



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
INNOVACIÓN Y DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

CENTRO DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN:**

SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL

**TEMA: “ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL
CONTAMINANTE GASEOSO NOX EN EL DISTRITO
METROPOLITANO DE QUITO, A PARTIR DE IMÁGENES DE
SATÉLITE LANDSAT 7 ETM / LANDSAT 8 OLI DE LOS AÑOS
2010, 2013 Y 2015, CONSIDERANDO MODELOS ESTADÍSTICOS
A PARTIR DE CORRELACIÓN ENTRE ESTACIONES DE
MONITOREO ATMOSFÉRICO Y LOS ÍNDICES AMBIENTALES”.**

AUTOR: JIMÉNEZ PÉREZ, LIZBETH LORENA

DIRECTOR: MSC. ING. ALVAREZ MENDOZA, CESAR IVÁN

SANGOLQUÍ

2018



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Estimación de la concentración del contaminante gaseoso NOx en el Distrito Metropolitano de Quito, a partir de imágenes de satélite Landsat 7 ETM / Landsat 8 OLI de los años 2010, 2013 y 2015, considerando modelos estadísticos a partir de correlación entre estaciones de monitoreo atmosférico y los índices ambientales**”, realizado por la Sra. Ing. Lizbeth Lorena Jiménez Pérez, certifico que ha sido guiado, revisado periódicamente y finalizado. El presente trabajo de titulación cumple normas estatutarias establecida por la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE.

El trabajo mencionado consta de un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (.pdf).

Sangolquí, 8 de enero 2018

Ing. MSc. PhD (c) Cesar Iván Álvarez Mendoza

DIRECTOR



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Lizbeth Lorena Jiménez Pérez**, con cédula de ciudadanía N° 1717128522, declaro que este trabajo de titulación ***“Estimación de la concentración del contaminante gaseoso NOx en el Distrito Metropolitano de Quito, a partir de imágenes de satélite Landsat 7 ETM / Landsat 8 OLI de los años 2010, 2013 y 2015, considerando modelos estadísticos a partir de correlación entre estaciones de monitoreo atmosférico y los índices ambientales”*** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 15 Enero del 2018

LIZBETH LORENA JIMÉNEZ PÉREZ
C.C. 1717128522.

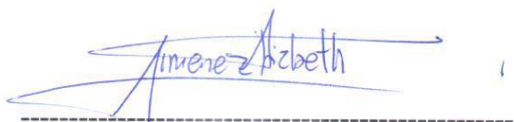


VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS

AUTORIZACIÓN

Yo, **Lizbeth Lorena Jiménez Pérez**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en su totalidad en el repositorio Institucional el trabajo de titulación ***“Estimación de la concentración del contaminante gaseoso NOx en el Distrito Metropolitano de Quito, a partir de imágenes de satélite Landsat 7 ETM / Landsat 8 OLI de los años 2010, 2013 y 2015, considerando modelos estadísticos a partir de correlación entre estaciones de monitoreo atmosférico y los índices ambientales”*** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 15 Enero del 2018



LIZBETH LORENA JIMÉNEZ PÉREZ
C.C. 1717128522.

DEDICATORIA

Dedico este gran esfuerzo a Dios por permitirme culminar con una meta más propuesta en mi vida, a mi amado esposo Ángel Chávez por estar siempre brindándome el apoyo constante hasta la culminación de mis estudios, a mis padres por su apoyo desde el inicio de mi carrera.

A mi tutor Cesar Iván Álvarez y oponente Eduardo Kirby, por el apoyo, guía técnica y recomendaciones al realizar ésta investigación.

A la ESPE y docentes de posgrados por impartir sus amplios conocimientos en el ámbito ambiental y geográfico.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I	1
ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Identificación del problema	3
1.4. Descripción del área de estudio.....	4
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo General	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULOII	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Principios de la Teledetección	6
2.1.1. Espectro Electromagnético	7
2.1.2. Firmas Espectrales	8
2.1.3. Resolución	9
2.1.3.1. Resolución Espacial:	9
2.1.3.2. Resolución Espectral	9

2.1.3.3.	Resolución Radiométrica	10
2.1.3.4.	Resolución Temporal	11
2.1.4.	Tipos de Sensores	11
2.1.5.	Imágenes Satelitales	11
2.1.5.1.	Tipos de Imágenes Satelitales	12
2.1.6.	Programa Landsat	13
2.1.7.	Distorsiones de las Imágenes de Satélite.....	15
2.1.8.	Correcciones en Imágenes de Satélite	16
2.1.8.2.	Corrección Geométrica	16
2.1.8.3.	Corrección radiométrica para bandas multiespectrales	17
2.1.8.4.	Corrección atmosférica para bandas térmicas	21
2.1.9.	Calculo de Temperatura Brillo	21
2.2.	Teledetección y Ambiente	22
2.2.1.	Índices Ambientales	23
2.2.1.1.	Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI)	23
2.2.1.2.	Índice de Humedad en las Hojas (LWCI)	23
2.2.1.3.	Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)	24
2.2.1.4.	Índice Normalizado de Suelos (NSI)	24
2.3.	Modelos de regresiones	25
2.3.1.	Regresiones lineales simples y múltiples	25
2.3.2.	Regresiones no lineales	26
2.3.3.	Coeficiente de Determinación	26
2.4.	Ecuación empírica para estimar el NOx.....	27
2.5.	Contaminación Atmosférica	28
2.5.1.	Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito	28
2.5.1.1.	Red Automática (RAUTO)	28
2.5.1.2.	Medición de Contaminantes	29
2.5.2.	Fuentes de emisión.....	30
2.5.3.	Contaminantes	30
2.6.	Fundamento Teledetección y Contaminación Atmosférica	32

2.7.	Software de investigación	33
CAPÍTULO III		34
METODOLOGÍA.....		34
3.1.	Recopilación de información.....	35
3.1.1.	Recopilación de imágenes satelitales	35
3.1.2.	Recopilación de datos NOx.....	36
3.2.	Software utilizado	36
3.3.	Corrección Geométrica.....	37
3.4.	Corrección Radiométrica Multiespectral (CRM)	38
3.4.1.	Cálculo de la radiancia	39
3.4.2.	Trasformación de radiancia a valores de reflectancia atmosférica ..	40
3.4.3.	Comprobación de reflectancia atmosférica	42
3.4.4.	Recodificación de las imágenes	42
3.4.5.	Corrección de pérdida del corredor de línea de escaneo	44
3.5.	Corrección Radiométrica Térmica (CRT).....	46
3.6.	Índices Ambientales	48
3.6.1.	Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI)	49
3.6.2.	Índice de Humedad en las Hojas (LWCI)	50
3.6.3.	Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI).....	52
3.6.4.	Índice de Suelo Normalizado (NSI)	53
3.6.5.	Temperatura Brillo (TB).....	54
3.7.	Mediciones de NOx mediante RAUTO	55
3.8.	Comparación de Modelos Matemáticos.....	56
3.8.1.	Relación entre NOx y los Índices Ambientales.....	56
3.8.2.	Relación entre NOx y valores de reflectancia atmosférica	58
CAPÍTULO IV.....		60
RESULTADOS.....		60
4.1.	Resultados de Índices Ambientales	60

4.1.1.	NDVI	60
4.1.2.	LWCI.....	61
4.1.3.	SAVI	62
4.1.4.	NSI.....	63
4.1.5.	TB.....	63
4.2.	Coef. de determinación: Índices Ambientales y NOx	64
4.3.	Coef. de determinación: Reflectancia Atmosférica y NOx.....	65
4.4.	Ecuación de mejor ajuste	66
4.5.	Modelo de estimación del NOx para cada año de estudio	68
CAPÍTULO V.....		74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		74
5.1.	Conclusiones.....	74
5.2.	Recomendaciones.....	76
CAPÍTULO VI.....		77
BIBLIOGRAFÍA.....		77
ANEXOS		82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Delimitación del área de estudio	4
Figura 2: Diagrama de elemento de la Teledetección	7
Figura 3: Grafico explicativo espectro electromagnético	8
Figura 4: Diagrama de firmas espectrales	8
Figura 5: Ilustración de resolución espacial	9
Figura 6: Ilustración de resolución espectral	10
Figura 7: Ilustración de resolución radiométrica	10
Figura 8. Matriz conformada por pixeles	11
Figura 9: Constantes de calibración de la banda térmica Landsat	22
Figura 10: Tipos de regresiones	26
Figura 11: Localización de estaciones de Monitoreo REMMAQ.....	29
Figura 12: Flujograma metodológico para ejecutar investigación.....	35
Figura 13. Metadato imagen Landsat año 2010.....	37
Figura 14. a) Imagen Sat. de Quito, b) Verificación cartografía IGM	38
Figura 15. Metadato imagen Landsat año 2010.....	38
Figura 16: Definición del área de estudio en ENVI.....	39
Figura 17: Cálculo de la Radiancia	39
Figura 18: a) Imagen con ND, b) imagen con valores de radiancia.....	40
Figura 19: Parámetros de Algoritmo FLAASH en ENVI	41
Figura 20: a) radiancia, b) reflectancia atmosférica.....	41
Figura 21: Imagen con valores de reflectancia.....	42
Figura 22: Algoritmo para recodificación de valores de reflectancia.....	43
Figura 23: Imagen con valores de reflectancia entre 0 y 1	43
Figura 24: Entorno ENVI 5.1 GapFill.....	44
Figura 25: corrección de pixel por error SLC para imagen 2010	45
Figura 26: Cómputo de las imágenes resultante.....	46
Figura 27: Información y parámetros de la banda térmica Landsat 2010.....	47
Figura 28: a) Modelo de la NASA imagen 2010, b) Parámetros para CRT	47

Figura 29: corrección atmosférica banda térmica en el Band Math.....	48
Figura 30: Herramienta con algoritmo para cálculo de NDVI para cada año	49
Figura 31: Herramienta con algoritmo para cálculo de LWCI para cada año	51
Figura 32: Herramienta con algoritmo para cálculo de SAVI para cada año	52
Figura 33: Herramienta con algoritmo para cálculo de NSI para cada año	53
Figura 34: Herramienta con algoritmo TB para cada año.....	54
Figura 35: Distribución de estaciones de monitoreo del aire	55
Figura 36: Representación del NDVI para los tres años	60
Figura 37: Representación del LWCI para los tres años	61
Figura 38: Representación del SAVI para los tres años.....	62
Figura 39: Representación del NSI para los tres años	63
Figura 40: Representación del TB para los tres años	64
Figura 41: Herramienta Band Math, ecuación de mejor ajuste 2010	69
Figura 42: Herramienta Band Math, ecuación de mejor ajuste 2013	69
Figura 43: Herramienta Band Math, ecuación de mejor ajuste 2015	69
Figura 44: Clasificación del NOx con Índices Ambientales.....	70
Figura 45: Mapa de estimación del NOx para el año 2010.....	71
Figura 46: Mapa de estimación del NOx para el año 2013.....	72
Figura 47: Mapa de estimación del NOx para el año 2015.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla de tipos de sensores utilizados para procesos investigación....	13
Tabla 2: Tipos de sensores utilizados para procesos investigación	14
Tabla 3: Características de la imagen Landsat 8 OLI.....	15
Tabla 4: Métodos de medición de contaminantes	30
Tabla 5: Imágenes satelitales utilizadas en el proyecto	36
Tabla 6: Valores máximos NIR Y SWIR sensores Landsat	50
Tabla 7: Datos NOx para las estaciones involucradas en el estudio	56

Tabla 8: Valores de NOx y NDVI en cada estación.....	57
Tabla 9: Valores NOx y LWCI de cada estación	57
Tabla 10: Valores NOx de y SAVI de cada estación	57
Tabla 11: Valores NOx y NSI de cada estación	57
Tabla 12: Valores NOx y SAVI de cada estación	57
Tabla 13: Valores NOx y valor de ND de Imagen Landsat 2010	58
Tabla 14: Valores NOx y valor de ND de Imagen Landsat 2013	58
Tabla 15: Valores NOx y valor de ND de Imagen Landsat 2015	59
Tabla 16: R^2 para diferentes tipos de regresiones	65
Tabla 17: Coeficiente de determinación R^2 para regresión lineal múltiple	66
Tabla 18: Ecuación de ajuste y R^2 para cada regresión.....	67
Tabla 19: Ecuaciones definitivas según ajuste de coeficiente R^2	69

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Área de estudio	83
ANEXO 2: Reflectancia Atmosférica 2010	84
ANEXO 3: Reflectancia Atmosférica 2013	85
ANEXO 4: Reflectancia Atmosférica 2015	86
ANEXO 6: NDVI 2013.....	87
ANEXO 7: NDVI 2015.....	88
ANEXO 8: LWCI 2010	89
ANEXO 9: LWCI 2013	90
ANEXO 10: LWCI 2015	91
ANEXO 11: SAVI 2010	92
ANEXO 12: SAVI 2013	93
ANEXO 13: SAVI 2015	94
ANEXO 14: NSI 2010	95
ANEXO 15: NSI 2013	96
ANEXO 16: NSI 2015	97
ANEXO 17: TB 2010.....	98
ANEXO 18: TB 2013.....	99
ANEXO 19: TB 2015.....	100
ANEXO 20: Estimación del NOx para el año 2010.....	101
ANEXO 21: Estimación del NOx para el año 2013.....	102
ANEXO 22: Estimación del NOx para el año 2015.....	103
ANEXO 23: Manual para corrección de imágenes satelitales en ENVI 5.1	104

RESUMEN

La calidad del aire del Distrito Metropolitano de Quito-DMQ, es considerada aceptable conforme a los parámetros de Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire (NECA) y las Guías de la Organización Mundial de la Salud (Secretaría del Ambiente, 2014); sin embargo, en el año 2015 han ocurrido eventos como incendios y actividades volcánicas que influyen directamente en el aumento de concentración del contaminante gaseoso NO_x. Es importante considerar, que la cantidad de emisiones de los contaminantes provenientes de fuentes fijas como: generadores eléctricos, amenazas volcánicas, industrias, mal manejo de los desechos y fuentes móviles como: procesos de combustión en vehículos a diesel y gasolina, varían a lo largo del tiempo; por tanto, es necesario disponer de un método óptimo para determinar la concentración de NO_x. La investigación consiste en estimar el contaminante gaseoso NO_x, mediante imágenes satelitales del Sensor Landsat 7 ETM / 8 OLI en tres años (2010, 2013 y 2015) y los datos medidos del contaminante NO_x provenientes de las estaciones de monitoreo atmosférico de Quito. Para el procesamiento de las imágenes se aplicó correcciones radiométricas y atmosféricas, obteniendo el primer insumo que son imágenes con valores de reflectancia atmosférica, mientras que el segundo insumo corresponde a las imágenes resultantes del cálculo de índices ambientales. Ambos, fueron evaluados mediante regresiones que determinen la mejor correlación con respecto a mediciones de NO_x, obteniendo como resultado que el índice ambiental SAVI es mejor índice que se ajusta a los datos de campo y es apropiado para representar del contaminante NO_x.

PALABRAS CLAVES

- REFLECTANCIA ATMOSFERICA
- INDICES AMBIENTALES
- CORRELACION

ABSTRACT

The air quality of the Metropolitan District of Quito-DMQ, is considered acceptable according to the parameters of the Ecuadorian Standard of Air Quality (NECA) and the Guidelines of the World Health Organization (Secretary of the Environment, 2014); However, in the year 2015, events such as fires and volcanic activities have occurred that directly influence the increase in the concentration of the NO_x gas pollutant. It is important to consider that the amount of emissions of pollutants from fixed sources such as: electric generators, volcanic threats, industries, poor waste management and mobile sources such as: combustion processes in diesel and gasoline vehicles vary as long time; therefore, it is necessary to have an optimal method to determine the NO_x concentration. The research consists of estimating the NO_x gas pollutant, using satellite images from the Landsat 7 ETM / 8 OLI sensor in three years (2010, 2013 and 2015) and the NO_x pollutant measured data from the Quito atmospheric monitoring stations. For the processing of the images, radiometric and atmospheric corrections were applied, obtaining the first input that are images with atmospheric reflectance values, while the second input corresponds to the images resulting from the calculation of environmental indices. Both were evaluated by means of regressions that determine the best correlation with respect to NO_x measurements, obtaining as a result that the SAVI environmental index is a better index that adjusts to the field data and is appropriate to represent the NO_x pollutant.

KEYWORDS

- ATMOSPHERIC REFLECTANCE
- ENVIRONMENTAL INDICES
- CORRELATION

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Antecedentes

La contaminación atmosférica a nivel de Ecuador cuenta con escasas investigaciones debido a la falta de conocimiento en temas de calidad del aire (Ministerio del Ambiente, 2010), en el país existe dos redes de monitoreo atmosférico, la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ) y Red de Monitoreo de Calidad del Aire de la EMOV EP de Cuenca, que permiten evaluar el comportamiento de los contaminantes en sectores específicos de la ciudad, sector donde se encuentran localizadas las estaciones. Con este antecedente, se considera importante implementar y evaluar nuevas tecnologías, como las imágenes de satélite, que puedan ayudar a estimar los principales contaminantes atmosféricos, contemplando el uso de estaciones de monitoreo ubicadas de manera estratégica a lo largo del área de estudio. El uso de imágenes de satélite llegan a describir un sin número de características importantes de la superficie terrestre y su atmósfera a través del estudio y análisis del espectro electromagnético. En temas de contaminación atmosférica se han realizado estudios por científicos de la NASSA que han logrado determinar la calidad del aire a nivel mundial a fin de mejorar las condiciones del medio ambiente.

Estudios puntuales, fueron desarrollados en las ciudades de Quito y Cuenca, a través del uso de imágenes de satélite, para ambos casos se realizó un estudio sobre el contaminante PM10, obteniendo buenos resultados de representación y estimación de dicho contaminante. Para el presente estudio se considerarán aspectos similares para estimación utilizando datos del contaminante gaseoso NOx.

1.2. Justificación

La Organización Mundial de la Salud (OMS), establece que cada país debe considerar normas de calidad de aire que protejan la salud de los ciudadanos acorde con la realidad social y económica (OMS, 2005), por lo tanto, el Ecuador se basa en la Norma de Calidad del Aire Ambiente (NCAA), publicada en el TULSMA, Acuerdo Ministerial 061, Libro VI relacionado a evaluar y controlar la contaminación del aire (Secretaría del Ambiente Quito, 2017).

El presente proyecto se considera de gran importancia para validar una metodología que pueda estimar la concentración de un contaminante atmosférico utilizando técnicas alternativas como es la teledetección. En países como Colombia, México, Estados Unidos, España y Ecuador, se han involucrado técnicas de teledetección para investigar problemáticas ambientales como: Detección de Áreas con Problemas de Lixiviación de Nitratos (Rivera R., Vargas E., Terrazas S., Gavi F., 2002), también existen estudios por la NASSA que refieren a imágenes precisas tomadas desde el espacio que permiten definir la contaminación ambiental de cada ciudad (NASA, 2015), y estudios realizados en Ecuador, como Estimación de contaminación del aire por PM10 en Quito a partir Índices Ambientales obtenidos con imágenes satelitales Landsat ETM+ (Alvarez, 2016).

La investigación pretende estimar el contaminante gaseoso NO_x en el DMQ, a través de modelos estadísticos, mismos que podrán ser aplicados para los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) o entidades gubernamentales, que se beneficien con dicha metodología a fin de poder modelar un determinado contaminante sobre su propio territorio, optimizando menos recursos económicos y tiempo. Las imágenes de satélite como principal insumo del proyecto, se encuentran para libre descarga (GLOVIS (<https://glovis.usgs.gov/>)); por lo tanto, ésta adquisición abarata costos notoriamente al momento de realizar estudios sobre contaminación ambiental.

1.3. Identificación del problema

El alto costo de implementar y mantener una red de monitoreo atmosférico, así como, las escasas redes de monitoreo ambiental existentes en el Ecuador; han llevado a cabo que los Gobiernos Municipales enmarcados en cumplir con la Política Pública contenida en el Plan Nacional del Buen Vivir, objetivo 7, sobre: “Garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental”; puedan destinar a éste problema una solución a fin de medir y controlar los contaminantes al aire primarios y secundarios.

