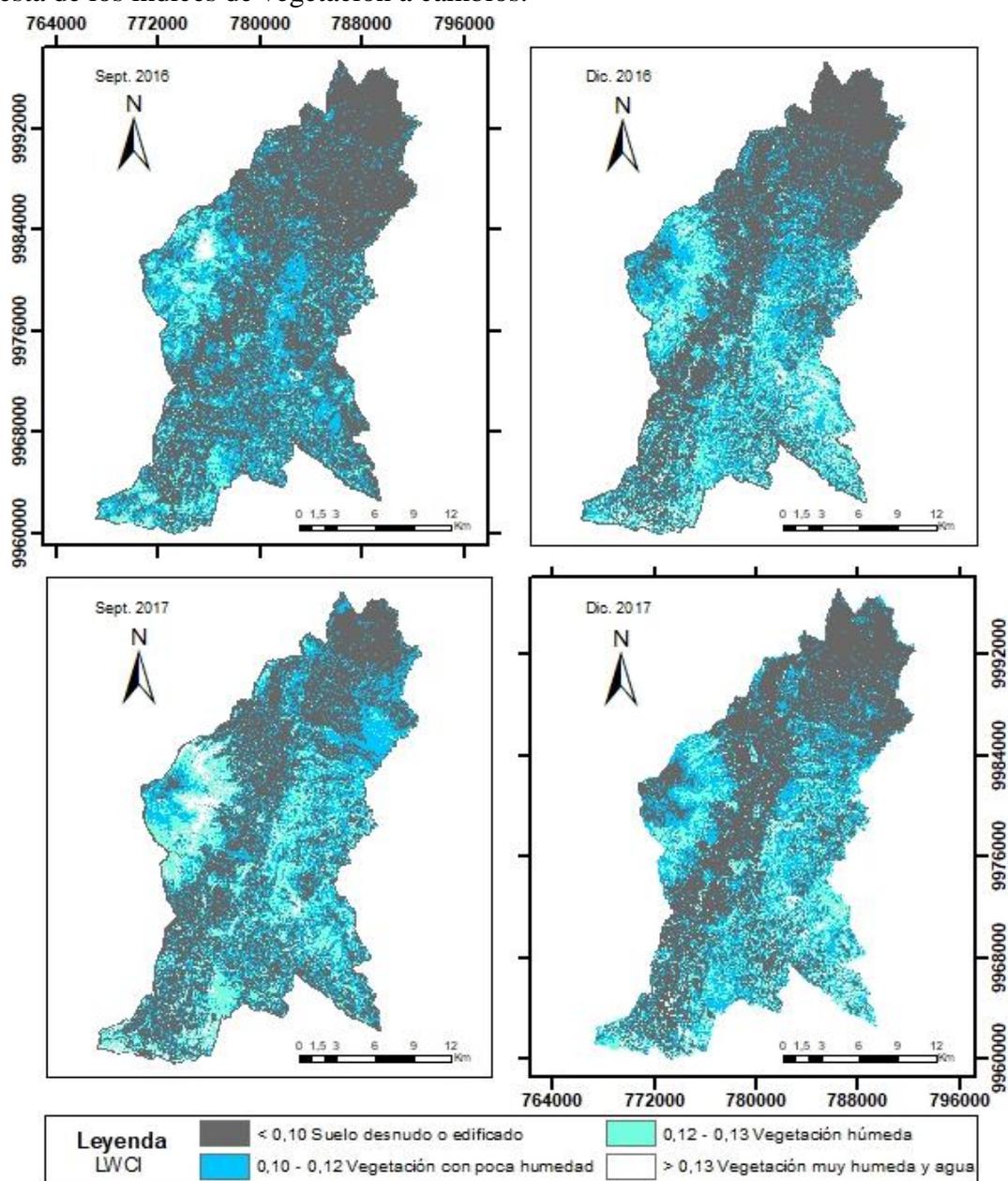


Figura 31. Comparación de LWCI para las distintas épocas de estudio

Finalmente, a partir de la información presentada por la Secretaría del Ambiente (2016) y a través de la herramienta Raster Calculator del Software ArcGIS se creó una superficie continua del polígono correspondiente al área de estudio del Distrito Metropolitano de Quito con el valor de superficie verde urbana por habitante (21,6 m²/hab) para utilizarlo como el último de los índices seleccionados dentro del presente estudio conforme a lo planteado por Orellana, Sellers & Martínez (2017) quienes utilizan este valor constante como uno de los indicadores de su índice de calidad ambiental urbano.

4.5 Análisis de correlación

Previo a la selección final de índices se realizó un análisis de la correlación existente entre épocas para cada variable como se observa a continuación:

En general existen correlaciones altas para todos los índices, sin embargo, las menores corresponden al ozono troposférico (O₃) y al dióxido de nitrógeno (NO₂), como se observa en la tabla 7 para el ozono troposférico la correlación más alta se da entre las épocas de lluvia y estiaje del 2017 con un valor de 0.99998. A pesar de esto se denotan variaciones para ambos índices meteorológicos a diferencia de la radiación solar la cual a pesar de tener una correlación cercana a 1 no presenta mayor variación.

Tabla 7.