Los problemas de contaminación del aire, tienen un comportamiento directamente proporcional con el aumento de la población e incremento del parque automotor. En el Ecuador, para el año 2014 al 2015 tiene un incremento anual del parque automotor 9,8% (INEC, 2015), mientras que el crecimiento poblacional es del 1.5% (INEC, 2016); en consecuencia los gases de contaminación, ya sea por combustión de los hidrocarburos a diesel, gasolina, industrias y demás actividades antrópicas, serán las responsables de un aumento exponencial de los contaminantes. Éste problema también radica de forma puntual con eventos de magnitud que representan un incremento en la contaminación atmosférica, para el año 2015 en Quito se registraron eventos de origen natural como emisión de contaminantes a causa de esporádicas erupciones del Volcán Cotopaxi, así como acontecimientos como incendios que se presentan anualmente en meses de julio a septiembre.

El problema principalmente se deriva de la falta de estaciones de monitoreo de contaminantes tomando en cuenta que a medida que pasa el tiempo los gases contaminantes y material particulado aumenta. El uso de sensores montados en satélites son alternativas para evaluar los contaminantes como NO_x, así también se puede llegar a estimar la contaminación de grandes áreas debido a los beneficios que tiene esos sensores aerotransportados en satélites.

1.4. Descripción del área de estudio

El área de estudio es de 884 km² en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), que comprenden las parroquias de zona urbana de Quito: Carapungo, Pomasqui, Zambiza, Llano Chico, Nayón, Cumbaya, Guangopolo, La Merced, Tumbaco, Amaguaña y Conocoto. En el DMQ existe un sistema de referencia local, pero para fines del proyecto se estableció el sistema de referencia WGS84, coordenadas UTM, zona 17 Sur.

El Proyecto se encuentra conformado por consolidaciones urbanas, zonas de agricultura, cobertura vegetal boscosa, arbustiva, etc.; mismas características que serán útiles para el análisis. El área de estudio fue elegida por disponer de datos que contienen las mediciones de contaminantes atmosféricos distribuidos por todo el DMQ; ésta información es fundamental para realizar la validación del modelo de estimación del contaminante atmosférico NOx. A lo largo del DMQ se dispone de ocho estaciones de monitoreo del Red Automática (RAUTO) que se encuentran realizando mediciones permanentes de los contaminantes, se han escogido cinco estaciones ubicados a los extremos para poder realizar el modelamiento. A continuación se presenta la Figura 1, referente al área del proyecto. Anexo 1

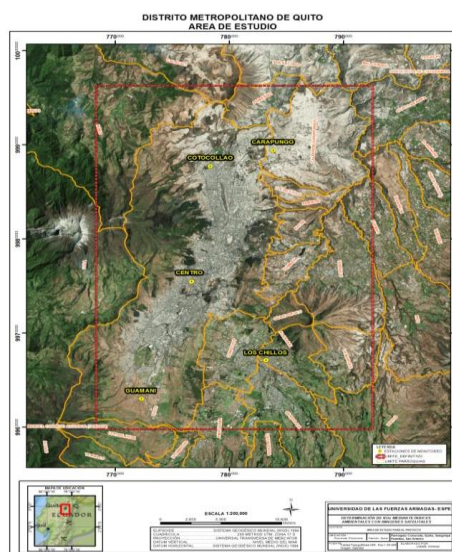


Figura 1: Delimitación del área de estudio

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Estimar la concentración del contaminante gaseoso NO_x en el Distrito Metropolitano de Quito para los años 2010, 2013 y 2015, utilizando el modelo con el mejor ajuste entre las mediciones NO_x y los índices ambientales calculados a partir de imágenes satelitales Landsat 7 ETM y Landsat 8 Oli.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Realizar las correcciones radiométricas y atmosféricas de las imágenes satelitales Landsat 7ETM y Landsat 8 OLI.
- Calcular los índices ambientales NDVI, LWCI, NSI, SAVI y TS a partir de las imágenes de satélite Landsat 7ETM y Landsat 8 OLI para los años 2010, 2013 y 2015.
- Aplicar modelos estadísticos de regresión entre los valores de NO_x obtenidos en campo, con valores de obtenidos a partir índices ambientales y reflectancia atmosférica.
- Identificar el mejor modelo regresión que permita representar al contaminante gaseoso NO_x en el DMQ para los tres años de estudio.
- Detectar las zonas con mayor concentración de NO_x para los tres años de estudio.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Principios de la Teledetección

Según (Chuvienco E. , 1995) la teledetección es la capacidad de obtener información de la superficie terrestre de forma remota, es decir sensores montados en plataformas aéreas tripuladas, no tripuladas y espaciales. Un claro ejemplo son sensores transportados en satélites que fueron enviados al espacio por varias agencias espaciales de países desarrollados (Tecnológico de Monterrey, s.f.).

La teledetección es la interacción que se produce entre la radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor. El análisis de esta información permite el reconocimiento de las características de los objetos observados y de los fenómenos que se producen en la superficie terrestre, oceánica y atmósfera. Por tanto, son muchas las ciencias, tanto naturales como sociales, interesadas en su uso (Geografía, Geología, Meteorología, Agronomía, etc.). (Satellite Imaging Corporation, 2015).

La teledetección se basa en la acción de sensor para captar energía de la fuente que se proyecta sobre un objeto localizado en la superficie terrestre, mismo que tiene características propias, por lo tanto, la respuesta espectral es diferente para cada objeto, puesto que éstos emite radiación y los hace a diferentes longitud de onda.

Para que se efectúe con normalidad un proceso de teledetección y llegar al objetivo final que es hacer comprensible la información a fin de poder interpretar los resultados obtenidos, es necesario contar con los siguientes componentes presentados en la Figura 2.

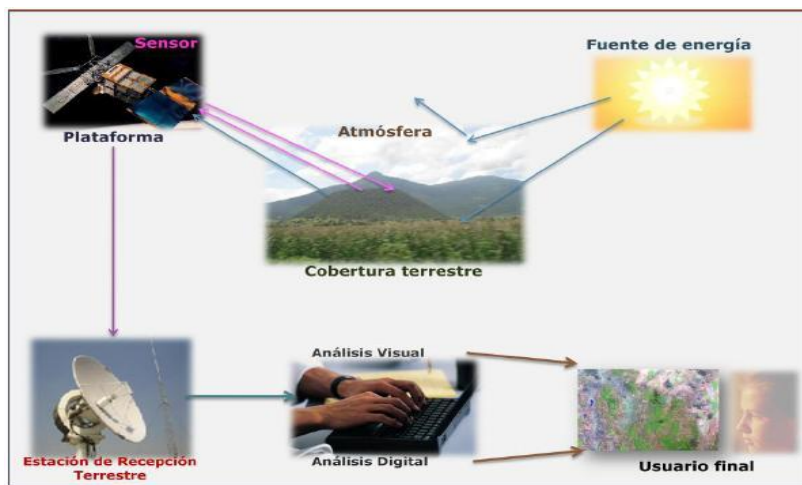


Figura 2: Diagrama de elemento de la Teledetección

Fuente: INEGI México, s.f.

Cualquier objeto sobre la superficie terrestre emite radiación y lo hace con diferentes longitudes de onda. La cantidad de energía que emite un cuerpo por radiación, como la distribución de esta energía en diferentes longitudes de onda, depende fundamentalmente de la temperatura de dicho cuerpo (ley de Stefan-Boltzman), concluyendo que la radiación solar puede llegar a mandatoria en las regiones del espectro electromagnético. Se debe tomar en cuenta que la atmósfera es un importante componente que se interpone entre la superficie y el sensor por lo tanto absorbe o dispersa parte de la señal original.

2.1.1. Espectro Electromagnético

La energía en función de su longitud de onda y frecuencia se denomina espectro electromagnético (Chuvienco E. , 1995), En la Figura 3, se observa las divisiones del espectro electromagnético acorde a las longitudes de onda, que tiene una sucesión de energía.

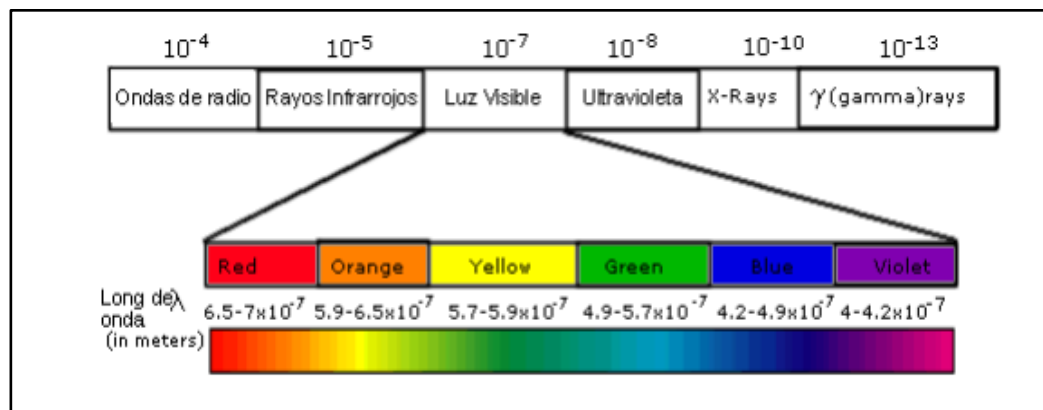


Figura 3: Grafico explicativo espectro electromagnético

Fuente: Sánchez Diego, s.f.

Todas las imágenes se basan en la medida de la radiación electromagnética a fin de entender el comportamiento del sensor al momento de la captura.

2.1.2. Firmas Espectrales

La teledetección se fundamenta en la interacción del espectro electromagnético y superficie terrestre. En un gráfico se puede representar la cantidad de radiación que se refleja en una superficie, y se encuentra en función a la longitud de onda electromagnética. En la Figura 4 se muestra el comportamiento de la longitud de onda ante diferentes objetos.

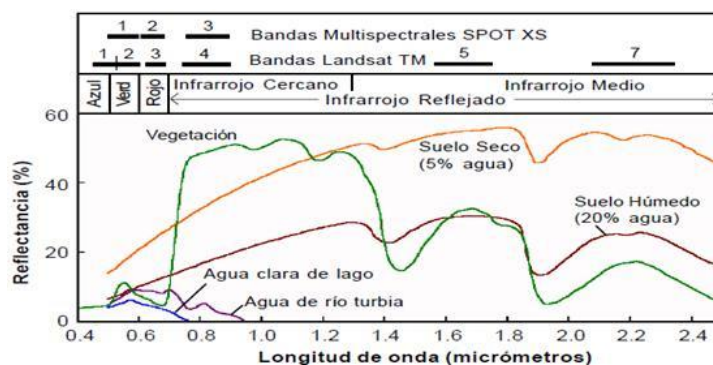


Figura 4: Diagrama de firmas espectrales

Fuente: Domínguez, s.f.

Con la firma espectral se puede clasificar de manera más sencilla, los píxeles que corresponden a una cobertura específica. Por ejemplo, la cobertura vegetal se caracteriza por un pico de reflexión en infrarrojo cercano, misma que permitirá diferenciarla de otras cubiertas que en el rango del visible que tengan una respuesta espectral semejante.

2.1.3. Resolución

Es el número de píxeles que integran un sensor de satélite, cada sensor tiene características propias clasificadas como resoluciones, existen 4 tipos de resoluciones importantes. (Chuvienco, 2002)

2.1.3.1. Resolución Espacial:

Es la capacidad de distinguir el objeto más pequeño en una imagen de satélite, éste parámetro depende del tipo de sensor. También se constituye como el tamaño de pixel en metros, Ver Figura 5. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007)

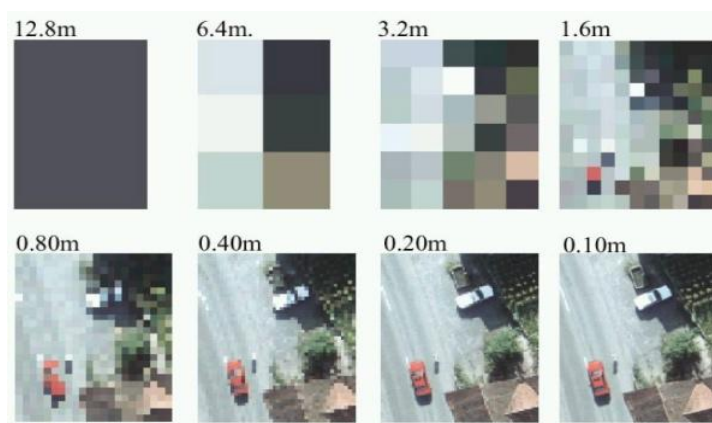


Figura 5: Ilustración de resolución espacial

Fuente: IGAC, s.f.

2.1.3.2. Resolución Espectral

Consiste en el número de canales espectrales que cada sensor puede captar. Los productos pueden ser de tipo pancromáticas, multispectrales e

hiperespectrales. Indica el número y anchura de las bandas (UNCPBA, 2012) Figura 6. Los sensores que poseen mayor numero de bandas son óptimos puesto que permitirán la caracterización espectral de la objeto. (Chuvieco E. , 1995).



Figura 6: Ilustración de resolución espectral

Fuente: Chuvieco, 1995

2.1.3.3. Resolución Radiométrica

La resolución radiométrica es la variación de la energética (radiación) y almacenados de acuerdo a un valor digital. Además se refiere como el rango de niveles de grises por píxel. Por ejemplo, con 8 bits/píxel tendríamos $2^8 = 256$ Niveles de Grises. (UNCPBA, 2012). Ver Figura 7,

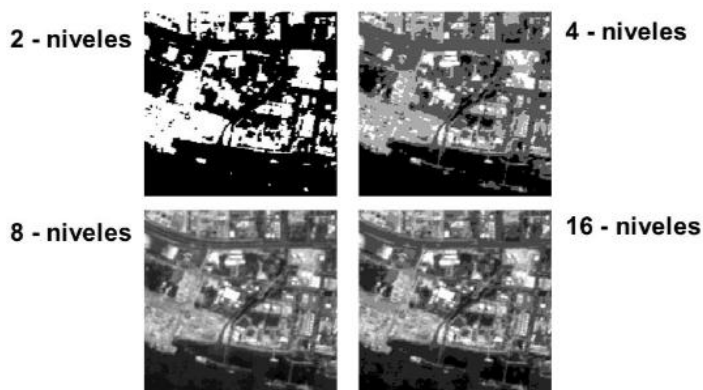


Figura 7: Ilustración de resolución radiométrica

Fuente: NASA ARSET-AQ, s.f.

2.1.3.4. Resolución Temporal

Periodo de recurrencia del un sensor sobre un punto determinado de la superficie terrestre. (UNCPBA, 2012)

2.1.4. Tipos de Sensores

- De acuerdo a su orbita (UNESCO RAPCA, s.f.)
 - Geoestacionarias*: Permanecen siempre en la vertical de un punto determinado acompañando a la Tierra en su movimiento de rotación
 - Heliosincronas*: se desplazan en órbitas generalmente circulares y polares (el plano de la órbita es paralelo al eje de rotación de la Tierra).
- A la radiación receptada (Chuvieco E. , 1995)
 - Pasivos*: recepta radiación reflejada de fuentes naturales.
 - Activos*: posee fuentes internas que general artificialmente la radiación.

2.1.5. Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales son una representación visual de la superficie terrestre capaz de cubrir grandes áreas de territorio, se encuentran compuestas por una matriz de números, cada uno de éstos corresponden a un pixel, también son denominados como Números Digitales (ND), Ver Figura 8. Cada ND es un elemento importante al ejecutar el análisis sobre imágenes. El ND depende completamente del sensor y la radiancia percibida por el sensor depende de la luz solar al momento de la toma. (Chuvieco, 2002)

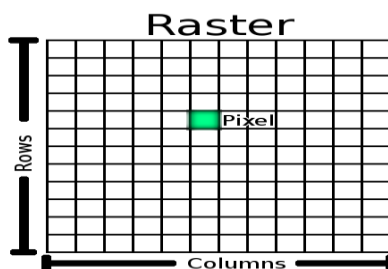


Figura 8. Matriz conformada por píxeles

Fuente: Documentación QGIS2.6

Estas imágenes son utilizadas de acuerdo a las características propias de cada sensor, constituyéndose dicha información en un insumo importante para realizar trabajos de planificación, ambiente, ingeniería, etc. (Leon, 2002)

Las imágenes de Satélite se encuentran conformadas por bandas que son rangos agrupados del espectro electromagnético (Universidad de la Plata, 2016). Ej: sensores Landsat-TM y Landsat-MSS, el primero tiene 7 bandas (azul, verde, rojo, 3 en el infrarrojo cercano y 1 en el infrarrojo térmico) y el segundo 4 bandas (verde, rojo y 2 en el infrarrojo cercano). La banda del infrarrojo permiten realiza análisis sobre la estado de cobertura vegetal, muchas veces que no pueden ser percibas por el ojo humano. (Canada Centre for Remote Sensing, 2006)

Las imágenes satelitales conforme a su combinación espectral son de utilidad para distinguir objetos que se encuentran en la superficie terrestre y en la atmósfera, gracias a una propiedad como es la firma espectral. Para discriminar zonas se debe considerar la respuesta espectral y análisis mutitemporal del sitio en estudio (Fernandez, s.f.). Con la información multi-espectral se puede obtener distintas composiciones de color, seleccionando las bandas espectrales que se utilizaran para el análisis. Ej.: Para discriminar la zona urbana, con la combinación en falso color 432, se puede distinguir las edificaciones. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007)

2.1.5.1. Tipos de Imágenes Satelitales

Las imágenes de satélite provienen de sensores artificiales que en inicios fueron creados para aplicaciones meteorológicas. A la presente fecha los satélites han sido creados para el área de los recursos naturales, oceanografía, meteorología. (Programa de Modernización de la Jurisdicción de Tierras Tribunal Superior de Tierras Santo Domingo, República Dominicana, Leon Yolanda, 2002).

En la Figura 9, se despliega una variedad de satélites, cada uno con sus ventajas, acorde al uso que el investigador quiera proporcionar. Para visualizar un ejemplo de las imágenes más utilizadas ver Tabla 1.

Tabla 1:
Tabla de tipos de sensores utilizados para procesos investigación

Imagen	Nº Bandas Multiespectrales	Resolución Multiespectral (mts.)	Resolución Pancromática (mts.)	Extensión Escena (Kmts.)	Bandas Estereoscópicas	Data Imagen
Landsat 7 (ETM+)	8	30 (60)	15	185 x 170	-	1999
Landsat 5 (TM)	8	30 (60-120)	-	185 x 170	-	1982
ASTER	14	15 (30-90)	-	61,5 x 63	2	2000
AVNIR2 (ALOS)	4	10	-	70 x 70	-	2006
PRISM (ALOS)	-	-	2,5	35 x 35	3	2006
PALSAR (ALOS)	-	-	10-100	Variable	-	2006
RapidEye	5	5	-	25 x 25	-	2009
QuickBird	4	2,4	0,6	16,5 x 16,5	-	2002
WorldView - 1	-	-	0,5	17,6 x 14	-	2007
WorldView - 2	8	1,8	0,46	16,4 x 16,4	-	2009

Fuente: Geomática, 2014

2.1.5.1.1. Bandas multiespectrales

Las bandas multiespectrales emplean diferentes rangos del espectro electromagnético para identificar bandas multiespectrales concretas. Para visualizar las imágenes de satélite se realiza combinaciones de bandas de los tres colores primarios (Azul, Verde y Rojo). (Martínez, 2005)

2.1.5.1.2. Bandas térmicas

Bandas que pueden capturar la energía calorífica en los objetos, la banda 6, misma que representa la ganancia cuando se genera la imagen. Estas bandas contiene información del infrarrojo térmico, que son de ayuda para temperatura y contaminación del aire. (Universidad de Murcia, 2003)

2.1.6. Programa Landsat

El primer satélite de alta resolución que ha permitido obtener información detallada de la superficie terrestre fue lanzado en 1972, llamado inicialmente ERTS (Earth Resources Technology Satellites) y más tarde

LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite). El mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). (Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México, s.f.). A continuación se describe en la Tabla 2, las características relevantes de sensores Landsat.