Matriz de correlación por épocas de estudio de índices meteorológicos

O₃	Sept. 2016	Dic. 2016	Sept.2017	Dic. 2017
Sept. 2016	1			
Dic. 2016	0,68834	1		
Sept. 2017	0,68775	0,99983	1	
Dic. 2017	0,68770	0,99980	0,99998	1
NO₂	Sept. 2016	Dic. 2016	Sept.2017	Dic. 2017
Sept. 2016	1			
Dic. 2016	0,68797	1		
Sept. 2017	0,68912	0,99970	1	
Dic. 2017	0,68894	0,99977	0,99992	1
Rad. Solar	Sept. 2016	Dic. 2016	Sept.2017	Dic. 2017
Sept. 2016	1			
Dic. 2016	0,94021	1		
Sept. 2017	0,91651	0,97627	1	
Dic. 2017	0,92635	0,98015	0,99946	1

En los valores expuestos dentro de la tabla 8 se observa que los índices NDVI y NSI presentan una correlación absoluta entre fechas con coeficientes de 1 para las épocas de estiaje de ambos años en el caso del NDVI, de igual forma sucede para el año 2017 en época lluvia (diciembre) y estiaje (septiembre). A su vez existe una importante correlación tanto positiva como negativa de valores por debajo del cero para el índice TSAVI y en el caso del índice LWCI con coeficientes entre 0,6 y 0,8 se puede decir que mantienen una correlación media entre épocas de diferentes años y alta para el caso del mismo año. Estos resultados verifican lo expuesto por Sánchez (2017), quien afirma que las correlaciones más altas entre épocas se dan para los índices provenientes de imágenes satelitales.

Tabla 8.

Matriz de correlación por épocas de estudio de índices radiométricos

NDVI	Sept. 2016	Dic. 2016	Sept.2017	Dic. 2017
Sept. 2016	1			
Dic. 2016	0,99999	1		
Sept. 2017	1,00000	0,999996	1	
Dic. 2017	0,99999	0,999998	1,0000	1
NSI	Sept. 2016	Dic. 2016	Sept.2017	Dic. 2017
Sept. 2016	1			
Dic. 2016	0,999997	1		
Sept. 2017	0,999998	0,99999727	1	
Dic. 2017	0,999998	0,99999727	1	1
TSAVI	Sept. 2016	Dic. 2016	Sept.2017	Dic. 2017
Sept. 2016	1			
Dic. 2016	0,00051	1		
Sept. 2017	0,00024	-9,87E-06	1	
Dic. 2017	0,00072	-3,20E-06	-7,00E-06	1
LWCI	Sept. 2016	Dic. 2016	Sept.2017	Dic. 2017
Sept. 2016	1			
Dic. 2016	0,63245	1		
Sept. 2017	0,63245	0,80000	1	
Dic. 2017	0,70710	0,89442	0,89443	1

Debido a que el índice de superficie verde urbana por habitante (SVUH) fue representado como una superficie continua, su coeficiente de correlación para las cuatro épocas tiene el valor de 1, lo que según Martínez, Tuya, & Martínez (2009) representa una correlación absoluta y positiva.

Una vez analizado el grado de correlación para cada índice de forma individual se procede a evaluar la relación existente entre ellos ya que esto constituye un paso importante para el análisis de componentes principales según González, Díaz & Torres (1994), se expone a continuación en la tabla 9:

Tabla 9.*Matriz de correlación por índices para cada época de estudio*

<i>Sept. 2016</i>	O3	NO2	R. Solar	SVUH	NDVI	NSI	TSAVI	LWCI
O3	1							
NO2	0,99894	1						
R. Solar	0,61150	0,61372	1					
SVUH	0	0	0	1				
NDVI	0,08977	0,09010	0,13278	0	1			
NSI	0,08985	0,09026	0,13173	0	0,99997	1		
TSAVI	0,04980	0,04994	0,07316	0	0,55258	0,55251	1	
LWCI	0,06349	0,06370	0,09373	0	0,70708	0,70708	0,39066	1
<i>Dic. 2016</i>	O3	NO2	R. Solar	SVUH	NDVI	NSI	TSAVI	LWCI
O3	1							
NO2	0,99962	1						
R. Solar	0,97139	0,97299	1					
SVUH	0	0	0	1				
NDVI	0,14738	0,14731	1,43E-01	0	1			
NSI	0,14740	0,14727	1,43E-01	0	0,99995	1		
TSAVI	0,00015	0,00026	4,59E-04	0	0,00102	0,00102	1	
LWCI	0,13182	0,13169	1,28E-01	0	0,89440	0,89443	0,00091	1
<i>Sept. 2017</i>	O3	NO2	R. Solar	SVUH	NDVI	NSI	TSAVI	LWCI
O3	1							
NO2	0,99953	1						
R. Solar	0,99921	0,99893	1					
SVUH	0	0	0	1				
NDVI	0,14735	0,14742	1,47E-01	0	1			
NSI	0,14732	0,14743	1,47E-01	0	0,99997	1		
TSAVI	0,00021	0,00022	2,81E-04	0	0,00130	0,00127	1	
LWCI	0,13178	0,13186	1,32E-01	0	0,89442	0,89443	0,00115	1
<i>Dic. 2017</i>	O3	NO2	R. Solar	SVUH	NDVI	NSI	TSAVI	LWCI
O3	1							
NO2	0,99965	1						
R. Solar	0,99872	0,99797	1					
SVUH	0	0	0	1				
NDVI	0,14730	0,14739	1,47E-01	0	1			
NSI	0,14727	0,14741	1,47E-01	0	0,99996	1		
TSAVI	0,00028	0,00026	3,25E-04	0	0,00167	0,00162	1	
LWCI	0,14728	0,14742	1,47E-01	0	0,99998	0,99999	0,00164	1

Al presentarse un coeficiente de correlación igual a cero (correlación nula) para SVUH con respecto a los otros índices se determina que este índice al provenir de un valor constante y no de un conjunto de variables, como en caso del resto, no puede ser utilizado dentro del análisis de componentes principales ya que no solo presenta una correlación nula sino también una varianza del mismo valor por lo que no aportaría nada al momento de crear nuevos componentes a partir del conjunto de índices individuales como lo mencionan Demey, Adams & Freitas (1994); esto difiere con el índice de calidad ambiental elaborado por Orellana, Sellers y Martínez (2017) para la ciudad de Cuenca donde se incluye este índice dentro de su análisis.