Tabla 2:
Tipos de sensores utilizados para procesos investigación

Satélite	Lanzamiento (fin servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Sensor	Banda: intervalo espectral (μm)	Resolución espacial (m)
Landsat 1	23/07/72 06/01/78	917	18	RBV	(1) 0.48 0.57 (2) 0.58 0.68 (3) 0.70 0.83	80 80 80
				MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1	79 79 79 79
Landsat 2	22/01/75 25/02/82	917	18	Idéntico al Landsat 1		
Landsat 3	05/03/78 31/03/83	917	18	RBV	(1) 0.5 0.75	40
				MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1 (8) 10.4 12.6	79 79 79 240
Landsat 4	16/07/82 (83)	705	16	MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1	82 82 82 82
				TM	(1) 0.45 0.52 (2) 0.52 0.60 (3) 0.63 0.69 (4) 0.76 0.9 (5) 1.55 1.75 (6) 10.4 12.5 (7) 2.08 2.35	30 30 30 30 120 30
Landsat 5				Idéntico al Landsat 4		
Landsat 6	05/10/93 05/10/93	705	16	Fallos en el sistema		
Landsat 7	15/04/99	705	16	ETM+	(1) 0.45 0.52	30
					(2) 0.53 0.61	30
					(3) 0.63 0.69	30
					(4) 0.78 0.9	30
					(5) 1.55 1.75	30
					(6) 10.4 12.5	120
					(7) 2.09 2.35	30
PAN 0.5 0.90	15					

RBV (Return Beam Vidicon) Multiespectral 3 bandas

MSS (Multispectral Scanner Sensor) Multiespectral 4 bandas

TM (Thematic Mapper) Multiespectral 7 bandas

ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) Multiespectral (instrumento de nueva generación, solo presente en el Landsat 7)

Fuente: García Álvaro, s.f.

Las imágenes Landsat presentan inconveniente en la adquisición de la imagen, por lo que desde el 31 de mayo del 2003 se reportó el averío en el sistema SLC (Scan Line Corretor), que es la parte del sensor ETM+ que compensa el movimiento hacia adelante del satélite durante la adquisición de las imágenes, por lo tanto las imágenes obtenidas a partir de éstas fechas contienen píxeles sin información de forma diagonal que tienen hasta 15 píxeles en el borde de la imagen, y van disminuyendo gradualmente camino al

centro hasta desaparecer. La pérdida de información del pixel es aproximadamente de un 22% de la información de cada imagen (Uribe, 2012). Los métodos de corrección del error SLC pueden realizarse conforme a la disponibilidad de datos, es decir interpolar mediante técnicas geoestadísticas, como es el reemplazo de los píxeles vacíos por sus vecinos, tales como Vecino Más Cercano, Máxima Verosimilitud, Mahalanobis y otras más complejas como el *Krigging* ordinario. (Estrada, 2010)

El satélite LANDSAT -8, es el último lanzado por la NASA en el año 2013, éste contiene 11 bandas que permitirán realizar combinaciones a fin de dar mayor aprovechamiento en el uso de las imágenes. En la Tabla 3 se presenta la descripción de sensor Landsat 8.

Tabla 3:
Características de la imagen Landsat 8 OLI

Atributo	Descripción
Tipo de Producto	Imagen L1T (Precision, Terrain Corrected) - ortorectificada
Formato de Imagen	Archivo GeoTIFF Metadato en formato texto
Espaciamiento de pixel	15 m Pancromático 30 m Multiespectral
Tamaño de Producto	185 x 185 km
Correcciones Geométricas	Proyectadas a un datum y proyección cartográfica, usando un Modelo Digital de Elevación (SRTM) y puntos de control terrestre (GCP)
Datum Horizontal	WGS84
Proyección Cartográfica	UTM (Universal Transversa de Mercator)
Bandas Espectrales	11 bandas: Aerosol costero (Coastal Aerosol) 430 – 450 nm Azul (Blue) 450 – 510 nm Verde (Green) 530 – 590 nm Rojo (Red) 640 – 670 nm Infrarrojo cercano (NIR) 850 – 880 nm SWIR 1 (SWIR 1) 1570 – 1650 nm SWIR 2 (SWIR 2) 2110 – 2290 nm Pancromático (Pan) 500 – 680 nm Cirrus (Cirrus) 1360 – 1380 nm Infrarrojo térmico (TIRS) 1 10600 – 11190 nm Infrarrojo térmico (TIRS) 2 11500 – 12510 nm
Resolución Radiométrica	12 bits

Fuente: NASSA, s.f.

2.1.7. Distorsiones de las Imágenes de Satélite

Una imagen de satélite se encuentra expuesta a una serie de interferencias, por lo que se obtiene información con perturbaciones por una serie de errores. Varios de los errores son factores externos al sensor que se debe tomar en cuenta el momento de procesar los datos.

- Movimiento del satélite y el mecanismo de captación de los sensores con alteraciones, generan distorsiones en la imagen (solución: corrección geométrica)
- Sensores con fallos, generan píxeles oscuros o muy claros, complicado para interpretación o análisis de imágenes (solución: corrección radiométrica)
- Interferencia de la atmósfera, alteran de forma sistemática los valores de los píxeles (solución: corrección atmosférica). (Chuvienco E. , Fundamentos de Teledetección Espacial, 1995)

2.1.8. Correcciones en Imágenes de Satélite

2.1.8.2. Corrección Geométrica

La corrección geométrica es un importante proceso mediante el cual se puede realizar correcciones de las distorsiones que tiene una imagen al momento de la captura, que pueden darse por varios factores, rotación de la tierra, campo de visión de los sensores, altitud, relieve del terreno, entre otros. La corrección geométrica permite modificar la geometría del píxel, en donde los píxeles son ajustados a puntos con una referencia espacial conocida, permitiendo obtener una imagen sistema de proyección específico.

Para realizar la corrección geométrica de las imágenes satelitales existen varios métodos, el mayormente aplicado es el método polinómico, que consiste en el cálculo de coeficientes de un polinomio a partir de coordenadas conocidas en el terreno. (Arozarena, 2004)

Ec.1

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

$$y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy$$

2.1.8.3. Corrección radiométrica para bandas multispectrales

La corrección radiométrica se debe realizar con el fin de obtener los valores de intensidad propios en cada toma, puesto que por efecto de la fuente de energía y condiciones de la atmósfera y propias del sensor, se pueden producir distorsiones en los valores del pixel. (Ambrosio R., González J., Arévalo V., 2002)

A fin de disminuir errores a causa de efectos atmósfera se aplican herramientas que puedan recuperar la radiancia de cada objeto identificado en la imagen. Éste método consiste en eliminar errores causados al momento de realizar la captura, en donde influye la incidencia de la energía solar sobre los objetos de la superficie terrestre, causando efectos de dispersión y/o absorción. Estos errores causados por las partículas dispersas en la atmósfera, se requiere realizar el cálculo de la radiancia y posteriormente de la reflectancia.

Las imágenes satélites de acuerdo a su sensor, disponen de información en los metadatos o archivos auxiliares que permite realizar las correcciones a los datos de imagen, para el caso de las imágenes Landsat TM, ETM+ y Landsat-8 OLI/TIRS, se puede obtener las opciones de calibración para radiancia, reflectancia o brillo. (ENVI, 2015)

4.1.8.3.1. Cálculo de Radiancia

Radiancia es la cantidad de energía electromagnética que es emitida desde un área en particular, confinada en un ángulo sólido en una dirección específica. Cada uno de estos ND, deben ser convertidos en valores de radiancia obteniendo valores en una escala espectral normalizada. (Rejas, 2008)

Ec. 2

$$L_{\lambda} = (Gain * DN) + Bias$$

Donde:

L_{λ} : Radiancia espectral medida en watts/ (m² * steradian + μm)

DN: Niveles Digitales (banda con la que estamos trabajando)

GAIN: Ganancia de la banda / BIAS: Sesgo

Los valores de GAIN y BIAS se podrán obtener a partir del metadato.

Ec. 3

$$Gain = \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}}$$

$$Bias = L_{min\lambda} - (Gain * Q_{calmin})$$

Dónde:

QCAL = Radiancia calibrada, modificado a escala en unidades digitales;

LMIN λ , es la radiancia espectral en QCAL = QCALMIN;

LMAX λ , es la radiancia espectral en QCAL= QCALMAX

4.1.8.3.2. Reflectancia

La reflectancia es la cantidad energía que refleja la superficie receptora, se mide en tantos por uno y se considera adimensional porque es diferente para cada superficie receptora y para cada cuerpo. (Chuvieco E. , 1995)

Ec. 4

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \sin \theta}$$

Dónde:

L_{λ} = Radiancia en unidades W/(m² * sr * μm)

d = Distancia Tierra – Sol en unidades astronómicas

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiancia solar en unidades W/(m² * μm)

θ = Angulo solar de elevación en grados decimales

4.1.8.3.3. Corrección Atmosférica

Existen varias metodologías para poder realizar la corrección atmosférica de una imagen, entre estas se encuentran el método por

sustracción del objeto oscuro (DOS), Modelo COST que constituye una mejora del DOS (incorpora una estimación de la transmitancia), Reflectancia Aparente (AR) y FLASSH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). (Brizuela A., Aguirre C., Velasco I., 2007)

Método FLAASH

FLAASH es una herramienta de modelado que recupera los valores de reflectancia espectral considerando factores de corrección atmosférica. Éste algoritmo es un modelo basado en la transferencia de radiación de MODTRAN4 (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) desarrollado por Spectral Sciences Inc. (Kruse, 2004). MODTRAN es un modelo conocido, que busca eliminar los efectos de absorción y dispersión causados por las moléculas de agua y partículas atmosféricas en suspensión, de la radiancia recibida por el sensor y convertir esa radiancia a valores de reflectividad de superficie. (Heileen, 2014)

El algoritmo de corrección atmosférica FLAASH se compone por modelos atmosféricos acorde a las latitudes y época de captura de la imagen satelital, albedo superficial, la altitud superficial, la columna de vapor de agua, las profundidades ópticas en nubes y aerosoles, las temperaturas superficiales y atmosféricas a partir de datos multiespectrales; además, “FLASSH” tiene configuraciones avanzadas respecto a contaminantes y partículas en el aire, éstos datos pueden ser ingresados de ser el caso se disponga de información. El método para corrección de aerosoles en ENVI, se denomina Kaufman-Tanre, este método sirve mejorar la visibilidad de la imagen, utilizando el cambio entre los valores de píxeles oscuros entre bandas cercanas (retrieval estándar). (Kruse, 2004). El modelo de corrección atmosférica permite ingresar los valores de radiancia calculados en los pasos anteriores y procede a realizar cálculo de valores de reflectancia atmosférica.

FLAASH describe a una ecuación estándar de radiancia espectral para cada píxel del sensor, L , (Ecuación 5), se aplica al rango de longitud de onda solar (emisión termal es omitida) y superficies Lambertianas¹, planas o sus equivalentes (Castillo, 2012). Mediante el FLAASH se corrigen longitudes de onda en el espectro visible a través de los infrarrojos. (Adlen Golden, 1992)

Ec.5

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a$$

Dónde:

ρ : es la reflectancia de la superficie del píxel

ρ_e : es una reflectancia superficial media para el píxel y una región circundante

S : es el albedo esférico de la atmósfera

L_a : es radiancia dispersado por la atmósfera

A y B : son coeficientes que dependen de las condiciones atmosféricas y geométricas pero no de la superficie.

“Cada una de estas variables incluidas en la ecuación son dependiente del canal espectral de cada imagen. En la primera sección relaciona la radiación de la superficie terrestre al sensor y el segundo término refiere a la radiación de la superficie terrestre dispersa por la atmosfera. La relación entre ρ y ρ_e , refleja el efecto de adyacencia (mezcla espacial de radiancia entre píxeles cercanos) causada por la dispersión atmosférica. Los valores de A , B , S y L_a se determinan a partir de los cálculos de MODTRAN que utilizan la visión y los ángulos solares, la elevación superficial media de la medición y asumen una atmósfera modelo determinada, un tipo de aerosol y un rango visible”. (ENVI, 2015)

¹ Superficies que reflejan la radiación hacia todas direcciones, Ley Lambert, (Melia, 1991)

2.1.8.4. Corrección atmosférica para bandas térmicas

La corrección atmosférica debe ser también realizada en las bandas térmicas, puesto que permite eliminar los efectos que produce la atmósfera como por ejemplo el calor excesivo. En el caso de las bandas térmicas se requiere un tratamiento especial para realizar las correcciones atmosféricas, el método de Coll et al (2010), ecuación Ec. 6, es uno de los métodos de corrección, que incluye datos de clima, datos meteorológicos de radiancia ascendente y descendente, transmitancia; éstos pueden ser obtenidos a partir de la herramienta de corrección atmosférica (HCA), propuesta por la NASA, en la siguiente dirección <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>; mediante la cual, se puede obtener los parámetros atmosféricos necesarios, ingresando la fecha de captura de la imagen satelital. Esta herramienta consiste en proporcionar perfiles con cobertura global en una rejilla 1°x1°, cada 6 horas. (Coll C., 2009)

Ec. 6

$$B(T) = \frac{L_{\lambda} - L^{\uparrow}}{\varepsilon \tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L^{\downarrow}$$

Donde:

B(T) = Corrección atmosférica calculada con valores de radiancia

L_λ = Valor de radiancia calculada del pixel, obtenida a partir de Ec2.

L[↑] = Radiancia ascendente

L[↓] = Radiancia descendente

τ = Transmitancia.

ε = Emisividad (Típicamente 0.95)

2.1.9. Calculo de Temperatura Brillo

Las bandas termales pueden ser convertidas de radiancia a temperatura en grados Kelvin, por lo que se utiliza la constante térmica suministrada en el archivo de metadatos de cada imagen de satélite. Ver en la Figura 9 las constantes de calibración correspondiente a cada sensor.

Satelites	Bandas	K ₁	K ₂
		W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	Kelvin
Landsat 4	6	671.62	1284.30
Landsat 5	6	607.76	1260.56
Landsat 7	6	666.09	1282.71
Landsat 8	10	774.89	1321.08
	11	480.89	1201.14

Figura 9: Constantes de calibración de la banda térmica Landsat

Fuente: Chander 2009.

Con estas constantes se puede considerar la conversión de radiancia a temperatura de brillo, mediante la siguiente expresión:

Ec. 7

$$T = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Donde

T = Temperatura en grados Kelvin

L_λ = Radiancia espectral en W/m²·sr·μm

k₁ y k₂ son constantes de calibración

2.2. Teledetección y Ambiente

La teledetección es muy importante para aportar con estudios con el entorno ambiental, puesto que las imágenes de satélite pueden disponer de información que no es percibida al ojo humano, es decir, longitudes de onda mayores. Debido a la gran resolución espectral que es útil para realizar estudios ambientales. Así mismo, se puede disponer de amplia bibliografía y ejecutar los procesos relacionados al ambiente. (Martínez J., Martín P., 2010)

Se han realizado estudios referente a la calidad del aire con la finalidad de detectar contaminantes que tomen en cuenta características espectrales identificando gases como óxidos de nitrógeno, ozono, azufre, monóxido de carbono y aerosoles (Martin, 2008; Meena, Londhe, Bhosale, & Jadhav, 2009).

2.2.1. Índices Ambientales

Los índices ambientales generados a partir de la combinación espectral de las imágenes satelitales, permiten destacar parámetros del territorio. En la actualidad, los índices ambientales tienen propósitos investigativos, siendo útiles para localizar problemas ambientales tal como es la contaminación del aire; además, como éste método se puede lograr similar beneficio que el índice de calidad ambiental (ICA). Para un adecuado análisis a partir de los índices ambientales, es necesario haber realizado una corrección radiométrica y atmosférica de las bandas multispectrales y térmicas. (Santana L., Escobar L., Capote P., 2010)

2.2.1.1. Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI)

NDVI es el índice de cobertura vegetal más utilizado propuesto por Rouse et al., (1974), que mediante sus valores puede reflejar zonas con densa y escasa vegetación. Es necesario éste índice por que la contaminación atmosférica es inversamente proporcional con la cantidad de cobertura vegetal existente. Para calcular éste índice son necesarios los valores de las bandas roja e infrarroja del espectro electromagnético. (Díaz Cervigón, Juan José, 2015).

Ec. 8

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano (Banda 4 en Landsat 7, banda 5 en Landsat 8)

RED = Rojo (Banda 3 en Landsat 7, banda 4 en Landsat 8)

2.2.1.2. Índice de Humedad en las Hojas (LWCI)

LWCI, Leaf Water Content Index, es el índice de humedad en las hojas que ayuda a determinar el contenido de agua, dicho índice fue propuesto por Hunt et al. (1987), se basa en la interrelación entre las reflectividades en el

infrarrojo de onda corta (SWIR) y en el infrarrojo cercano (NIR). (Santana L., Escobar L., Capote P., 2010)

Ec. 9

$$LWCI = \frac{-\log(1-(NIR-SWIR))}{-\log(1-(NIRFT-SWIRFT))}$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano

SWIR = Infrarrojo de Onda Corta

NIRFT = Valor máximo Infrarrojo Cercano

SWIRFT = Valor máximo Infrarrojo de Onda

2.2.1.3. Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)

El índice SAVI propuesto por Huete (1988). Índice que es más sensible a la variación atmosférica que a la variación de la cobertura vegetal, apropiada para regiones que tienen baja cubierta vegetal. Actúa con la banda roja y el infrarrojo cercano. (Sobrino, 2000)

Ec.10

$$SAVI = \frac{(1+L)(NIR - R)}{(L+NIR+R)}$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

R = Rojo Banda 3 en Landsat 7

L = Coeficiente de ajuste de la vegetación, equivalente a 0,5; (Cosero., et al. 1998)

2.2.1.4. Índice Normalizado de Suelos (NSI)

Este Índice Normalizado de Suelos, propuesto por Roger y Kearney (2004), dicho índice ayuda a tener mayor respuesta de reflectancia en zonas construidas y suelo desnudo, puesto que son mayormente reflectadas en el

NIR (infrarrojo Cercano) y SWIR (Infrarrojo de onda corta). Este índice es de gran beneficio debido a que la contaminación es directamente proporcional con las zonas de construcción, debido a que en dichas zonas hay mayor movilización de transporte y consecuentemente mayor contaminación por el consumo de combustibles. (Gonzaga, 2014)

Ec. 11

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

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7, banda 5 en Landsat 8

SWIR = Infrarrojo de onda Corta Banda 5 en Landsat 7, banda 6 en Landsat 8

2.3. Modelos de regresiones

En análisis de regresión el objetivo principal de construir un modelo de regresión puede ser, por ejemplo, evaluar cómo afecta el cambio en unas características determinadas (variables independientes) sobre otra característica en concreto (variable dependiente); otro objetivo de las regresiones es, intentar estimar o aproximar el valor de una característica (variable dependiente) en función de los valores que pueden tener otras características (variables independientes), también se denominan modelos con fines predictivos (Peláez, 2006).

2.3.1. Regresiones lineales simples y múltiples

Las regresiones lineales son un técnica estadística utilizada para ver la relación entre variables, en el caso más simple, se ajusta a la ecuación de la recta los valores de la variable independiente X1 a la variable dependiente Y, es decir: (Universidad de Alicante, 2015).

$$Y = b_0 + b_1 X_1$$

La regresión lineal múltiple se basa en obtener una relación lineal entre un conjunto de variables independientes X_1, \dots, X_n con una variable dependiente Y , es decir:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_nX_n.$$

2.3.2. Regresiones no lineales

Los modelos no lineales se originan cuando un investigador obtiene, por el desarrollo de una teoría una relación funcional en la que los parámetros son no lineales. (Rivas, s.f.). En la Figura 10, se presentan las funciones más utilizadas:

i) Polinomiales	
a) Lineales	
$f(x, a) = a_0 + a_1x$	$a = (a_0, a_1)$
b) Cuadráticas	
$f(a, x) = a_0 + a_1x + a_1x^2$	$a = (a_0, a_1, a_2)$
c) En general de grado menor o igual a m	
$f(a, x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$	$a = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_m)$
ii) Potenciales	
$f(x, a) = a_0 \cdot x^{a_1}$	$a = (a_0, a_1)$
iii) Exponenciales	
$f(x, a) = a_0 \cdot (a_1)^x$	$a = (a_0, a_1)$
iv) Logarítmicas	
$f(x, a) = a_0 + a_1 \ln x$	$a = (a_0, a_1)$

Figura 10: Tipos de regresiones

Fuente: Claudia Minnaard, s.f.