Por otra parte, se observa que los coeficientes más altos corresponden a la relación entre los grupos de índices meteorológicos (O_3 , NO_2 y Radiación solar) y radiométricos (NDVI, NSI, TSAVI y LWCI). Para los índices centrados en la proporción de suelo descubierto NSI y TSAVI también se denotan correlaciones fuertes; así como la clara dependencia de los índices NDVI y LWCI en las épocas de diciembre de 2016 y 2017 cuando según las figuras 9 y 10 los niveles de lluvia son más altos ya que esto es un factor que influye en gran medida al estado de vigorosidad de la planta. A pesar de que el NSI destaca las superficies edificadas y el LWCI las superficies verdes con mayor humedad, ambos índices mantienen una fuerte correlación en ambos años, esto se debe según Rodríguez y Bullock (2013) a la reflectancia en la banda SWIR con la que se generan ambos índices radiométricos.

En cuanto al ozono (O_3) la tabla 10 manifiesta mayor relación con el resto de índices, siguiéndole el dióxido de nitrógeno (NO_2) y la radiación solar en orden descendente. Por lo demás la correlación mínima se evidencia en el índice TSAVI con respecto al resto de índices, resultado que discrepa con lo expuesto por Sánchez (2017) quien menciona que este mantiene altas correlaciones con NDVI y LWCI ya sea para época seca o lluviosa.

4.6 Estadísticos de adecuación muestral

Al test KMO se le adicionó la prueba de esfericidad de Bartlett para las cuatro épocas, cuyos resultados se presentan en la tabla 10:

Tabla 10.*Resultados del test KMO y prueba de esfericidad de Bartlett*

		Sept. 2016	Dic. 2016	Sept. 2017	Dic. 2017
Medida de adecuación muestral KMO		0,67	0,72	0,74	0,63
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	3594559,88	4308979,45	5073971,227	7224424,981
	gl.	21	21	21	21
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00

En los resultados expuestos en la tabla 11 se observan valores estadísticos del test KMO que proporcionan porcentajes de varianza por encima de 0,7 para las épocas de diciembre 2016 y septiembre 2017; y porcentajes mayores a 0,6 para las épocas de septiembre 2016 y diciembre 2017 lo que según Bernal, García & Martínez (2004) indica adecuación de los datos a nivel de bueno y aceptable respectivamente para el análisis factorial. De modo similar la prueba de esfericidad de Bartlett confirma que el análisis por componentes principales es adecuado al arrojar valores de cero en los cuatro casos.

4.7 Análisis por componentes principales

Enseguida se procede a realizar el análisis por componentes principales con los índices individuales que fueron escogidos en el apartado anterior, con un total de siete componentes se tomó como criterio a los auto-valores o eigenvalues que resultaron mayores a 1 para su selección como lo mencionan González, Díaz & Torres (1994), además de la utilización de gráficos de sedimentación (ver Anexo 2) que proporcionan una ayuda visual en la toma de esta decisión.

En la tabla 11 se encuentran plasmados los auto valores con su porcentaje de varianza asociado, como se observa aquí los dos primeros componentes cumplen con el criterio de auto valor > 1 y esta característica se mantiene a lo largo de las cuatro épocas estudiadas. Tomando como ejemplo la época de estiaje del año 2016 (Sept. 2016) la varianza máxima es explicada entre el primer y segundo componente con un porcentaje de 74, 527 %, sin embargo, el primer componente fue el elegido como el índice de calidad ambiental urbana debido a que por sí solo abarca el 41,429 % de la varianza total y presenta el auto valor más alto; a diferencia de los resultados expuestos en el índice realizado por Sánchez (2017) para la

ciudad de Cuenca, donde presenta auto valores > 5 lo que según Pérez & Medrano (2010) significa que aquellos componentes con dichos valores estarían reflejando el porcentaje de varianza máximo para más de un índice completo y en consecuencia no abarcaría significativamente información del resto.

Tabla 11.
Varianza total explicada para las épocas de estudio

Componente	Auto valores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la extracción		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
	Sept. 2016					
1	2,900	41,429	41,429	2,900	41,429	41,429
2	2,317	33,098	74,527	2,317	33,098	74,527
3	1,000	14,286	88,813			
4	0,405	5,781	94,594			
5	0,378	5,406	100,000			
6	2,656E-05	0,00038	100,000			
7	1,360E-06	1,943E-05	100,000			
Dic. 2016						
1	3,363	48,039	48,039	3,363	48,039	48,039
2	2,497	35,678	83,717	2,497	35,678	83,717
3	1,000	14,286	98,002			
4	0,140	1,997	99,999			
5	4,746E-05	0,001	100,000			
6	2,295E-06	3,278E-05	100,000			
7	5,387E-07	7,696E-06	100,000			
Sept. 2017						
1	3,117	44,524	44,524	3,117	44,524	44,524
2	1,883	26,904	71,428	1,883	26,904	71,428
3	1,000	14,286	85,714			
4	1,000	14,286	100,000			
5	3,067E-05	0,000	100,000			
6	2,231E-06	3,187E-05	100,000			
7	1,068E-06	1,526E-05	100,000			
Dic. 2017						
1	3,442	49,174	49,174	3,442	49,174	49,174
2	2,558	36,540	85,714	2,558	36,540	85,714
3	1,000	14,286	99,999			
4	0,000	0,001	100,000			
5	0,000	0,000	100,000			
6	1,274E-06	0,000	100,000			
7	4,966E-07	7,094E-06	100,000			

Bajo el mismo principio se analizó las dos primeras componentes de las tres épocas restantes verificando que todos los auto valores se encuentran en un rango de auto valores < 3 con un porcentaje de varianza mayor al 40% para el primer componente, por lo que al igual que en el caso de la primera época se decidió extraer a este y a sus equivalentes como los índices de calidad ambiental urbana tal como lo propusieron Santana, Escobar & Capote (2010).

En la tabla 12 se puede comparar los dos primeros componentes de cada época los cuales demuestran seguir un comportamiento similar con respecto a los índices que los conforman, de la misma se puede conseguir una interpretación de la representatividad de aquello. Una de las características que sobresalen es la distribución casi equitativa de los pesos para el primer componente donde se observa que absolutamente todos los índices conservan una relación positiva y fuerte con pesos por sobre 0,6. Cabe mencionar que para la interpretación de los auto valores en los componentes extraídos según Bernal, Martínez & Sánchez (2004), se toma a los mismos como pesos; entendiéndose así que los índices generados a partir del primer componente se encuentran mayormente ligados, aunque con una diferencia apenas notable, a los índices radiométricos, a excepción del índice TSAVI.

Tabla 12.
Matriz de componentes mayores a 1

	Sept. 2016			Dic. 2016	
	Componente			Componente	
	1	2		1	2
NSI	0,745	-0,626	NSI	0,807	-0,591
NDVI	0,745	-0,626	NDVI	0,807	-0,591
NO2	0,692	0,683	NO2	0,807	-0,591
O3	0,692	0,683	O3	0,697	0,702
RAD.SOLAR	0,652	0,530	RAD.SOLAR	0,697	0,702
LWCI	0,637	-0,564	LWCI	0,00005	0,000
TSAVI	0,00005	0,000	TSAVI	0,662	0,682
	Sept. 2016			Dic. 2016	
NSI	0,970	-0,244	NSI	0,757	-0,653
NDVI	0,970	-0,244	NDVI	0,757	-0,653
NO2	0,970	-0,244	NO2	0,757	-0,653
O3	0,384	0,923	O3	0,757	0,653
RAD.SOLAR	0,384	0,923	RAD.SOLAR	0,757	0,653
LWCI	0,00006	0,000003	LWCI	0,000	0,000
TSAVI	-0,00006	0,00003	TSAVI	0,757	0,653

A continuación, en la figura 32 se muestra un mapa comparativo de los índices generados a partir de la extracción del primer componente cuyos valores fueron reclasificados en la escala propuesta por Santana, Escobar & Capote (2010) para mejorar la apreciación de las variaciones ligadas a los cambios de época. Cabe mencionar que previo a esto se aplicó una expansión lineal de dichos valores como lo propuso Chuvieco (1995), para mejorar la visualización de la zona de estudio.