2.3.3. Coeficiente de Determinación

Se define el coeficiente de determinación como la parte relativa de la variación total que viene explicada por la regresión. (Minnaard, s.f.); dicho coeficiente mide el grado de intensidad de posible relación que pueden existir entre variables.

Según (Acuña, s.f.) se puede analizar el factor determinante se debe considerar lo siguiente:

“El coeficiente de determinación toma valores entre 0 y 1. ($0 \leq R^2 \leq 1$), entre los valores se acerque a 1, será mejor el ajuste de las variables utilizadas. Un R^2 mayor del 70 % indica una buena asociación lineal entre las variables, luego la variable X puede usarse para predecir Y; el coeficiente R^2 indica qué porcentaje de la variabilidad de la variable de respuesta Y es explicada por su relación lineal con X”.

2.4. Ecuación empírica para estimar el NOx

La propuesta de aplicar ecuaciones mediante modelos matemáticos para estimar un contaminante atmosférico a partir de imágenes de satélite, a fin de verificar la utilidad de imágenes de satélite en estimar la calidad ambiental. La ecuación 12, fue planteada en un estudio denominado “Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing: A Case Study in Makkah, Saudi Arabia” (Universiti Sains Malaysia, 2010), misma que ha sido aplicada en la ciudad de Quito y Cuenca para estimar el contaminante PM10 (Alvarez, 2016), (Abad, 2016). Sin embargo, no ha sido comprobada para otro contaminante. La siguiente ecuación se utiliza la información de tres años progresivos de contaminante gaseoso NOx.

Ec. 12

$$NOx = e_0Ratm_1 + e_1Ratm_2 + e_2Ratm_3$$

Donde,

NOx = Óxidos de Nitrógeno calculado desde imágenes Landsat.

$Ratm_i$ = reflectancia atmosférica por cada banda

e_j = coeficientes algoritmos resultante de la ecuación con mejor R^2

2.5. Contaminación Atmosférica

Es el cambio no deseado en las características físicas (color o temperatura), químicas (concentración de elementos o sustancias químicas) o biológicas (presencia de microorganismos) de la atmósfera, alteración de la atmósfera, que causa o puede potencialmente causar daño sobre la salud y el bienestar de los seres humanos y otros seres vivos y/o que afecta el funcionamiento de los ecosistemas. (Valiente, 2009)

2.5.1. Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito

En el Distrito Metropolitano de Quito se han realizado varios estudios a nivel local sobre los contaminantes atmosféricos que diariamente los quiteños están expuestos. Desde el año 2002, la Secretaria del Ambiente de Quito ha implementado métodos de monitoreo y control del aire mediante una Red de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ), a través de la cual, se puede dar seguimiento sobre Calidad del Aire. Ésta red se encuentra compuesta por una Red Automática (RAUTO), Red de Monitoreo Pasiva (REMPA), Red de Deposito (REDEP), Red Activa Material Particulado (RAPAR) y Red Meteorológica (REMET). La conformación de la Red REMMAQ, ha sido de gran beneficio para Quito y sus alrededores puesto que, ha sido útil para llevar a cabo los análisis ambientales, control y manejo del aire de Quito, como el programa de mejoramiento del aire CORPAIRE.

2.5.1.1. Red Automática (RAUTO)

Esta red se encuentra compuesta por ocho estaciones fijas con capacidad para analizar automáticamente gases y partículas, entre éstos, se encuentran los siguientes contaminantes comunes del aire: Monóxido de carbono (CO), Dióxido de azufre (SO₂), Óxidos de nitrógeno (NO, NO₂ y NO_x), Ozono (O₃), material particulado fino o de diámetro menor a 2.5 micras (PM_{2.5})

y material particulado de diámetro inferior a 10 micrómetros (PM_{10}). Ver en la Figura 11.

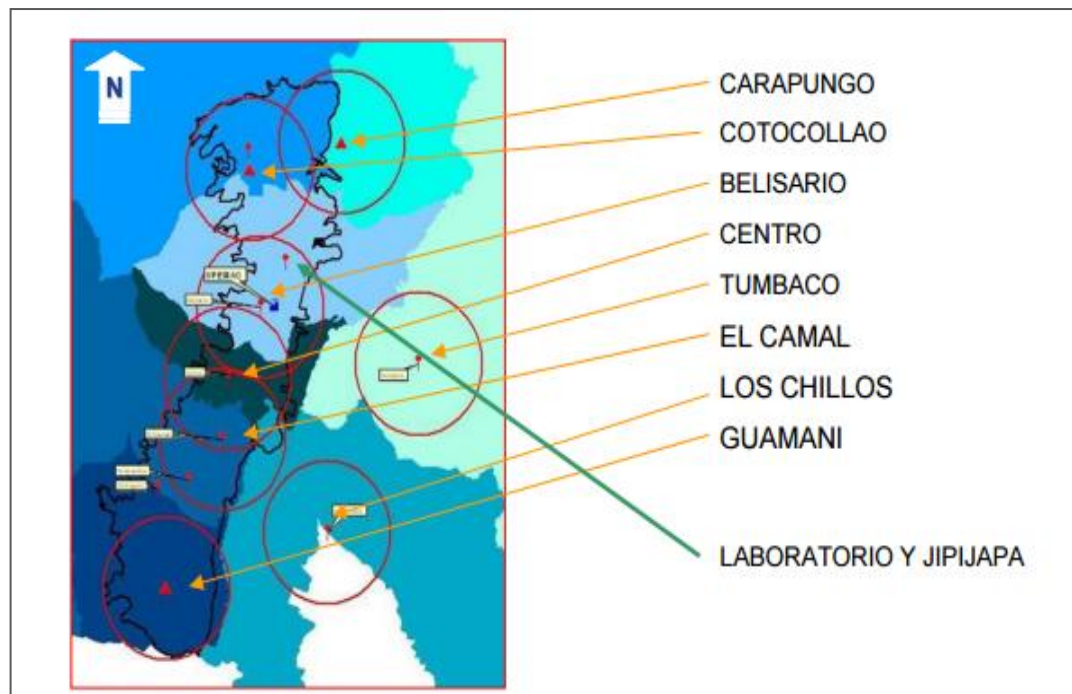


Figura 11: Localización de estaciones de Monitoreo REMMAQ

Fuente: Secretaria del Ambiente, s.f.

2.5.1.2. Medición de Contaminantes

Las mediciones de los contaminantes es realizada por la Secretaria del Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito desde año 2002, conlleva a procedimientos para evaluar la cantidad de contaminante que se encuentra en la atmósfera, estas mediciones son fundamentales para tener un diagnóstico de las condiciones del aire a fin de tomar decisiones y acciones de control. A continuación se muestra una tabla donde indica la técnica de medición de los contaminantes, que actualmente se lleva a cabo por la Secretaria del Ambiente.

Tabla 4: Métodos de medición de contaminantes

Contaminante	1.3.2.1.1.1.1.1 Número equipos	Ubicación	Método de medida o principio de operación	Marca y modelo
Material particulado PM ₁₀	4	Tum, Gua, Car, Sap	Atenuación de rayos beta (Método equivalente para PM ₁₀ EPA No. EQPM-1102-150)	Thermo Scientific/FH62C14
Material particulado PM _{2.5}	6	Bel, Cam, Cen, Cot, Car, Sap	Atenuación de rayos beta (Método equivalente para PM ₁₀ EPA No. EQPM-1102-150)	Thermo Andersen / FH62C14
Dióxido de azufre (SO ₂)	7	Bel, Cam, Cen, Tum, Cot, Car, Chi	Fluorescencia por pulsos de luz ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQSA-0486-060)	THERMO 43C / 43i
Dióxido de azufre (SO ₂)	2	Laboratorio Estándares, E. móvil	Fluorescencia ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQSA-0495-0100)	TELEDYNE API / T100
Ozono (O ₃)	10	Bel, Cam, Cen, Tum, Chi, Cot, Car, Gua, Jip*, Lab. Electrónico	Absorción de luz ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQQA-0880-047)	THERMO 49C / 49i
Ozono (O ₃)	2	Laboratorio Estándares, E. móvil	Absorción de luz ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQQA-0992-087)	TELEDYNE API / T400
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	8	Bel, Cam, Cen, Cot, Car, Gua, Jip, Chi	Quimiluminiscencia (Método de referencia EPA No. RFNA-1289-074)	THERMO 42C / 42i
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	2	Laboratorio Estándares, E. móvil	Quimiluminiscencia (Método de referencia EPA No. RFNA-1194-099)	TELEDYNE API / T200

Fuente: Secretaria del Ambiente, 2015

2.5.2. Fuentes de emisión

Las fuentes de emisión son aquellas que liberan o pueden liberar contaminantes gaseosos o particulados al aire, estas pueden ser fuentes naturales o fuentes antropogénicas. En el Distrito metropolitano de Quito se observa que a mayor proporción de contaminación se retribuye al parque automotor. (INEC, 2015)

2.5.3. Contaminantes

4.1.8.3.4. Óxidos de Nitrógeno

Según (Valiente, 2009) los óxidos de nitrógeno (NO_x) son considerados como la suma de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de nitrógeno (NO₂), las principales fuentes son todas las combustiones que tienen lugar a alta temperatura. Además los NO_x, contribuye a fenómenos nocivos como: la lluvia

ácida, generación de ozono en la tropósfera, smog fotoquímico y la eutrofización en las zonas costeras (Secretaría del Ambiente Quito, 2017).

La concentración de los NO_x ha incrementado significativamente en los últimos 100 años, por lo tanto, resulta importante tener conocimiento en el origen de éste contaminante. Existen fuentes antropogénicas como: procesos industriales y actividad humana y fuentes naturales como: procesos de quema de biomasa, océanos, suelo. (Galán D., Fernández R., 2006)

(Condorchem, 2015), empresa especializada en emisiones atmosféricas industriales, expresa que “los óxidos de nitrógeno no son los únicos contaminantes de la atmósfera, pero si son de los principales contaminantes en importancia”, esto es debido a la fácil interconversión en presencia del oxígeno, el 70 % corresponde al transporte y el 30 % al industria. En consecuencia este contaminante cause efectos en la salud tales como: inflamación de las vías aéreas, afección a los órganos y sistemas como: el sistema respiratorio y circulatorio, además de efectos sobre el medio ambiente, mediante la limitación del crecimiento vegetal, afecciones metabólicas y eutrofización de ecosistemas. (Ministerio del Medio Ambiente de Gobierno de España, 2016).

Los estudios realizados con imágenes de satélite tienen como fin realizar análisis a nivel mundial sobre la problemática con los gases de invernadero. Se han realizado varias misiones de lanzamiento de satélites que monitoreen la contaminación atmosférica, obteniendo resultados sobre el Ozono, Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono, Dióxido de Nitrógeno, en éste último contaminante fue medido por Envisat's Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (SCIAMACHY), instrumento que registra el espectro de la luz del sol que brilla a través de la atmósfera. (Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid, 2007)

2.6. Fundamento Teledetección y Contaminación Atmosférica

En el ámbito de la contaminación existen varios proyectos investigativos que han generado estudios a partir de la teledetección usando imágenes de satélite, entre estos se encuentran el estudio realizado en Cali-Colombia denominado: **“Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite”** (Santana L., Escobar L., Capote P., 2010), mediante el cual se estimó un robusto índice de la calidad ambiental a partir de índices ambientales. Otro estudio fundamentado es: **“Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing: A Case Study in Makkah, Saudi Arabia”** (Universiti Sains Malaysia, 2010), donde se propuso un algoritmo que relaciona la reflectancia con la estimación del PM10, en dicho estudio se obtuvieron resultados acorde al análisis de modelo estadísticos, los resultados proporcionan confianza en que los algoritmos multiespectrales PM10 y pueden hacer predicciones precisas de las concentraciones de PM10.

Mientras que en Ecuador se ha realizado estudios sobre: la **“Estimación de contaminación del aire por PM10 en Quito determinado por índices ambientales obtenidos con Imágenes Satelitales Landsat ETM+”** (Alvarez, 2016), mediante el cual, se demuestra la utilidad de las imágenes de satélite para estimar el PM10 y la alta correlación con las imágenes multiespectrales. El mismo estudio fue realizado en Cuenca con el proyecto: **“Estimación de la concentración de Material Particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana de la ciudad de Cuenca”** (Abad, 2016). Todos los estudios antes mencionados, fueron ejecutados con el fin de estimar el Material Particulado PM10. Además, se ha revisado bibliografía en donde analizó análisis del infrarrojo para detección de gases atmosféricos, el proyecto denominado “Teledetección infrarroja de gases atmosféricos mediante espectroradiometría FTIR” (Briz, 2004), en estos

proyectos se aplican los principios de estudios del espectro electromagnético a fin de determinar gases contaminantes.

2.7. Software de investigación

ENVI: Es el software especializado en el procesamiento y análisis de imágenes. ENVI soporta imágenes obtenidas de numerosos tipos de satélites y productos multiespectrales, hiperespectrales, radar, LiDAR, térmico, etc.; además proporciona herramientas de pre-proceso automático que permiten obtener información a través de sencillos flujos de trabajo. (Geoservice Perú, s.f.)

R: Es un software libre con lenguaje para el cálculo estadístico y la generación de gráficos. Es un entorno de análisis y programación estadísticos con el que se añaden nuevas técnicas mediante la definición de funciones. (Universidad de Granada, 2016)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En el presente proyecto se definirá una metodología que tiene como objetivo estimar el contaminante gaseoso NO_x utilizando imágenes satelitales, para ello, se deberá realizar las correcciones para cada imagen satelital, obteniendo un imagen con valores de reflectancia atmosférica. Además, se realizará los cálculos de índices ambientales, para validar la ecuación que pueda determinar el mejor resultado espectral (índices ambientales y/o reflectancia atmosférica) que represente al contaminante gaseoso NO_x, a través de coeficiente determinante R².

Se utilizará el método experimental, inductivo y comparativo a lo largo del proyecto. El método experimental se aplicará al momento de controlar las variables y así determinar la relación entre ellas; el método comparativo, se llevará a cabo al momento de obtener todas las ecuaciones obtenidas y analizar entre sí para elegir el mejor resultado; finalmente el método deductivo se aplicará cuando se obtengan las conclusiones de la investigación.

La metodología partirá de validar la ecuación planteada por la Universidad de Sains de Malaysia en su artículo de investigación “Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing: A Case Study in Makkah, Saudi Arabia”, dicha ecuación también fue comprobada en Ecuador con el PM₁₀ a través del estudio ejecutado por (Alvarez, 2016), mientras que para el presente proyecto se utilizará la misma metodología con el NO_x. Las imágenes satelitales fueron escogidas en tres años diferentes, a fin de verificar la coherencia de los resultados obtenidos, es decir, si un determinado resultado es válido para un año, se debe comprobar también con años siguientes, de esa forma se confirmará los resultados de la

investigación. En la Figura 12, se muestra de manera general el procedimiento a seguir en el proyecto

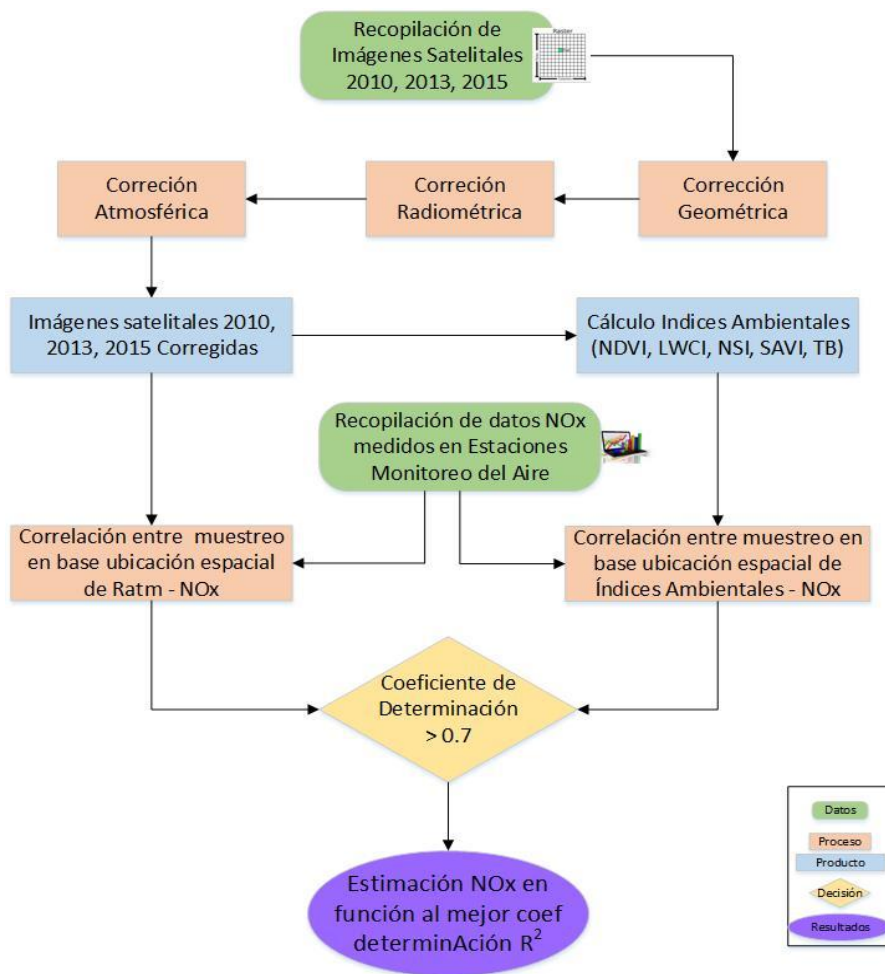


Figura 12: Flujograma metodológico para ejecutar investigación

3.1. Recopilación de información

3.1.1. Recopilación de imágenes satelitales

Se utilizó información secundaria de libre descarga, a través de la página de GLOVIS (<https://glovis.usgs.gov/>), se escogieron tres imágenes satelitales de los años 2010, 2013 y 2015, conforme a la Tabla 5, donde también se detalla el sensor utilizado:

Tabla 5: Imágenes satelitales utilizadas en el proyecto

NOMBRE IMAGEN	SENSOR	FECHA
LANDSAT_7	ETM	09 septiembre 2010
LANDSAT_7	ETM	19 octubre del 2013
LANDSAT_8	OLI	15 septiembre 2015

Las imágenes satelitales no deben tener más del 5% de nubosidad sobre la zona de estudio, puesto que esto dificultaría el análisis para estimación del contaminante. Las tres imágenes utilizadas se encuentran libres de nubosidad y corresponden en gran mayoría a la zona urbana de Quito y sus alrededores. Así también, la selección de imágenes fue cada tres años, donde las primeras imágenes presentan el problema de gaps (SDL), que serán corregidos oportunamente.

3.1.2. Recopilación de datos NOx

Los datos de medición de los Óxidos de Nitrógeno, se ha obtuvieron de los datos medidos en campo que dispone la Secretaria del Ambiente de Quito, que es una institución altamente equipada con tecnología que le permite medir contaminantes como: CO, NO₂, O₃, SO₂, PM_{2.5} y PM₁₀. Los equipos de medición forman una red a nivel del todo el Distrito Metropolitano de Quito, dicha red se llama REMMAQ (Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito). Los datos se encuentran disponibles en la página de la Secretaría del ambiente, en la siguiente URL: <http://190.11.24.212/reportes/ReporteDiariosData.aspx>

3.2. Software utilizado

El software utilizado se detalla brevemente en el capítulo 2. Para fines de proyecto a continuación se describe el uso específico dentro de la investigación: ENVI 5.1: para el análisis digital de imágenes y R: software estadístico que permite realizar cálculos y regresiones.