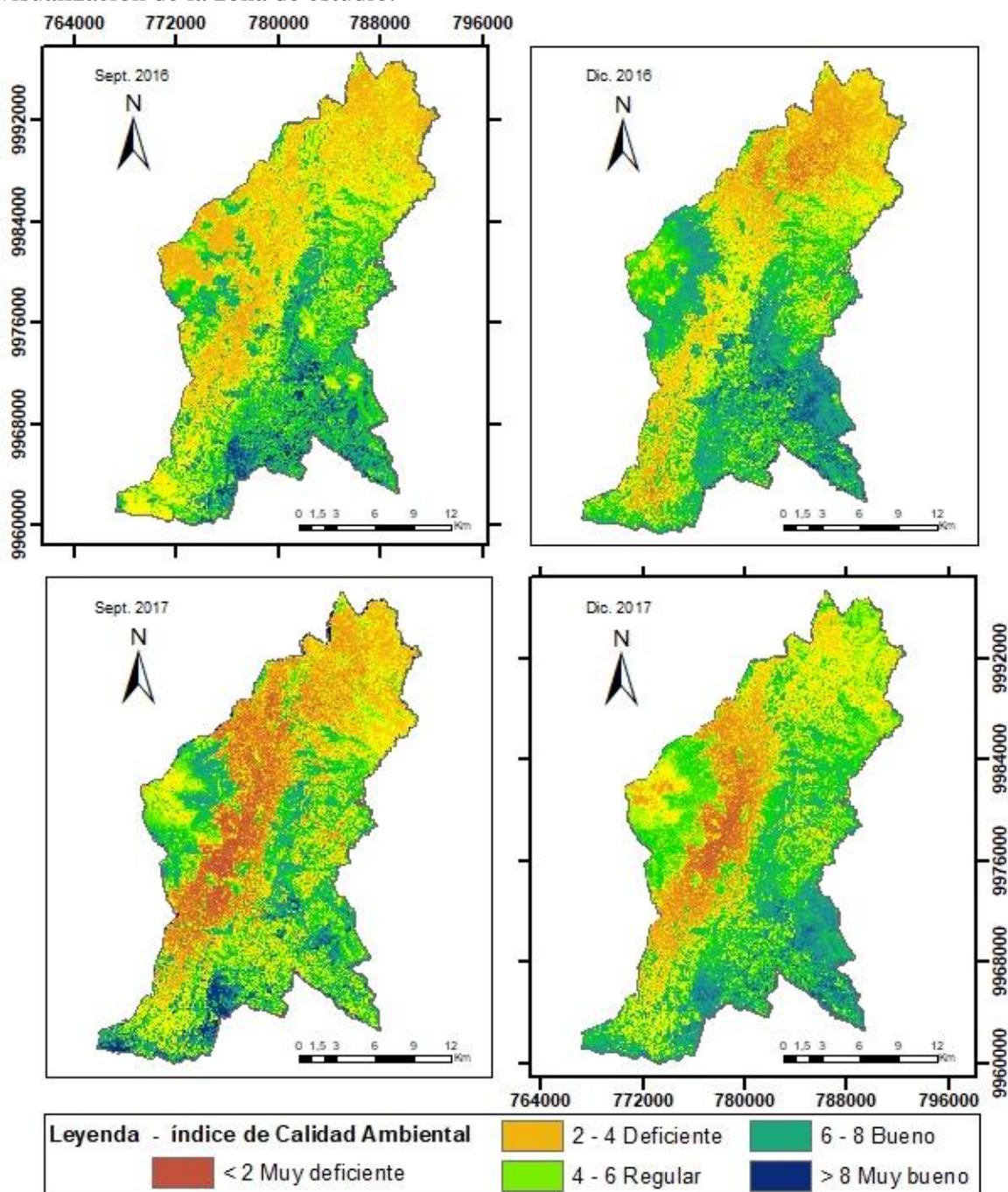


Figura 32. Comparación del ICA urbano para las distintas épocas de estudio

Siguiendo con la metodología propuesta en el capítulo 3 para analizar los cuatro índices de calidad ambiental se generó una matriz de correlación con la que se pudo determinar la diferencia existente entre ellas, a través del análisis de los coeficientes, dentro de la tabla 13, se lograron distinguir principalmente dos patrones de comportamiento: a) todos los coeficientes muestran una correlación $> 0,5$ entre ellos lo que, de acuerdo a Pita & Pértega (1997), quiere decir que de hecho existe alguna relación de dependencia entre ellos y b) los coeficientes más altos se dan entre las épocas de lluvia y entre las épocas de estiaje de ambos años, donde además este último patrón lo describe visualmente el mapa comparativo de la figura 32.

Tabla 13.
Matriz de correlación de los ICA

	<i>ICA 1609</i>	<i>ICA 1612</i>	<i>ICA 1709</i>	<i>ICA 1712</i>
ICA 1609	1			
ICA 1612	0,554	1		
ICA 1709	0,773	0,513	1	
ICA 1712	0,640	0,812	0,646	1

Finalmente, para verificar la información proporcionada por la tabla 14 sobre la similitud entre los cuatro índices se corrió la prueba estadística ANOVA, en esta se expresa que de hecho si existe una diferencia significativa entre los índices generados con un $p\text{-valor} < 0,05$ con lo cual se procedió a rechazar la hipótesis nula y por consiguiente se aceptó la hipótesis alternativa; los resultados de esta prueba se presentan a continuación en la tabla 14:

Tabla 14.
Matriz de resultado de prueba ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	339186,234	3	113062,078	39094,532	0,000
Dentro de grupos	2120551,720	733243	2,892		
Total	2459737,954	733246			

Estos resultados difieren con los estudios realizados por Sánchez (2017) y por Santana, Escobar y Capote (2010) , en los cuales plantearon que tras no hallar diferencias significativas entre épocas se eligiese indistintamente entre los índices generados para que uno de ellos sea representado como el índice de calidad ambiental urbano final para cualquier

época del año. En contraste a esto es necesario realizar un análisis de las medias entre las 4 épocas estudiadas (ver figura 33) y no una prueba Tukey como lo determinarían las reglas del análisis estadístico, ya que en este estudio no se necesitan separaciones muy estrictas (Dicovski, 2010) y en detrimento lo que se busca es encontrar un índice que logre representar la calidad ambiental de la ciudad de manera global.

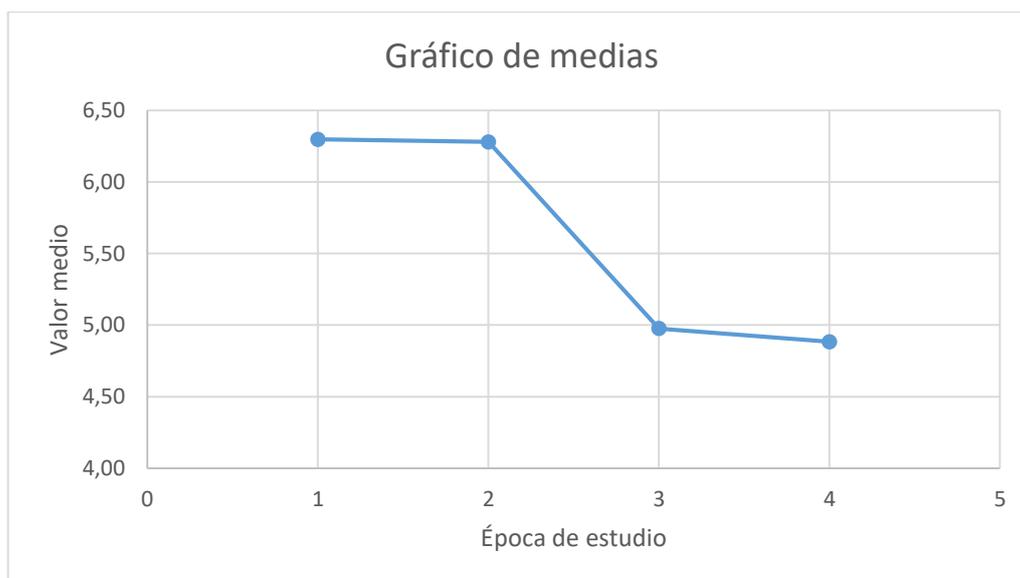


Figura 33. Comparación del ICA urbano para las distintas épocas de estudio

En la figura 33 se aprecia el comportamiento de la calidad ambiental dentro del DMQ a lo largo de las épocas de lluvia y estiaje de los años 2016 y 2017. Aquí se presenta que, si bien existe un cambio en la calidad ambiental entre las citadas épocas, también es evidente el deterioro de la misma de un año al otro, ya que en 2016 el ICA arroja valores promedio > 6 (calidad ambiental buena) y para el año 2017 este disminuye a un rango de 4 a 5 (calidad ambiental regular).

De acuerdo a Serrano, Zuleta & Moscoso (2012), el clima dentro del Distrito Metropolitano de Quito tiende a presentar comportamientos extremos en factores que modifican la conducta de algunas de las variables tomadas en consideración dentro del presente estudio, como lo son la precipitación e incluso los niveles de radiación solar. Esto explicaría la ausencia de una fuerte correlación entre los índices generados indistintamente de la época del año en la que se encuentren, sin embargo, gracias a los valores obtenidos en la tabla 13 y en la figura 33 fue posible determinar que los ICA de las épocas de lluvia y de las

de estiaje mantienen relación suficiente entre sí para establecerlos como los dos índices que representen de mejor manera estas dos épocas marcadas dentro de la ciudad.

A pesar de que los cuatro índices calculados mantienen una correlación importante entre estas épocas, se debe recalcar el deterioro ambiental que sufre la ciudad de un año al otro, lo cual puede deberse en parte al incremento de tráfico vehicular y los contaminantes que estos generan y en parte al incremento de la superficie edificada (ver figura 29) lo cual produce el efecto de islas de calor (Bolaños, 2017).

En los anexos 3 y 4 se puede observar la relación espacial que existe entre el índice de calidad ambiental y los sitios de interés dentro de la ciudad, en la cual resaltan valores mayores a 6 (calidad ambiental buena y muy buena) en las zonas de los valles y en las áreas verdes de la ciudad y así mismos valores menores a 6 (calidad ambiental regular y mala) en zonas donde se sabe que existe mayor congestión vehicular y mayor cantidad de área construida como lo señala Fernández (2001). De la misma forma se distingue una mayor extensión de superficie con valores de ICA > 6 en la época de lluvia lo cual según Rodríguez y Bullock (2013) se debe al aumento de vigor en la vegetación (ver figura 28).

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- A partir del análisis previo de las matrices de correlación y de los estadísticos de adecuación para seleccionar los índices que formarían parte del ICA urbano, se llegó a determinar la eliminación del índice que indica la cantidad de superficie verde urbana por habitante (SVUH) ya que no aporta valor al conjunto de índices restantes; se mantiene el índice TSAVI que aunque no presenta una correlación individual alta entre épocas y de igual manera entre índices, no hubo una variación significativa en los valores estadísticos de adecuación muestral con su inclusión o eliminación.
- Los valores obtenidos de los tres índices meteorológicos no difieren demasiado en su comportamiento espacial entre épocas, como es el caso de ozono que presenta concentraciones promedio de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las épocas de lluvia y de $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las épocas de estiaje; mientras que para los índices radiométricos las correlaciones en general presentan coeficientes cercanos a 1, cuyas variaciones temporales son resultado de los cambios en uso de suelo de vegetación a superficie construida.
- La fuerte correlación entre los índices de vegetación LWCI y NDVI se contrasta con los niveles de precipitación mensuales de los años 2016 y 2017, principalmente para las épocas de lluvia en las cuales ambos índices derivan un aumento notable de superficie húmeda y de vegetación densa respectivamente.
- Los índices enfocados a destacar las características del suelo (NSI Y TSAVI) provienen del cálculo de algoritmos que incluyen las bandas rojo (banda 4) e infrarrojo cercano (banda 8) y en consecuencia deberían encontrarse estrechamente relacionados, sin embargo, debido a la topografía de la ciudad de Quito y en consecuencia a la corrección de línea de suelo utilizada para el segundo índice, estos arrojan coeficientes de correlación bajos entre sí. Por lo que se concluye que el índice TSAVI no solo arroja información redundante con respecto a otros índices de vegetación, sino que también

dificulta su representación dentro de zonas urbanas debido a la baja correlación mostrada entre épocas.

- Para la época de estiaje del año 2016 se produce una disminución en la calidad ambiental en la zona oeste del área de estudio, cercana a las antenas del Pichincha, esta alteración es producida por la nubosidad captada en la imagen que fue utilizada para el cálculo de los índices radiométricos de esta fecha, razón por la cual se decidió utilizar para la época de estiaje al índice generado a partir de la imagen tomada en septiembre del año 2017 e igualmente para el segundo índice de tal manera que se mantenga uniformidad en los resultados.
- El comportamiento ambiental de la ciudad se ve claramente afectado en las zonas donde existe mayor congestión vehicular (Terminal terrestre Quitumbe) y extensas áreas de construcción con escasa cobertura vegetal (Calderón y Parque La Carolina). A pesar de esto se observa mejoría en las áreas designadas como pulmón de la ciudad (Parque Bicentenario y Parque Metropolitano) así como en las zonas aledañas a la ciudad (Colegio la Salle y Guangopolo).

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda considerar adicionalmente un índice que indique la temperatura de superficie, el cual no se lo realizó debido a que la misión Sentinel 2 no posee un sensor que proporcione la banda térmica; se recomienda incorporar imágenes de misiones satelitales posteriores que aborden el infrarrojo térmico para el cálculo de índices de esta naturaleza. y que a su vez mantengan el tamaño de pixel apropiado para trabajar dentro de una zona urbana.
- La continuidad en la información meteorológica tanto espacial como temporal fue un factor limitante para el cálculo de los índices de contaminantes atmosféricos, es por esto que se recomienda la posibilidad de la toma de mediciones en campo con sensores adicionales que ayuden a la densificación de puntos de tal manera que aumente la confiabilidad de la superficie interpolada.

- Para la interpretación de los resultados obtenidos mediante el análisis de componentes principales es muy importante tener un claro conocimiento de la base de datos o de las variables con las cuales se están trabajando, es por esto que se recomienda realizar un análisis individual de las mismas previo a la aplicación de esta metodología.
- Desde el punto de vista medioambiental el territorio se encuentra en constante cambio tanto en su superficie como en las concentraciones de los compuestos presentes en el aire, una de las variables determinantes para estos cambios es el clima, el cual se encuentra fuertemente marcado durante ciertas épocas del año; tomando en cuenta este criterio se recomienda trabajar con imágenes de la misma época para evitar cambios en la geometría de observación o de luz por presencia de nubosidad.
- Se recomienda complementar los resultados obtenidos en el presente estudio con la generación de un índice de calidad ambiental para la zona rural del Distrito Metropolitano de Quito para así poder contrastar la situación ambiental de ambos sectores y a su vez reflejar una visión global del estado dentro de todo el DMQ.