3.3. Corrección Geométrica

Las tres imágenes Landsat se encuentran con una corrección geométrica realizada por datos de posicionamiento y las efemérides del satélite (Geoservice, 2009). El tipo de dato "L1T" visualizado en los metadatos (Ver figura 13), significa que utilizaron puntos de control terrestre (CPF) y modelos digitales de elevación (MDE) para realizar la corrección geométrica, por lo tanto, las imágenes utilizadas para a investigación se encuentra libre de distorsiones relacionadas con el sensor. El argumento matemático que sustenta éste proceso es mediante el cálculo de coeficientes polinómicos tal como describe la **Ec1** del capítulo 2.

```

DATA_TYPE = "L1T"
ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
EPHEMERIS_TYPE = "DEFINITIVE"
SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_7"
SENSOR_ID = "ETM"

GROUND_CONTROL_POINT_FILE_NAME = "LE70100602010252ASN00
_GCP.txt"
METADATA_FILE_NAME = "LE70100602010252ASN00_MTL.txt"
CPF_NAME = "L7CPF20100701_20100930.13"
END_GROUP = PRODUCT_METADATA
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES|
CLOUD_COVER = 35.00
IMAGE_QUALITY = 9
SUN_AZIMUTH = 79.10272590
SUN_ELEVATION = 61.36856777
GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 1
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 94
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 5.344
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 3.652
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 3.902

```

Figura 13. Metadato imagen Landsat año 2010.

Adicionalmente, se comparó la exactitud posicional con la cartografía escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM) y con la Ortofoto de Quito del año 2009 proporcionada por el IGM como archivo histórico de dicho Instituto.

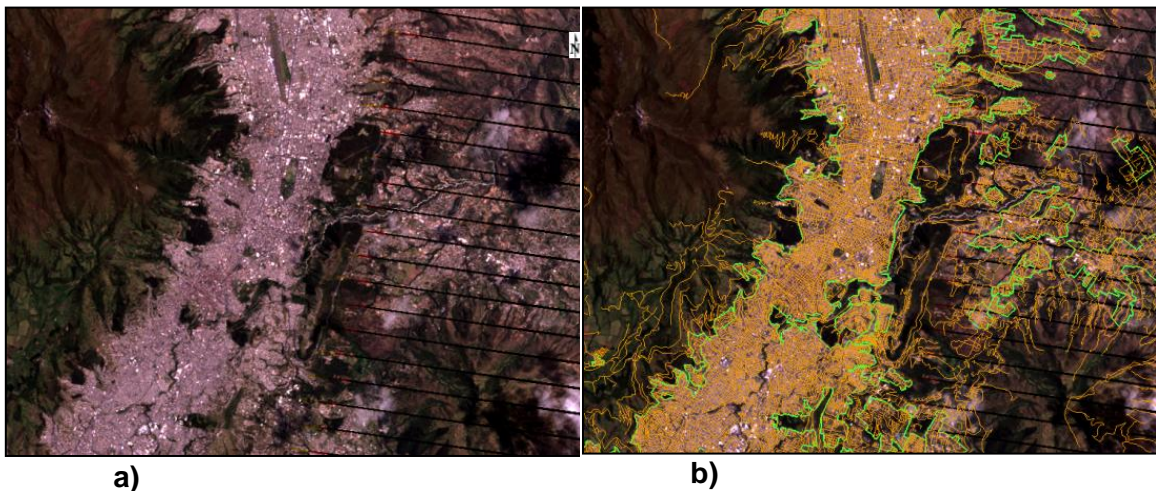


Figura 14. a) Imagen Sat. de Quito, b) Verificación cartografía IGM

3.4. Corrección Radiométrica Multiespectral (CRM)

Para realizar la corrección radiométrica en las imágenes Landsat, en cada una se utiliza el metadato de la imagen que contiene información de los números digitales y se realiza el cálculo de la radiancia, con las siguientes unidades $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$. Referencia teórica **Ec2 y Ec3**.

En el metadato se puede visualizar las seis bandas con información multiespectral para las imágenes Landsat 7 TM año 2010 y 2013, mientras que la Landsat 8 OLI del 2015 se utiliza las ocho bandas multiespectrales. Ver Figura 15.

Units	Band Names	Wavelengths	FWHM	Radiance Gains	Radiance Offsets	Reflectance
		μm	μm	$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$	$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$	
1	Band 1	0.483	0.07	1.181	-7.38071	
2	Band 2	0.56	0.08	1.21	-7.60984	
3	Band 3	0.662	0.06	0.943	-5.94252	
4	Band 4	0.835	0.12	0.969	-6.06929	
5	Band 5	1.648	0.2	0.191	-1.19122	
6	Band 7	2.206	0.26	0.066	-0.4165	

Figura 15. Metadato imagen Landsat año 2010.

Para empezar con el procesamiento de imágenes, se realiza la delimitación de área de estudio, donde se va a aplicar los algoritmos introducidos en herramientas de ENVI. Ver Figura 16

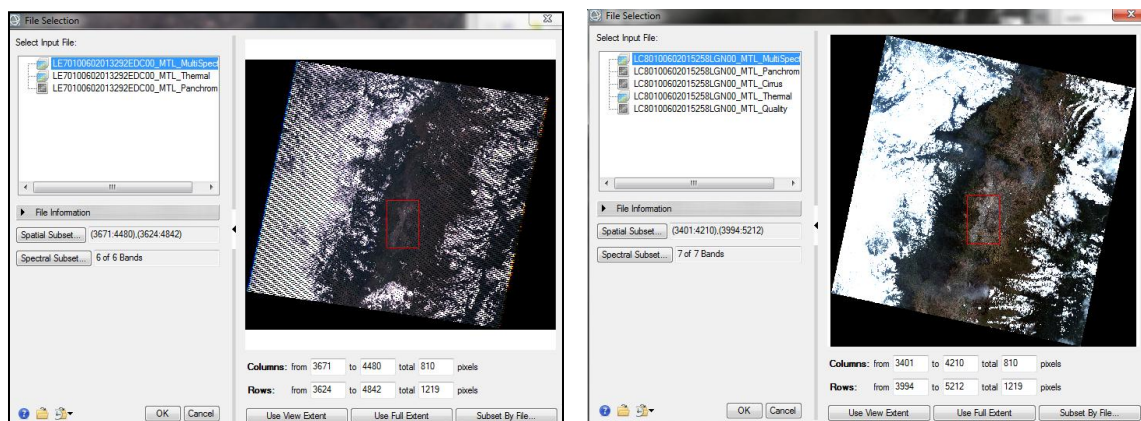


Figura 16: Definición del área de estudio en ENVI.

3.4.1. Cálculo de la radiancia

Se selecciona el método de intercalación por línea con un factor de escala establecido por ENVI que es 0.1, que permite optimizar tiempo en las conversiones para hallar al radiancia espectral, además ésta herramienta tiene la opción de cargar la configuración adecuada para posteriormente aplicar la herramienta de FLAASH para realizar la corrección atmosférica (Ver Figura 15).

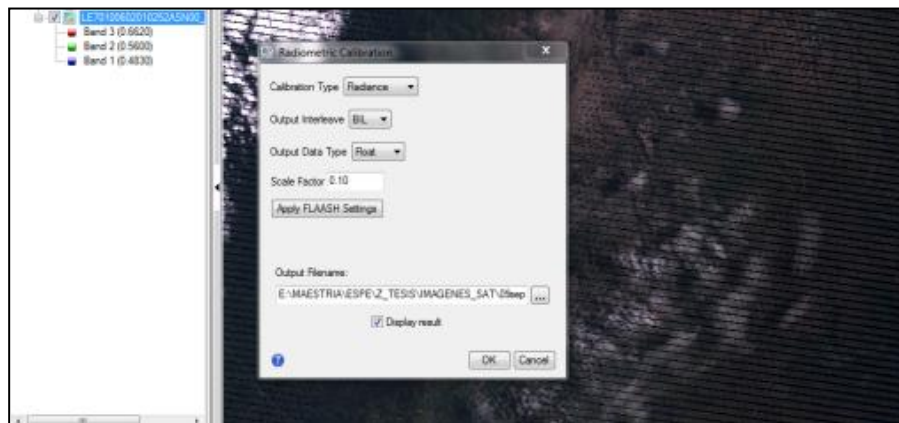


Figura 17: Cálculo de la Radiancia

En la Figura 18 se presenta la imagen satelital con ND propias de la imagen, mientras que en la Figura 19, existe se visualiza la imagen con valores de radiancia.

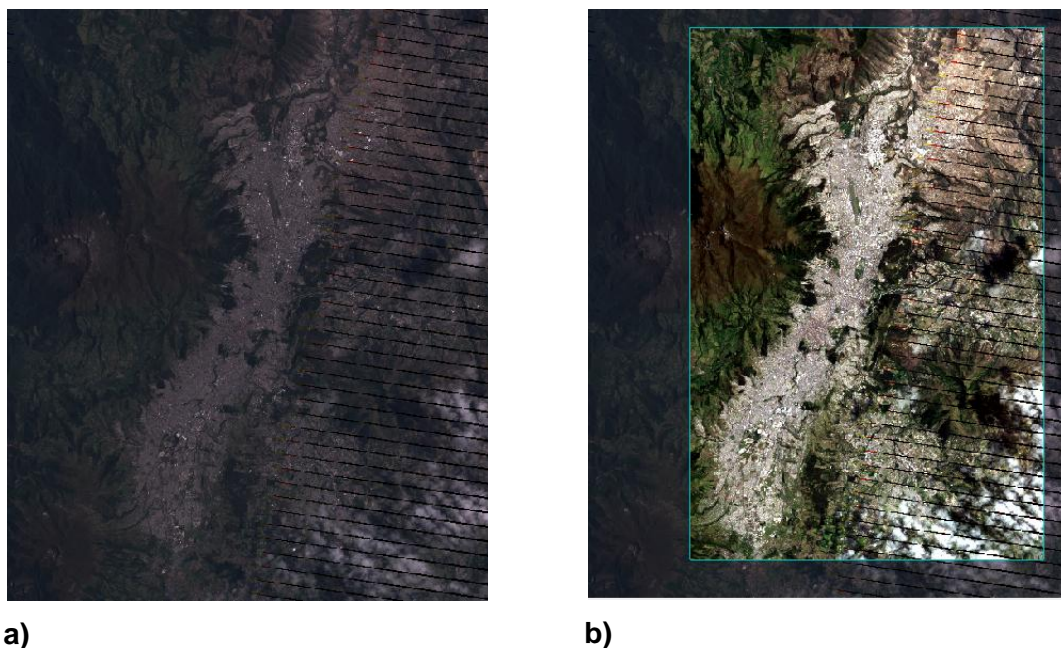


Figura 18: a) Imagen con ND, b) imagen con valores de radiancia

3.4.2. Transformación de radiancia a valores de reflectancia atmosférica

En éste procedimiento se utiliza el módulo FLAASH de ENVI, éste modulo realiza internamente la conversión a valores de reflectancia (**Ec.4**), posteriormente utiliza esta reflectancia como insumo para realizar la corrección atmosférica (**Ec5**). En la aplicación del algoritmo FLAASH, se considera varios parámetros entre éstos características propias de la zona de estudio y también información de la adquisición de imagen de satélite. Ver Figura 19.

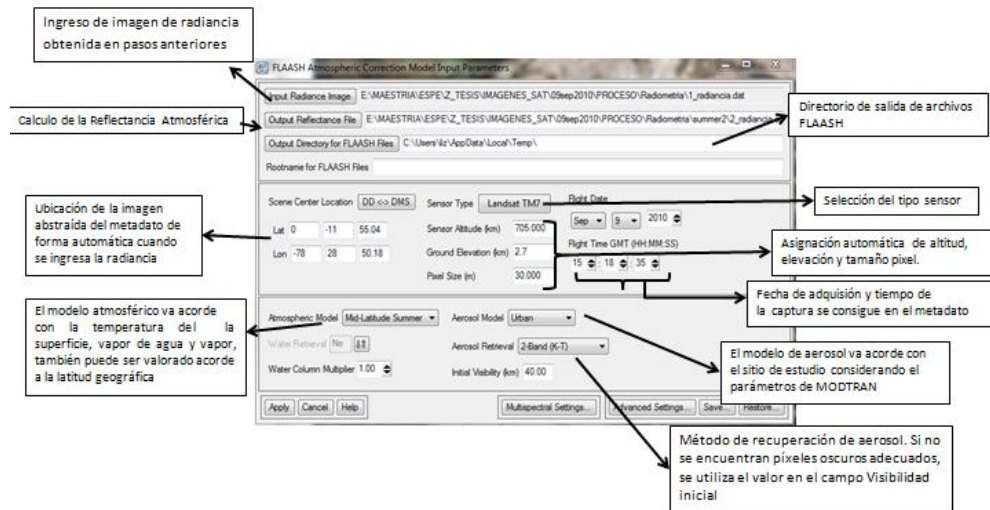


Figura 19: Parámetros de Algoritmo FLAASH en ENVI

El método de FLAASH refleja como archivos de salida una imagen con valores de reflectancia, donde se ha eliminado los problemas producidos por factores que se encuentran en la atmósfera, además para obtener un mejor resultado considera modelos Atmosféricos acorde con las condiciones del lugar de estudio, para éste caso el modelo atmosférico más apropiado resulta ser “Mid Latitud Summer” acorde con la temperatura media del lugar de estudio. En la Figura 21, literal b se visualiza el resultado obtenido a partir de la corrección atmosférica.

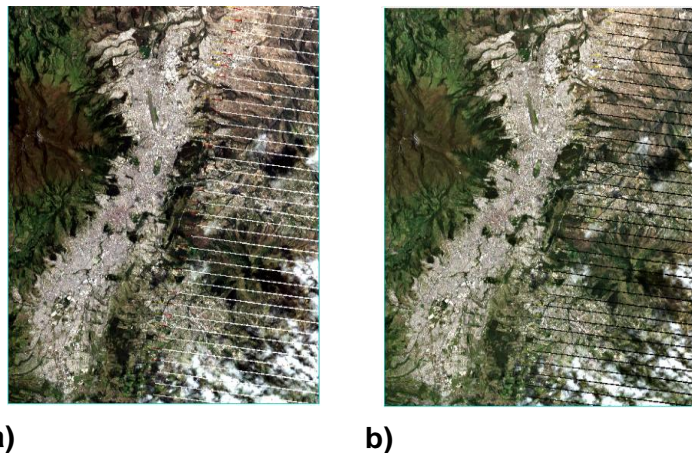


Figura 20: a) radiancia, b) reflectancia atmosférica.

El procesamiento con FLAASH se realizó en las tres imágenes satelitales, considerando la imagen de radiancia respectiva de cada año y datos propios como la fecha de adquisición, ubicación y tipo de sensor.

3.4.3. Comprobación de reflectancia atmosférica

Una vez obtenida la reflectancia con la corrección atmosférica, se realiza la verificación de valores a lo largo de la imagen mediante las firmas espectrales de cada objeto. En la Figura 21 se identifica los valores entre 0 y 10000, mediante la firma espectral cobertura vegetal.

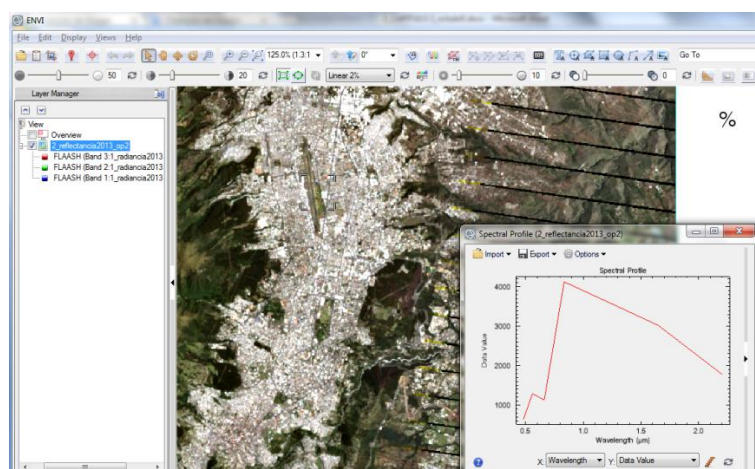
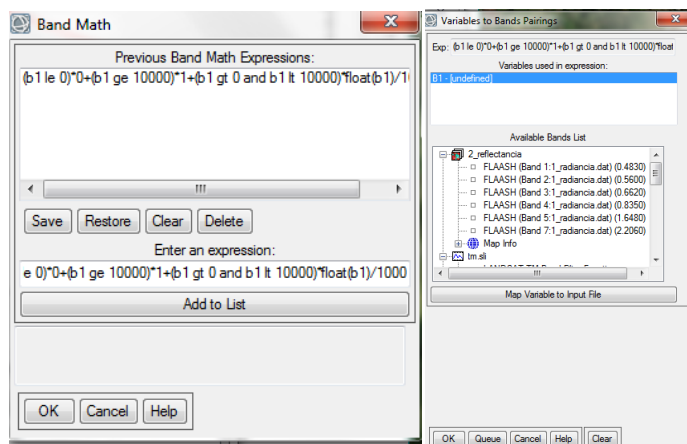


Figura 21: Imagen con valores de reflectancia

3.4.4. Recodificación de las imágenes

Es importante realizar la recodificación de las imágenes a fin de facilitar el manejo y análisis de los datos, puesto que los valores de reflectancia son expresados entre valores de 0 y 1 (García, 2013). Por lo tanto, en el software ENVI, se ingresa una expresión para convertir dichos valores. En éste caso, se digita la expresión con respecto considerando que (b1) es la representación de la imagen con valores de reflectancia atmosférica. Ver Figura 22.



Donde:
 le = menor o igual,
 ge= mayor o igual,
 gt=mayor que,
 le=menor que

Figura 22: Algoritmo para recodificación de valores de reflectancia

En la Figura 23 se realiza nuevamente la verificación de valores de reflectancia mediante la firma espectral sobre la cobertura vegetal, desplegando valores entre los rangos 0 y 1.

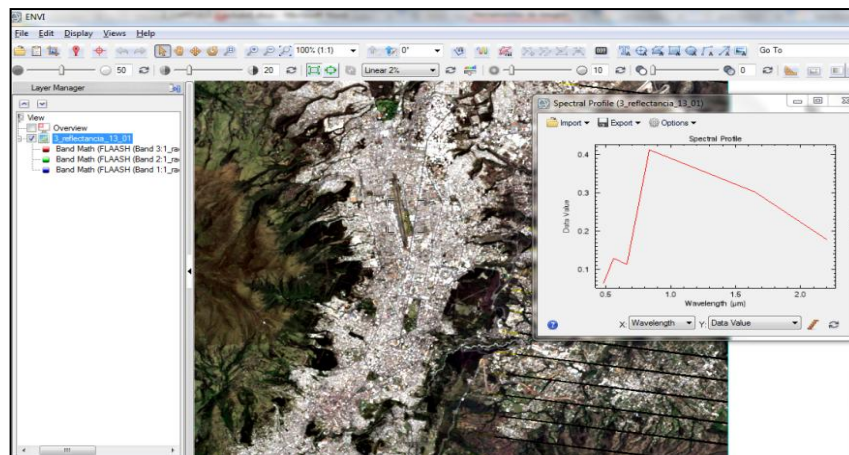


Figura 23: Imagen con valores de reflectancia entre 0 y 1

Éste procedimiento fue aplicado para las tres imágenes de estudio puesto que los valores de pixel variaban entre rangos similares. Con la recodificación en los valores de reflectancia, se evalúa las imágenes de los tres años, mediante los gráficos de firmas espectrales.

Las imágenes Landsat ETM del año 2010 y 2013, presentan problemas de pérdida de información de la línea de escaneo causa del error SLC, por lo

tanto, es necesario realizar las correcciones a fin de eliminar los píxeles que no tiene información.

3.4.5. Corrección de pérdida del corredor de línea de escaneo

Con las imágenes recodificadas se obtienen valores de reflectancia atmosférica en cada píxel. A partir de estas imágenes, se realiza las correcciones del error SLC, que presenta las imágenes Landsat ETM. Para realizar las correcciones de éste error, se utilizó una herramienta aplicada en el ENVI Classic, denominada *GapFill*, en la siguiente dirección: *BasicTools/PreProcessing/Data- Specific Utilities/Landsat ETM/GapFill*

El modelo GapFill fue diseñado para corregir el error de las imágenes Landsat mediante la interpolación entre píxeles adyacentes, en este proyecto se utilizó el método “**Basados en una sola imagen**”, que funciona mediante correlaciones entre los píxeles de la misma imagen. (JABAR, 2014) Ver Figura 24.

Según (Rodríguez, 2009), la corrección promedio del GapFill consisten en lo siguiente: Ubicar los píxeles vecinos que rodean el gap, hasta obtener la mínima cantidad requerida de píxeles comunes, 144 por sugerencia de USGS, luego realizar el cálculo de los coeficientes de la regresión lineal entre los píxeles comunes, ajustar los coeficientes, calcular la función con el valor del píxel válido y finalmente asignar el valor calculado al píxel inválido en la escena primaria.

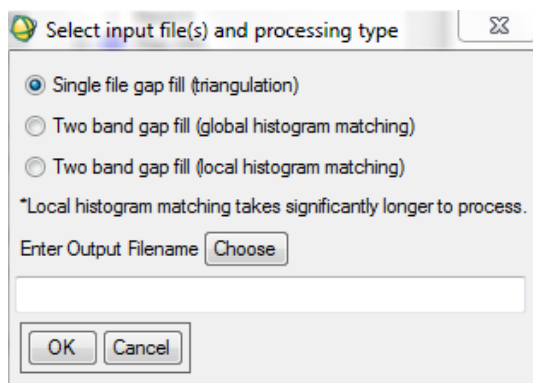


Figura 24: Entorno ENVI 5.1 GapFill.

Posteriormente, se obtienen una imagen con correcciones radiométricas y atmosféricas, sin pixeles negros, el procedimiento aplicado únicamente para Landsat ETM, es decir imágenes de los años 2010 y 2013, a fin de que sean útiles para el cálculo de índices ambientales y análisis de regresiones con datos de NOx.

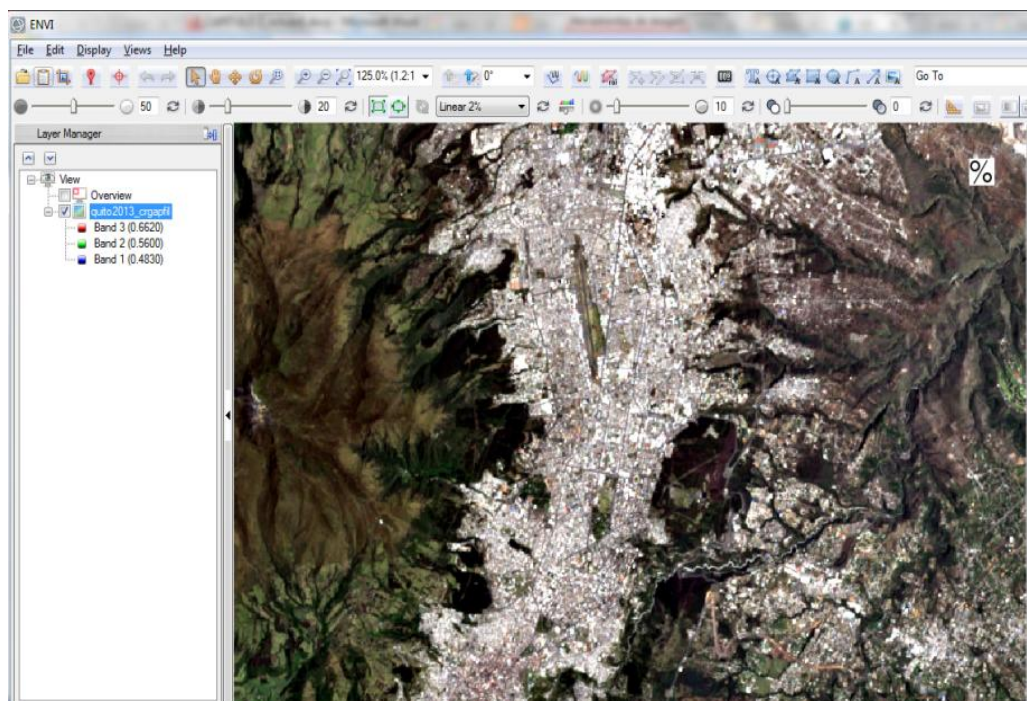


Figura 25: corrección de pixel por error SLC para imagen 2010

Se realiza una evaluación del estado de la imagen mediante un cómputo estadístico de los valores de los pixeles, donde los valores deben estar próximos a cero, tal como muestra la Figura 26.

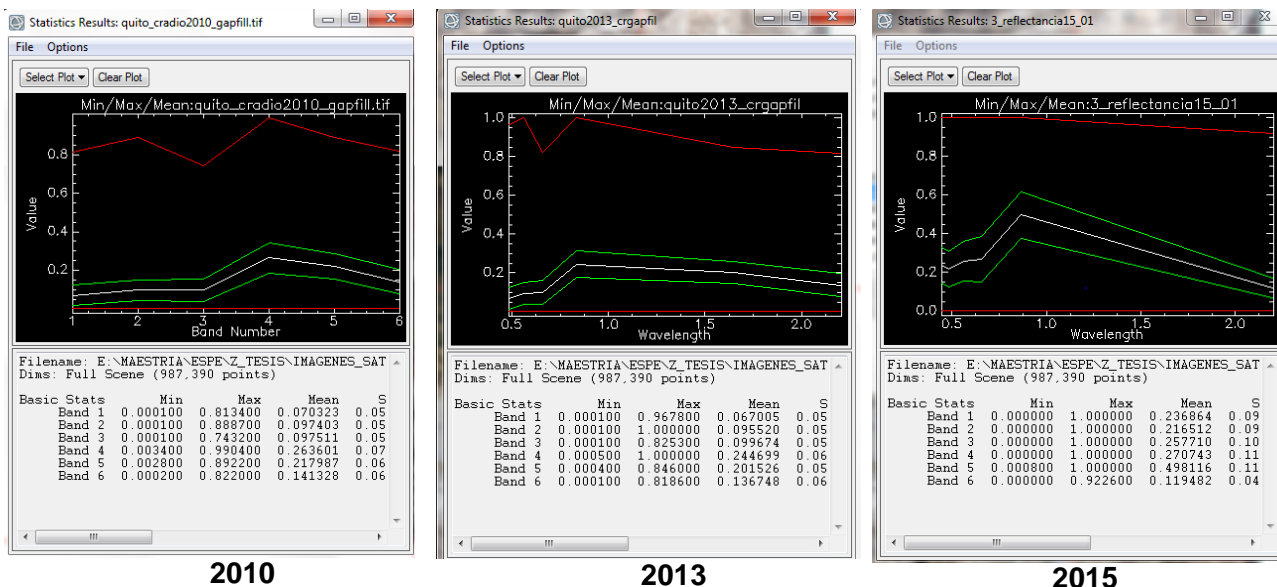


Figura 26: Cómputo de las imágenes resultante.

Los valores para cada banda se representan los valores mínimos cercanos a cero, por lo tanto las correcciones radiométricas y atmosféricas fueron realizadas con éxito. Finalmente se obtienen las imágenes definitivas con valores de reflectancia atmosférica para los años 2010 (Anexo2), 2013 (Anexo3) y 2015 (Anexo4).

3.5. Corrección Radiométrica Térmica (CRT)

Para el procesamiento de la corrección radiométrica se identifica la banda térmica mediante los valores en micrones que se encuentran el metadato de la imagen, éstos deben superar a los valores de micrones de una imagen multispectral. La aplicación de ésta herramienta se realiza a través del ENVI Classic en la siguiente dirección:

BasicTools/PreProcessing/CalibrationUtilities/LandsatCalibration

A continuación el la Figura 27, se observa los parámetros del metadato utilizados para corrección radiométrica térmica.

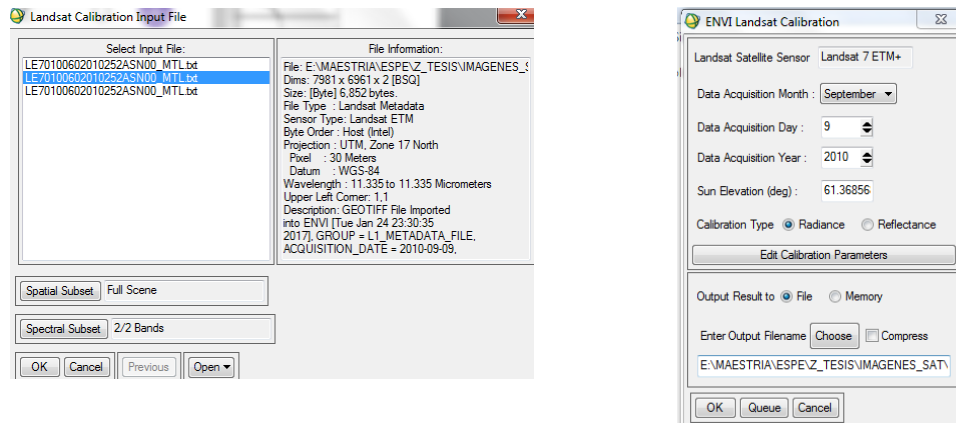


Figura 27: Información y parámetros de la banda térmica Landsat 2010.

La eliminación de los efectos causados en la atmósfera se plantea mediante los estudios preparados por Coll, referente a la calibración de la banda térmica. Para aplicar la corrección atmosférica de la banda térmica se aplicaron modelos obtenidos de la NASA a través de la Herramienta de Corrección Atmosférica (HCA) en la siguiente dirección: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>. En la Figura 28, muestra la aplicación generada por la NASA, donde se calcula los parámetros necesarios para la corrección de la banda térmica, a partir de la fecha de adquisición de la imagen.

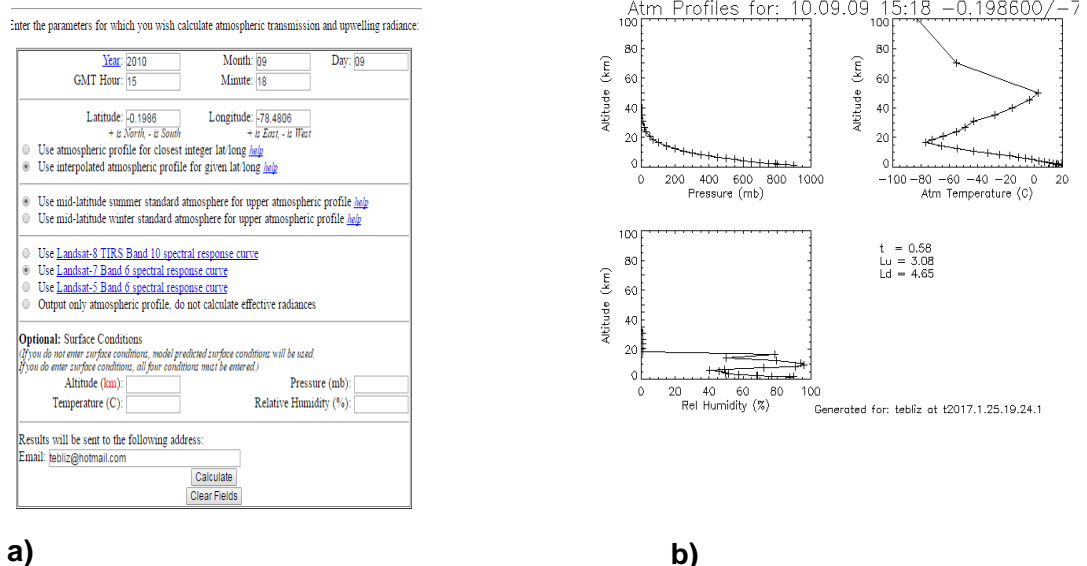


Figura 28: a) Modelo de la NASA imagen 2010, b) Parámetros para CRT

Con los datos ingresados para el cálculo del modelo se obtienen datos propiamente del clima que ayudarán a realizar la corrección radiométrica de la banda térmica. En la **Ec. 6** descrita en el Capítulo 2, consta la radiancia ascendente (L_u), descendente (L_d) y transmitancia (τ). En la Figura 29 se describe la Ec.6 mediante la herramienta de Band Math y considerando los valores proporcionados por el modelo de la NASA.

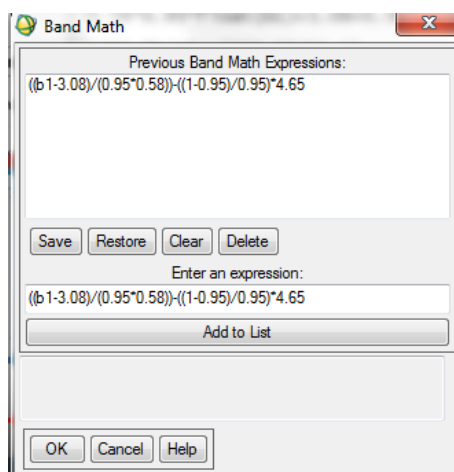


Figura 29: corrección atmosférica banda térmica en el Band Math

Con la imagen realizada la corrección atmosférica en la banda térmica con la **Ec.6**, se realizará el cálculo del índice ambiental de temperatura brillo.

3.6. Índices Ambientales

Los índices ambientales son parte fundamental para identificar el comportamiento del entorno ambiental y representar particularidades de la superficie terrestre a través de la respuesta espectral de cada imagen. Los índices ambientales en las imágenes resultantes, se representan en una escala de colores que permite identificar que pixeles tienen mayor y menor reflectancia.

3.6.1. Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI)

En éste análisis se utilizó la herramienta de ENVI denominada “NDVI Calculation Parameters”, donde se define el tipo de sensor y automáticamente utiliza las bandas que corresponden al NDVI, es decir, la banda roja e infrarroja de cada sensor. En la Figura 30 se visualiza que el sensor Landsat TM, se debe a las imágenes de los años 2010 y 2013, mientras que el sensor Landsat OLI a la imagen año 2015.

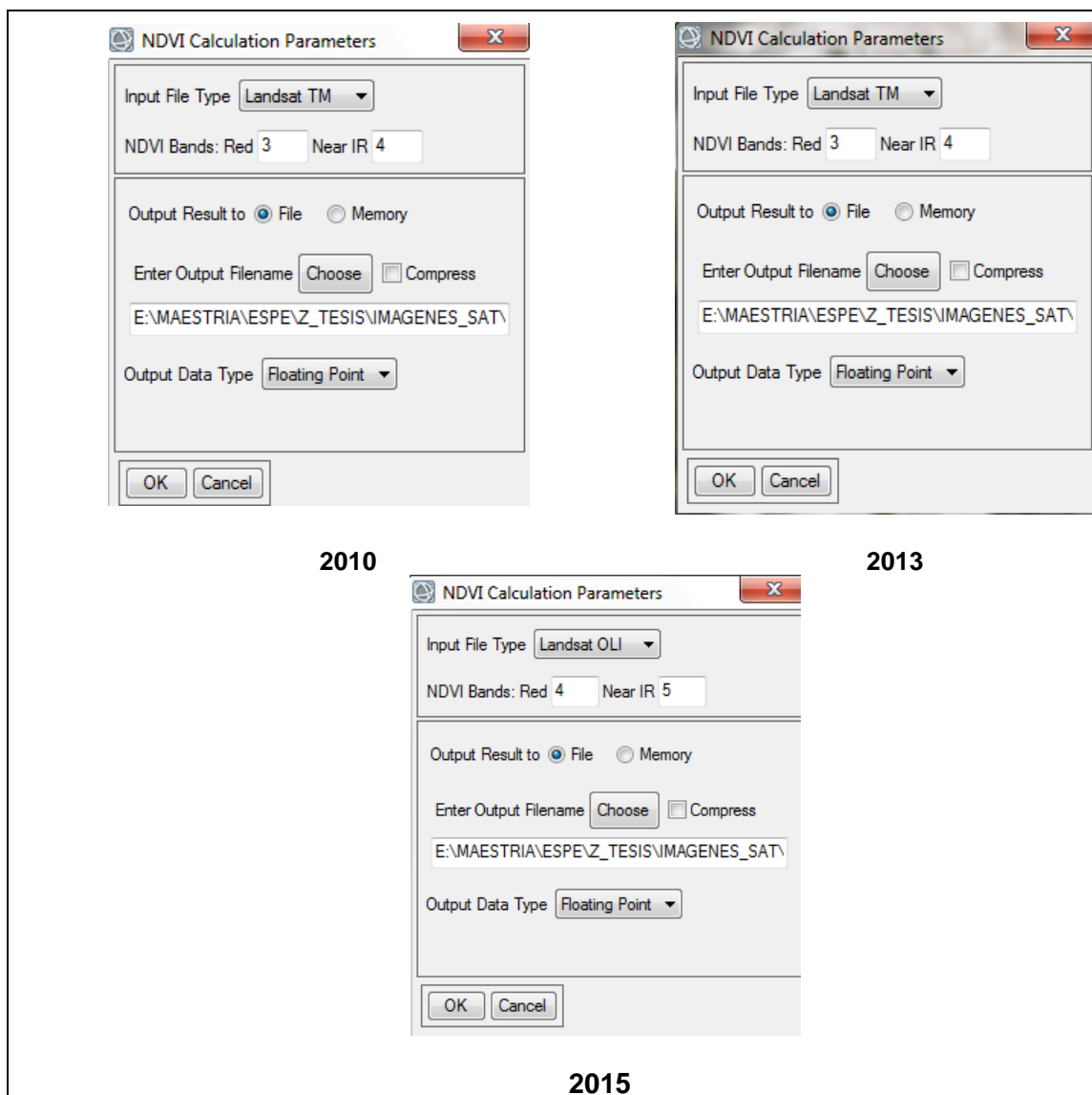


Figura 30: Herramienta con algoritmo para cálculo de NDVI para cada año

Los productos obtenidos a partir de la ejecución de dicho algoritmo aplicado en ENVI, se despliegan los resultados para cada año en la Figura 36 del capítulo 4.

3.6.2. Índice de Humedad en las Hojas (LWCI)

A fin de hallar el índice LWCI se ingreso **Ec. 9** de capítulo 2, en la herramienta “Band Math”, en ésta ecuación se debe considerar los valores máximos de las bandas Infrarrojo Cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), respectivos de cada imagen. Éstos valores fueron obtenidos a partir de la herramienta “Compute Statistics” misma que fue utilizada para verificación de las reflectancia en Figura 26.

En la Tabla 6, se resumen los valores máximos de las NIR Y SWIR para los tres años de estudio. En el año 2015 los valores que serán útiles para determinar el LWCI, corresponden a dos bandas 5 y 6, debido a que la adquisición de ésta imagen fue a partir sensor Landsat OLI, donde se recorre una banda con respecto a los sensores Landsat anteriores.

Tabla 6: Valores máximos NIR Y SWIR sensores Landsat

Landsat 7 ETM			Landsat 8 OLI	
Banda	9-Sep-10	19-Oct-13	15-Sep-15	Banda
B4 (NIR)	0.9904	1
B5 (SWIR)	0.8922	0.846	1	B5 (NIR)
	0.922	B6 (SWIR)

A continuación en la Figura 31, se presenta el uso de la herramienta “Band Math” en ENVI en donde los valores de la Tabla 6. Todos los valores son diferentes puesto que varían en función a las correcciones radiométricas y atmosféricas aplicadas en cada imagen. En los parámetros de la ecuación para

calcular el LWCI, se debe ingresar el logaritmo, mismo que se ejecuta con el término “alog” en software ENVI.

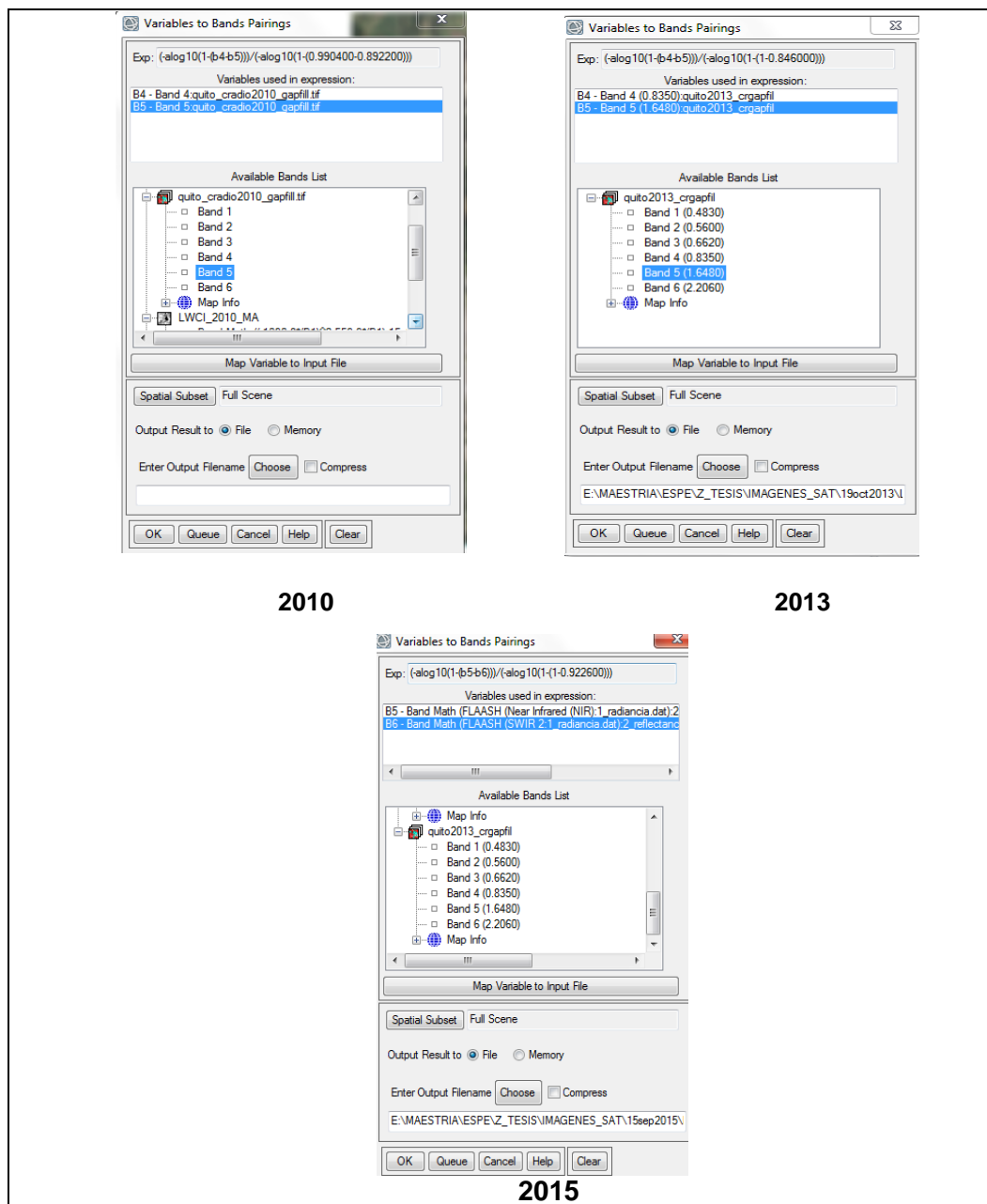


Figura 31: Herramienta con algoritmo para cálculo de LWCI para cada año

Los resultados de los algoritmos aplicados en ENVI se despliegan en la Figura 37 del capítulo 4.

3.6.3. Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)

Este índice ambiental detallado en la Ec.10 del Capítulo2, fue determinado con la herramienta “Band Math”. En la Figura 32 se visualiza la herramienta usada y la ecuación que corresponde al índice SAVI para los tres años. En las imágenes que corresponden a los años 2010 y 2013, se utilizan la banda 3 y 4 que es la banda roja e infrarroja respectivamente, mientras que en la imagen del año 2015, se utiliza la es la banda 4 y 5.

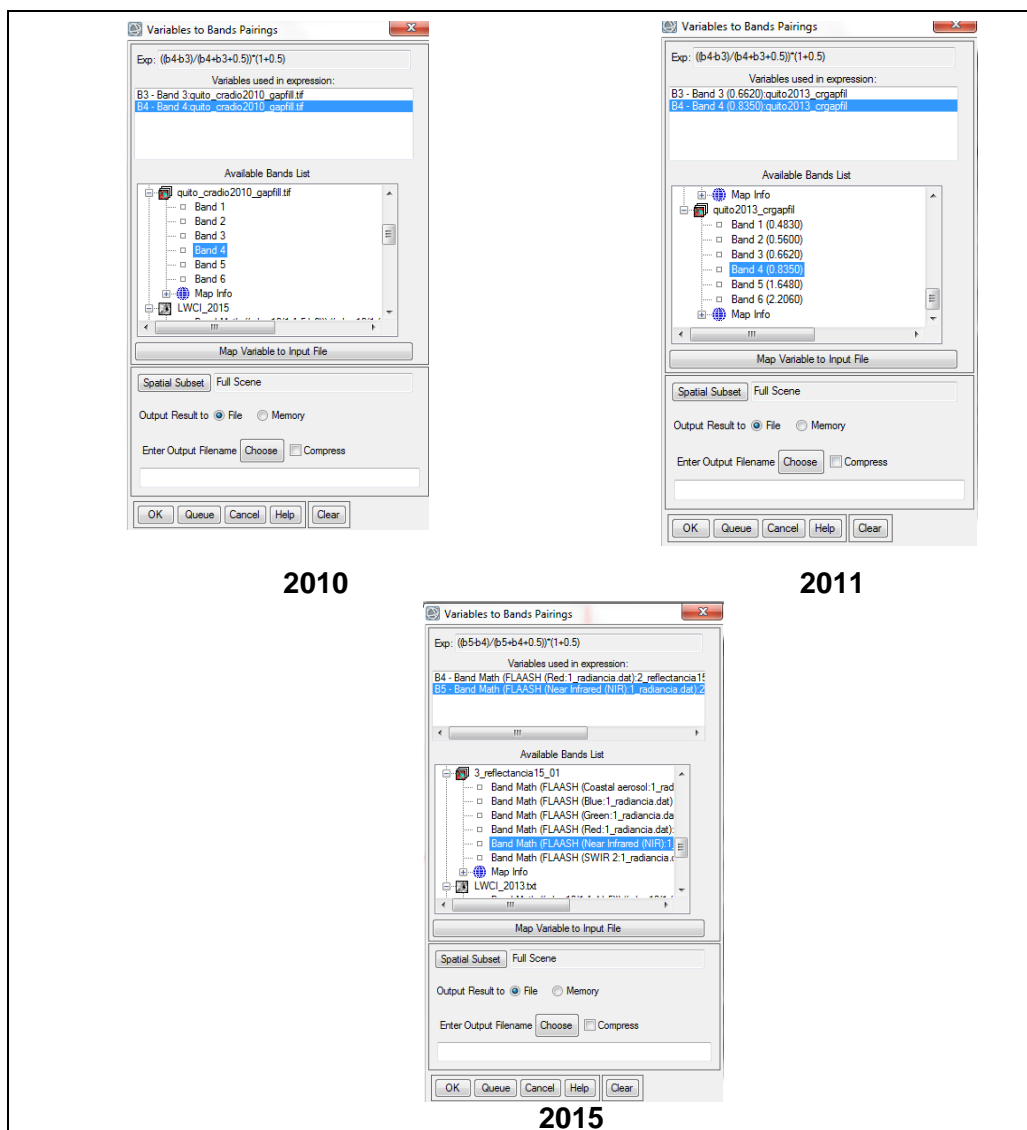


Figura 32: Herramienta con algoritmo para cálculo de SAVI para cada año

Los resultados posteriores a la aplicación de la Ec.10 en el Band Math se encuentran desplegados en la Figura 38 del capítulo 4.

3.6.4. Índice de Suelo Normalizado (NSI)

Este índice ambiental, NSI, permitirá distinguir las áreas construidas y suelo desnudo. Se obtuvo a partir de ingreso de la Ec. 11 del capítulo 2, en la herramienta del “Bath Math”, se considera para imágenes del año 2010 y 2013, las bandas 4 y 5 del infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, respectivamente, mientras que imágenes del año 2015 se dispone de las bandas 5 y 6. A continuación, en la Figura 33 se identifica el algoritmo ingresados para dicho el índice.

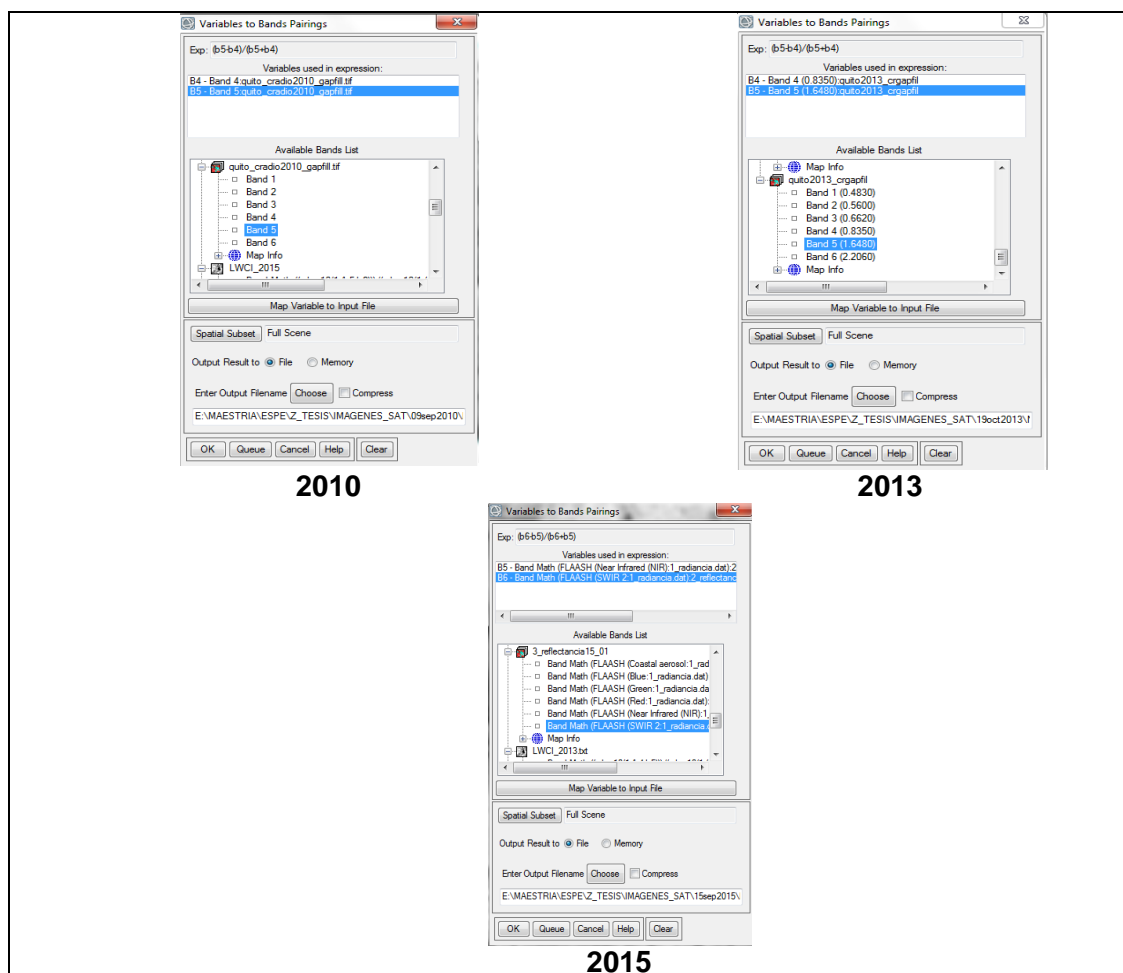


Figura 33: Herramienta con algoritmo para cálculo de NSI para cada año

Los resultados se despliegan en la Figura 39 del capítulo 4, donde se revisa la coherencia cronológica de las imágenes.

3.6.5. Temperatura Brillo (TB)

Este índice es obtenido a partir de corrección de la banda térmica, para ello, se ingresa en “Band Math” la **Ec. 7** del capítulo 2, considerando que las constantes calibración k1 y k2 son propias de cada sensor, tal como muestra la Figura 9 del marco teórico. Cabe mencionar la ecuación 7 fue diseñada para hallar la temperatura en grados kelvin, en éste proyecto se resta 273.15 a fin de hallar la temperatura en grados centígrados. En la Figura 34 en los años 2010 y 2013, las constantes van hacer iguales en razón al uso del mismo sensor; pero con imagen 2015 las constantes las constantes serán diferentes, puesto que, corresponden al sensor Landsat 8 OLI.

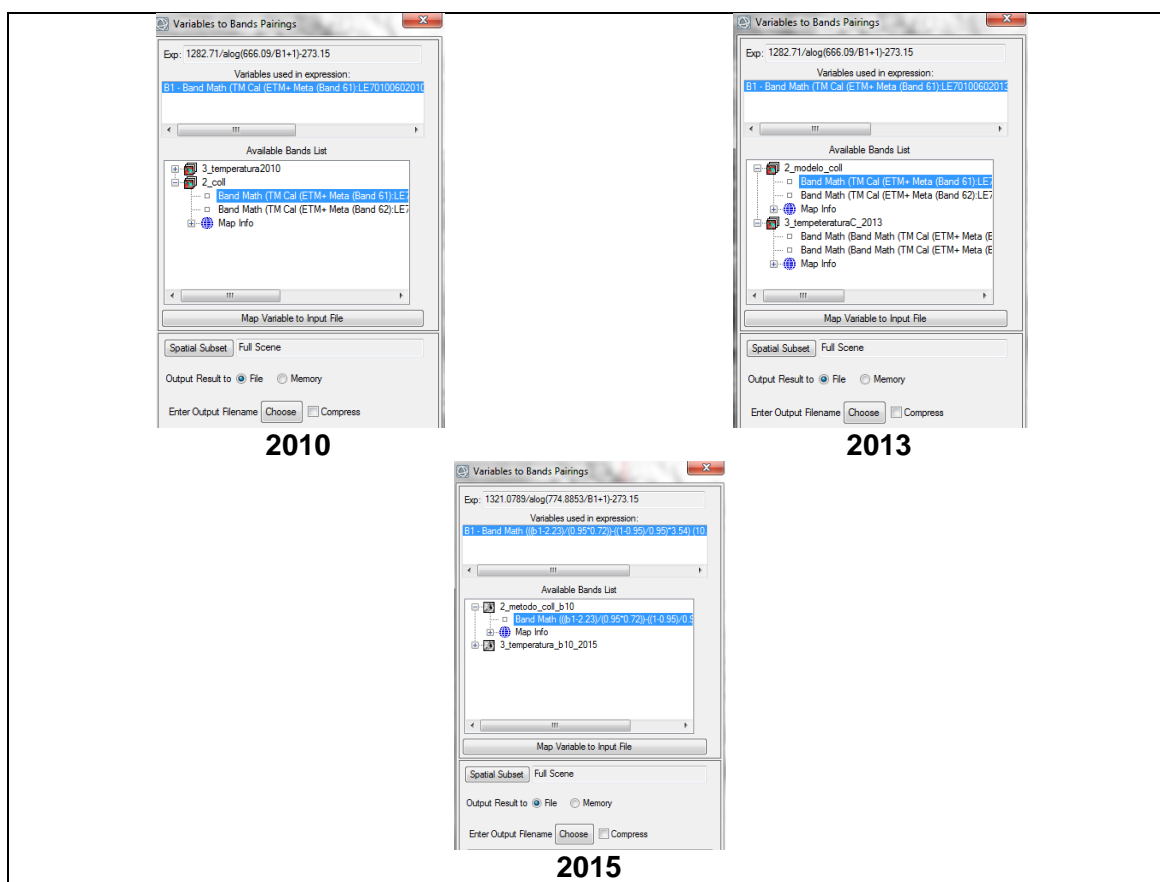


Figura 34: Herramienta con algoritmo TB para cada año

3.7. Mediciones de NOx mediante RAUTO

Puesto que el estudio se encuentra enfocado a realizar un análisis del contaminante gaseoso NOx, el cual es monitoreado a través de las estaciones que conforman la Red Automática (RAUTO), mismas que se mantienen operables las 24 horas del día. En el análisis del presente proyecto, se escogieron cinco estaciones de la Red Automática que registran el contaminante gaseoso NOx; dichas estaciones, deben ser distribuidas a lo largo del área de estudio, a fin de que puedan abarcar la gran mayoría del territorio en zona urbana- rural de DMQ. ver Figura 45.

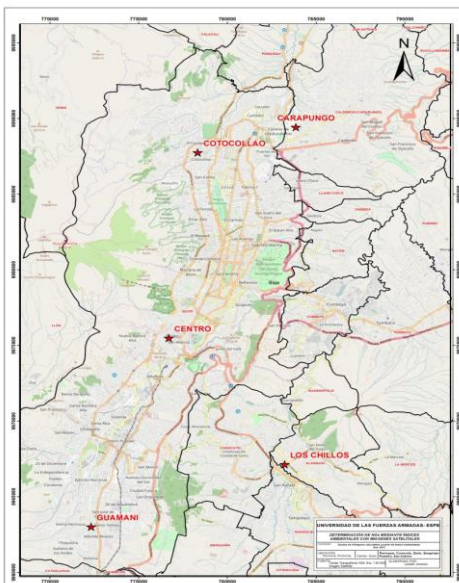


Figura 35: Distribución de estaciones de monitoreo del aire

La recopilación de datos del NOx, son exactamente las mismas que las fechas de adquisición de las imágenes de satélite, debido a que se debe correlacionar los datos medidos por las estaciones y los píxeles que corresponden a la ubicación de cada estación sobre la imagen satelital corregida. En la Tabla 7, se muestra los datos medidos diariamente de los Óxidos de Nitrógeno totales (NOx), que corresponden a las cinco estaciones propuestas para el proyecto.

Tabla 7: Datos NOx para las estaciones involucradas en el estudio

Estación	9-Sep-10 NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	19-Oct-13 NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15-Sep-15 NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Cotocollao	57.36	27.26	31.3
Carapungo	47.99	59.2	38.69
Centro	54.36	66.63	31.68
Guamani	6.98	21.5	15.6
Los Chillos		59.29	30.16

3.8. Comparación de Modelos Matemáticos.

Con el fin de realizar la estimación de ajuste del mejor modelo matemático para el contaminante gaseoso NOx, utilizando imágenes de satélite, se realiza dos comparaciones como son: la primera relación corresponde entre los índices ambientales calculados a partir de las imágenes satelitales corregidas y datos de NOx de las estaciones de monitoreo; y la segunda relación, es entre los valores de reflectancia atmosférica de imágenes satelitales corregidas y los datos de NOx.

Los modelos de regresiones fueron generadas en el software R, el cual facilita el análisis estadístico del presente estudio.

3.8.1. Relación entre NOx y los Índices Ambientales.

A fin de identificar la relación entre los datos NOx y los índices ambientales, se realiza una regresión simple, siendo la variable independiente los valores de los índices ambientales y variable dependiente los valores de NOx. En las Tablas 8, 9, 10, 11 y 12, en la primera columna contiene los valores de medición del NOx para cada estación, y en la segunda columna los valores de píxel de los índices ambientales NDVI, LWCI, SAVI, NSI y TB en los tres años de estudio que corresponde a la ubicación de las estaciones de monitoreo.

Tabla 8: Valores de NOx y NDVI en cada estación

Estaciones	9-Sep-10		19-Oct-13		15-Sep-15	
	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NDVI	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NDVI	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NDVI
Cotocollao	57.36	0.214	27.26	0.140	31.3	0.131
Carapungo	47.99	0.040	59.2	-0.010	38.69	0.014
Centro	54.36	0.079	66.63	0.055	31.68	0.05
Guamani	6.98	0.264	21.5	0.159	15.6	0.082
Los Chillos	-	0.147	59.29	0.135	30.16	0.117

Tabla 9: Valores NOx y LWCI de cada estación

Estaciones	9-Sep-10		19-Oct-13		15-Sep-15	
	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	LWCI	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	LWCI	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	LWCI
Cotocollao	57.36	-0.224	27.26	0.152	31.3	4.159
Carapungo	47.99	-0.175	59.2	-0.073	38.69	4.537
Centro	54.36	-0.276	66.63	-0.130	31.68	2.746
Guamani	6.98	-0.469	21.5	0.087	15.6	4.912
Los Chillos	-	-0.242	59.29	0.150	30.16	3.843

Tabla 10: Valores NOx de y SAVI de cada estación

Estaciones	9-Sep-10		19-Oct-13		15-Sep-15	
	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SAVI	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SAVI	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SAVI
Cotocollao	57.36	0.136	27.26	0.094	31.3	0.117
Carapungo	47.99	0.028	59.2	-0.007	38.69	0.014
Centro	54.36	0.042	66.63	0.033	31.68	0.041
Guamani	6.98	0.171	21.5	0.105	15.6	0.079
Los Chillos	-	0.085	59.29	0.086	30.16	0.102

Tabla 11: Valores NOx y NSI de cada estación

Estaciones	9-Sep-10		19-Oct-13		15-Sep-15	
	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NSI	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NSI	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NSI
Cotocollao	57.36	0.049	27.26	-0.057	31.3	-0.517
Carapungo	47.99	0.037	59.2	0.027	38.69	-0.490
Centro	54.36	0.087	66.63	0.059	31.68	-0.046
Guamani	6.98	0.093	21.5	-0.032	15.6	0.500
Los Chillos	-	0.064	59.29	-0.062	30.16	-0.533

Tabla 12: Valores NOx y SAVI de cada estación

Estaciones	09/09/2010		19/10/2013		15/09/2015	
	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TB	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TB	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TB
Cotocollao	57.36	42.383	27.26	40.3599	31.3	43.421
Carapungo	47.99	40.783	59.2	38.490	38.69	44.776
Centro	54.36	46.308	66.63	45.468	31.68	45.927
Guamani	6.98	43.177	21.5	35.059	15.6	42.703
Los Chillos	-	45.531	59.29	42.083	30.16	47.345

Una vez realizadas las mediciones de los índices ambientales, mediante la extracción del valor de pixel de acuerdo a la ubicación de las estaciones y también considerando los valores de NOx en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ recolectadas en campo, se evalúa la regresión más acertada, mediante el coeficiente de determinación R^2 , es decir, valores cercanos a 1. Los resultados obtenidos a partir las regresiones no lineales, mediante el valor del coeficiente de determinación, se muestran en la Tabla 16 del capítulo 4.

3.8.2. Relación entre NOx y valores de reflectancia atmosférica

En modelo de correlación a partir de los valores de reflectancia atmosférica, se debe considerar una regresión lineal múltiple, puesto que dispone de tres variables independientes, que corresponde a los valores espectrales de las bandas RGB (x_1 , x_2 , x_3) de las imágenes satelitales corregidas. En las Tablas 13, 14 y 15, en la columna “y” se encuentran los datos de NOx mientras que en la columna “ x_1 , x_2 , x_3 ”, posee valores de reflectancia atmosférica para cada banda.

Tabla 13: Valores NOx y valor de ND de Imagen Landsat 2010

9-Sep-10				
ESTACIONES	y	x_1	x_2	x_3
	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	b1	b2	b3
Cotocollao	57.36	0.1454	0.1322	0.1117
Carapungo	47.99	0.2181	0.2019	0.2011
Centro	54.36	0.1288	0.1122	0.0856
Guamani	6.98	0.1400	0.1439	0.1205

Tabla 14: Valores NOx y valor de ND de Imagen Landsat 2013

9-Sep-13				
ESTACIONES	y	x_1	x_2	x_3
	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	b1	b2	b3
Cotocollao	27.26	0.1749	0.1585	0.1347
Carapungo	59.2	0.2224	0.2095	0.1904
Centro	66.63	0.1564	0.1181	0.0955
Guamani	21.5	0.1654	0.1581	0.1409
Los Chillos	59.29	0.1611	0.1437	0.1158

Tabla 15: Valores NOx y valor de ND de Imagen Landsat 2015

9-Sep-15				
ESTACIONES	y	x_1	x_2	x_3
	NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	b1	b2	b3
Cotocollao	31.3	0.3205	0.3082	0.2806
Carapungo	38.69	0.4520	0.4525	0.3995
Centro	31.68	0.2841	0.2686	0.2365
Guamani	15.6	0.4156	0.3945	0.3223
Los Chillos	30.16	0.3021	0.2715	0.2559

La Tabla 13 que corresponde a los datos del año 2010, no se considera la estación de monitoreo Los Chillos, debido a que no se dispone de datos; sin embargo las demás estaciones serán aptas para continuar con el estudio. En la Tabla 14 y 15, no se presentaron inconvenientes con la obtención de datos para ejecutar la regresión lineal múltiple. Los resultados de dichas regresiones se encuentran desplegados en la Tabla 17.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Resultados de Índices Ambientales

El desarrollo del proyecto se ha obtenido varios resultados producto del procesamiento de imágenes. Durante el proceso para determinar los índices ambientales se ha obtenido las siguientes imágenes resultantes:

4.1.1. NDVI

Los resultados del NDVI para los tres años se presentan con un raster para cada año, mediante la Figura 36.

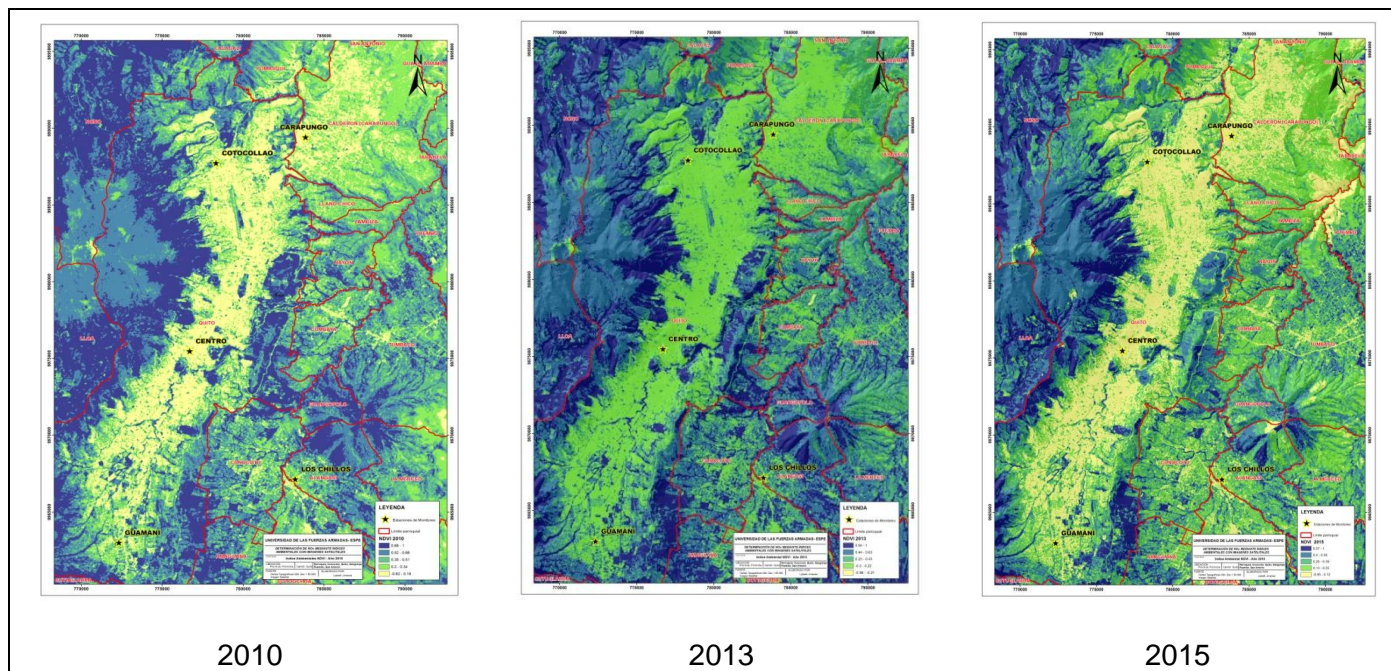


Figura 36: Representación del NDVI para los tres años

Mediante análisis del NDVI, indica que los pixeles con mayor reflectancia (colores azules) representan una densa cobertura vegetal; por el contrario, los de menor reflectancia (colores verdes - amarillos) indican escasa cobertura vegetal. Analizando las tres imágenes, se define que la cobertura vegetal densa es mayor en el año 2010. La representación gráfica del NDVI son representadas de mejor forma en los siguientes anexos: NDVI 2010 (Anexo5), NDVI 2013 (Anexo 6) y NDVI 2015 (Anexo 7).

4.1.2. LWCI

Las imágenes resultantes de índice ambiental LWCI para los tres años de estudio, se presentan en la Figura 37.

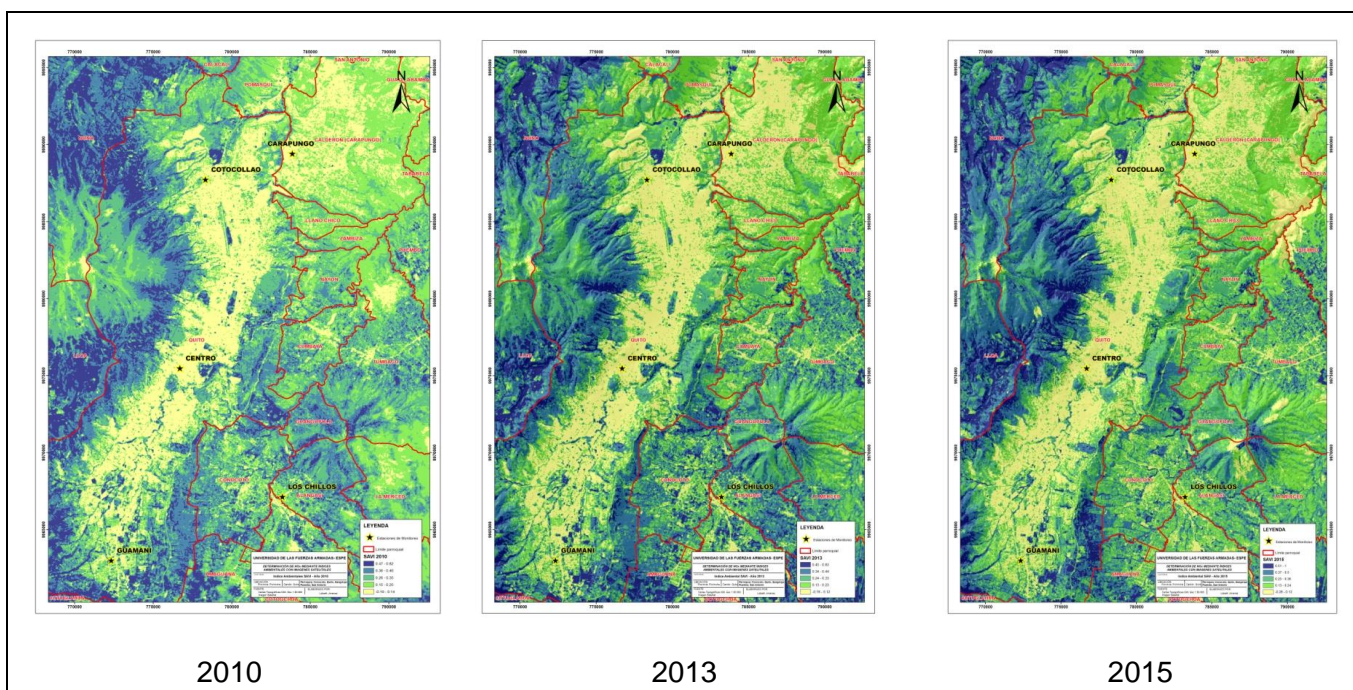


Figura 37: Representación del LWCI para los tres años

En los tres raster se visualiza que los valores con mayor reflectancia (colores azules) son los que presentan mayor humedad en las hojas, mientras que los valores con menor reflectancia (colores verdes - amarillos) representan hojas con escasa humedad. De manera general se puede decir que la imagen que presenta mayor humedad a lo largo del distrito es en el año 2010. A fin de

visualizar mejor las imágenes se presentan los siguientes anexos: LWCI 2010 (Anexo8), LWCI 2013 (Anexo 9) y NDVI 2015 (Anexo 10).

4.1.3. SAVI

Una vez aplicado el índice SAVI para los tres años se obtienen los siguientes resultados presentados en la Figura 38.

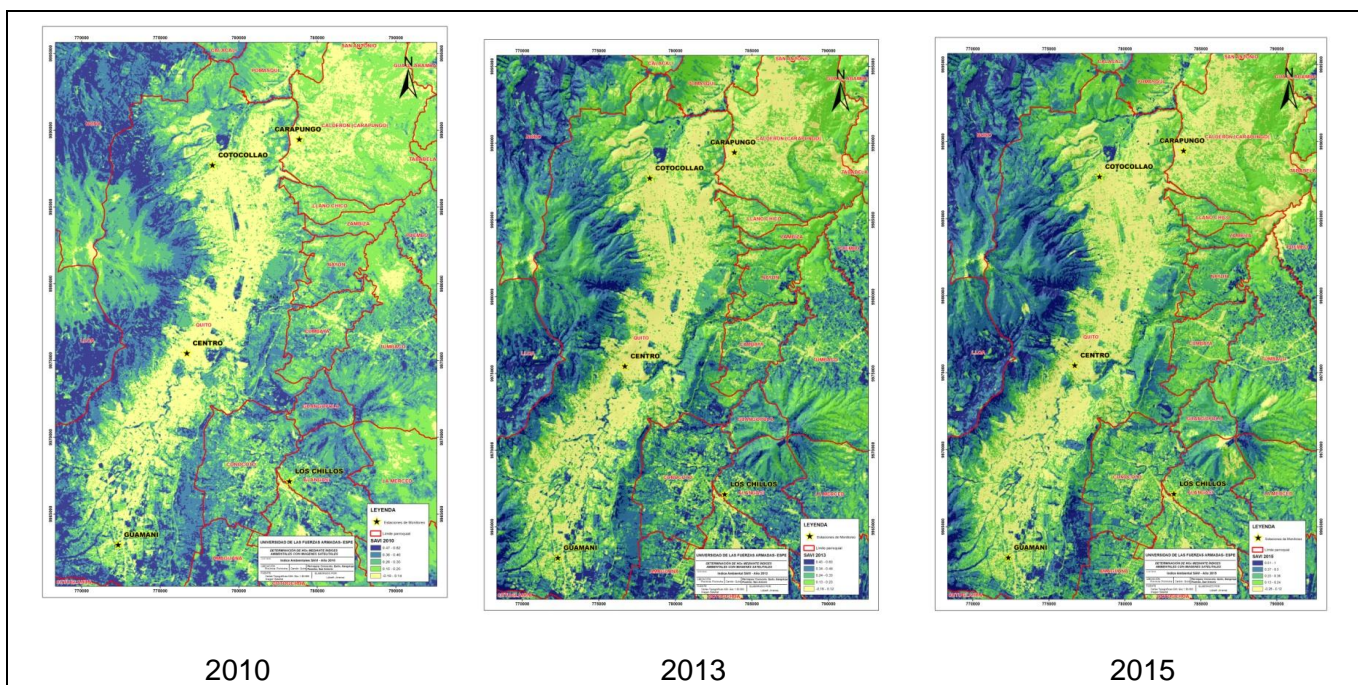


Figura 38: Representación del SAVI para los tres años

Ante los productos obtenidos se define que las zonas con valores de menor reflectancia (color amarillo a verde) es suelo con escasa cobertura vegetal, por el contrario valores altos de reflectancia son zonas que tiene cobertura vegetal. En una comparación anual se define que el año 2015 tiene más cobertura vegetal a nivel del suelo que años anteriores. Los mapas con el índice SAVI, se presentan en los siguientes anexos: SAVI 2010 (Anexo11), SAVI 2013 (Anexo 12) y SAVI 2015 (Anexo 13).

4.1.4. NSI

Los resultados del índice ambiental NSI para los tres años de estudio se presentan mediante la Figura 39.

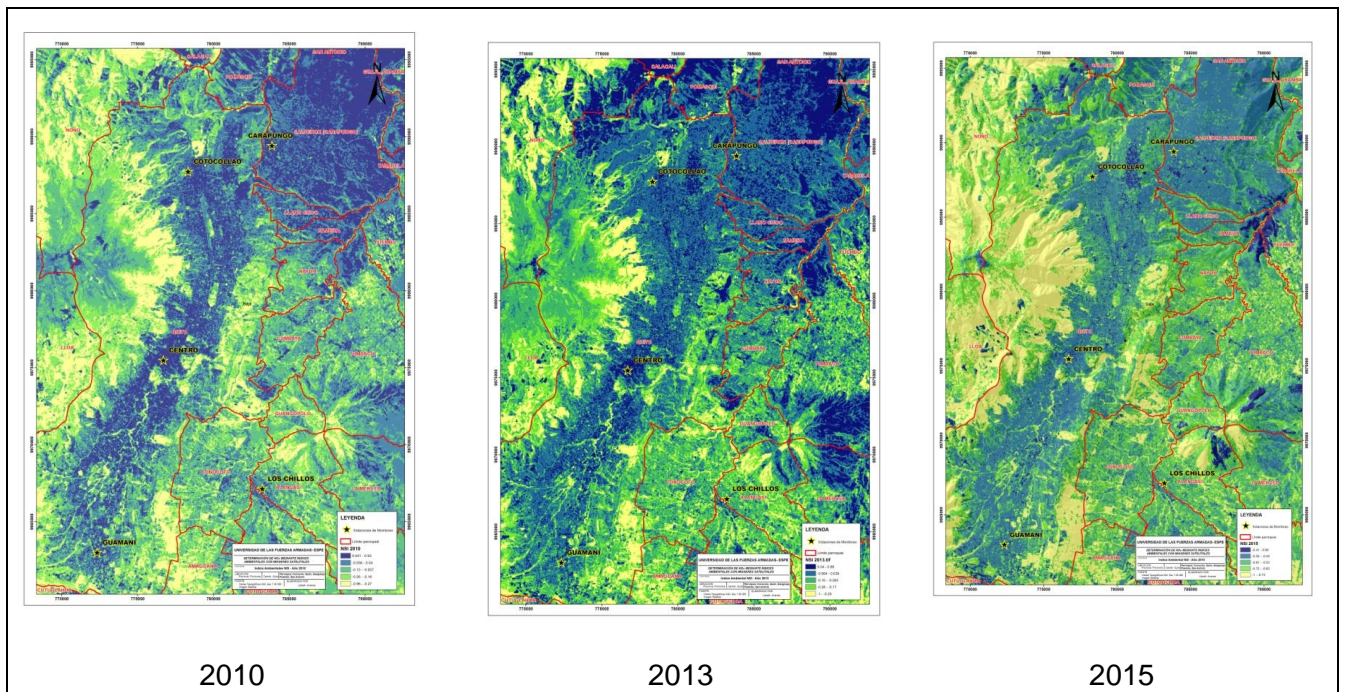


Figura 39: Representación del NSI para los tres años

Las imágenes obtenidas reflejan mayor respuesta espectral en zonas que tienen construcciones (colores azules), por el contrario, con cobertura vegetal y menor reflectancia (colores verdes). El año donde se presencia mayor parte del área con suelo desnudo es para el 2013, cabe mencionar que para el año 2015, la mayor reflectancia se concentra en zonas que fueron quemadas. Los mapas con el índice NSI, se presentan en los siguientes anexos: NSI 2010 (Anexo14), NSI 2013 (Anexo 15) y NSI 2015 (Anexo 16).

4.1.5. TB

Los resultados del TB en los tres años de estudio se representan mediante la Figura 40.