Referencias bibliográficas

- Álvarez, I., & Padilla, O. (2016). *Estimación de la contaminación del aire por PM10 en Quito a través de índices ambientales con imágenes Landsat ETM+*. Revista Cartográfica(92).
- Alvarez, J. (2012). *Control Estadístico de Procesos*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional - IPN.
- Atilio, E. (2013). *Contaminación*. Catamarca: Científica Universitario - universidad Nacional de Catamarca.
- Bader, M., van Geloof, I., & Rietkerk, M. (2006). *High solar radiation hinders tree regeneration above the alpine treeline in northern Ecuador*. Plant Ecology.
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). *Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment*. Remote Sensing of Environment.
- Basili, P., Bonafoni, S., Biondi, R., & Pelliccia, F. (2006). *Telerilevamento di eneviti precipitativi da satellite con sensori a infrarosso*. Perugia: Dip. di Ingegneria Elettronica e dell'Informazione, Università degli Studi di Perugia.
- Basso, B., Cammarano, D., & De Vita, P. (2004). *Remotely Sensed Vegetation Indices: Theory and Applications for Crop Management*. Italia: Revista Italiana di Agrometeorología.
- Benavides, A., & Bonilla, R. (2001). Abundancia y morfometría de *Anadara tuberculosa* y *A. similis* (Mollusca: Bivalvia) en el manglar de Purruja, Golfo Dulce, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 49(2), 315-320.
- Bernal, J., Martínez, M., & Sánchez, J. (2004). Modelización de los factores más importantes que caracterizan un sitio en la red. *ASEPUMA*, XII.
- Bolaños, D. (2017). *Estudio de la isla de calor urbano del Distrito Metropolitano de Quito mediante técnicas de percepción remota*. Quito: Universidad Internacional SEK.
- Bravo, J., Nava, M., & Muhlia, A. (2000). Relaciones entre la magnitud del valor máximo de ozono, la radiación solar y la temperatura ambiente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, 2(16), 45-54.
- Burgos, M., & Copo, K. (2016). *Estimación de la concentración de ozono troposférico (O3), a partir del análisis geoespacial de imágenes satelitales y la aplicación del modelo PLS, para las parroquias urbanas del cantón Quito*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Camacho, J. (2013). *Uso de la reflectancia difusa - NIR en la determinación de características físicas y químicas de un Oxisol*. Carimagua - Meta. Bogotá: Tesis de Posgrados. Universidad Nacional de Colombia.
- Campbell, J., & Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Press.

- Carlson, T., & Ripley, D. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241-252.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones RIALP. S.A.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental, la observación de la Tierra desde el Espacio (Tercera ed.)*. Barcelona: Ariel Ciencias.
- Cohen, W., & Corvallis, W. (1991). Response of Vegetation Indices to Changes in Three Measures of Leaf Water Stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(2), 195-202.
- Consejo Nacional de Electricidad - CONELEC. (2008). *Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica*. Quito: Corporación para la Investigación Energética.
- Craik, K., & Zube, E. (1976). *The development of perceived environmental quality indices*. Boston: Environmental Science Research.
- Demey, J., Adams, M., & Freites, H. (1994). Uso del método de análisis de componentes principales para la caracterización de fincas agropecuarias. *Revista Agronomía Tropical*, 44(3), 475-498.
- Díaz, A., Granados, S., & Valdés, D. (2013). *Índice de calidad ambiental urbana-ICAU*. Colombia: Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Dicovski, L. (2010). *Introducción al Diseño Experimental*. Recuperado el 01 de Agosto de 2018, de Universidad Nacional de Ingeniería: <https://luisdi.files.wordpress.com/2008/08/unidad-3.pdf>
- Distrito Metropolitano de Quito - DMQ. (2008). El clima en el Distrito Metropolitano de Quito. En I. M. Quito, *Atlas Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., & Hoersch, C. (2012). *Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services*. Teledetección del medio ambiente.
- ESA. (2015). *European Spacial Agency*. Recuperado el 10 de 07 de 2018, de Sentinel online: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>
- Esri. (2006). *Componentes Principales: ArgGIS for Desktop*. Obtenido de ArgGIS for Desktop: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-principal-components-works.htm>
- Fernández, F. (2001). Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y su aplicación al área de Madrid. *Proyectos y métodos actuales en Climatología*, 4, 41-66.
- Gilabert, M., Gonzáles, J., & García, J. (1997). *Acerca de los índices de Vegetación*. Valencia: Revista de Teledetección.
- González, P., Díaz, A., & Torres, E. (1994). Una aplicación del análisis de componentes principales en el área educativa. *Revista de Economía*, XIX(9), 55-72.

- Honjo, T., & Takakura, T. (2003). *Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas*. Energy and Buildings.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI. (1999). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMHI. (2018). *Variables meteorológicas*. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
- L'Ecuyer, T., Wood, N., Haladay, T., Stephens, G., & Stackhouse Jr, P. (2008). *Impact of clouds on atmospheric heating based on the R04 CloudSat fluxes and heating rates data set*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres.
- Liang, B., & Weng, Q. (2011). *Assessing urban environmental quality change of Indianapolis, United States, by the remote sensing and GIS integration*. Mansfield: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.
- López, M., & Estañol, E. (2007). Detección de deficiencias de Hierro en *Pinus leiophylla* a partir de los efectos de dilución y concentración nutrimental. *Terra Latinoamericana*, 25(1), 9-15.
- Manterola, C., & Pineda, V. (2008). El valor de "p" y "la significación estadística" Aspectos generales. *Revista chilena de cirugía*, 60(1), 86-89.
- Márquez, H. (1999). *Métodos matemáticos de evaluación de factores de riesgo para el patrimonio arqueológico: una aplicación GIS del método de jerarquías analíticas de TL SAATY*. Sevilla: Revista de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Sevilla.
- Martínez, M. (2018). *Evaluación mediante sensores remotos del impacto de las medidas silvícolas en Obaga de Coll de Deu (Lérida) en el vigor de la masa*. Valladolid: Universidad de Valladolid. Tesis de Postgrado.
- Martínez, R., Tuya, L., & Martínez, M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman categorización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8/(2).
- Ministerio del Ambiente - MAE. (2015). Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión. En *Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Quito: Ministerio del Ambiente.
- Montgomery, D. (2001). *Control Estadístico de la Calidad*. Grupo Editorial Iberoamericana.
- Mora, M., & Cañarte, D. (2017). *Relación de la variación espectral mediante índices de vegetación en quinua (*Chenopodium quinoa*) en un ensayo controlado y un cultivo comercial*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., & Sòria, G. (2011). *Procesamiento de imágenes de satélite*. España: Universidad de Valencia.
- Ordiales, R. (2007). Prontuario de la Radiación Electromagnética . *EEZA*, 44.

- Orellana, M., Sellers, C., & Martínez, J. (2017). Índice de calidad ambiental urbana de Cuenca. *Universidad Verdad*(73), 65-77.
- Organización Mundial de la Salud - OMS. (2003). *Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide*. Bonn: Organización Mundial de la Salud.
- Organización Mundial de la Salud - OMS. (2003). *Índice UV Solar Mundial*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Peguero, C. (2012). *Sensores remotos y aplicaciones en Teledetección*. Departamento de Innovación y Tecnología.
- Peguero, C. (2016). *Sensores Remotos y Aplicaciones en Teledetección Geodesia y Gestión de Recursos Naturales*. SAMBA (INPROHUELVA).
- Pérez, C., & Muñoz, Á. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Pérez, D. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos - Aplicación en Geología*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Departamento de Ciencias Geológicas.
- Pérez, E., & Medrano, L. (2010). Análisis factorial exploratorio bases conceptuales y metodológicas. *Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento (RACC)*, 2(1), 58-66.
- Pita, S., & Pértega, S. (1997). Relación entre variables cuantitativas. *Cad Aten Primaria*, 4, 4-141.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. (2016). *Objetivos de desarrollo sostenible: Ciudades y comunidades sostenibles*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-11-sustainable-cities-and-communities.html>
- Pykh, Y., Kennedy, E., & Grant, W. (2000). *An overview of systems analysis methods in delineating environmental quality indices*. Ecological Modelling.
- Red Metropolitana de Monitoreo de Aire de Quito - REMMAQ. (2014). *Índice quiteño de calida del aire*. Quito: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito .
- Ren, W., Tian, H., & Liu, M. (2007). *Efects of tropospheric ozone pollution on net primary productivity and carbon storage in terrestrial ecosystems of China*. China: Journal of Geophysical Research: Atmospheres.
- Rodríguez, V., & Bullock, S. (2013). Comparison of vegetation indexes in the Sonoran desert incorporating soil and moisture indicators and application to estimates of LAI. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(4), 611-623.

- Rubio, M., & Berlanga, V. (2007). Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas t de Student y ANOVA en SPSS. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 7(1).
- Ruiz, A. (2006). *Control estadístico de procesos*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas.
- Sánchez, F. (2011). *Aplicación de sensores activos y pasivos en la circulación superficial de mesoescala en la parte sur del Golfo de México (Bahía de Campeche)*. La Paz: Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Tesis Postgrado.
- Sánchez, L. (2017). *Elaboración de un índice de calidad ambiental (ICA), enfocado al sector urbano de la ciudad de Cuenca utilizando teledetección y análisis espacial*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Santana, L., Escobar, L., & Capote, P. (Mayo de 2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*(45), 77-95. Obtenido de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022010000100006
- Secretaría del Ambiente. (2016). *Atlas ambiental Quito sostenible 2016*. Quito: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- Secretaría del ambiente. (2016). *Calidad del Aire en Quito: Informe Anual 2016*. Quito: Distrito Metropolitano de Quito.
- Secretaría del Ambiente. (2018). *Generalidades de la REMMAQ*. Obtenido de <http://www.quitoambiente.gov.ec/ambiente/index.php/generalidades>
- Serrano, S., Zuleta, D., & Moscoso, V. (2012). Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito. *La granja*, 16(2), 23-47.
- Sobrino, J. A., Raissouni, K., & Oliosio, A. (2000). *Teledetección*. Valencia: Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia.
- Teggi, S., Musacchio, M., & Buongiorno, M. (2005). *Procedura con interfaccia utente grafica per le correzioni atmosferiche di immagini satellitari*. Roma: Atti della 9a conferenza nazionale ASITA.
- Toscana, L., Moretto, N., & Villareal, F. (2009). *Cartas de control: su efectividad para detectar cambios mediante un enfoque por cadenas de Markov Absorbentes*. Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur.
- Victor, R., & Bullock, S. (2013). Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(4), 611-623.
- Villanueva, J., Ranfla, A., & Quintanilla, A. (2012). Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. *Información Tecnológica*, XXIV, 15-24.

Villegas, H. (2008). *Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas*.

Bogotá: Ministerio de minas y energía - Instituto Colombiano de Geología y Minería.

Williams, B., Onsmann, A., & Brown, T. (2010). Exploratory factor analysis: A five-step guide for novices. *Journal of Emergency Primary Health Care*, 8(3), 1-13.

Zapotitla, J. (1996). *Precursores de protones relativistas solares*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM.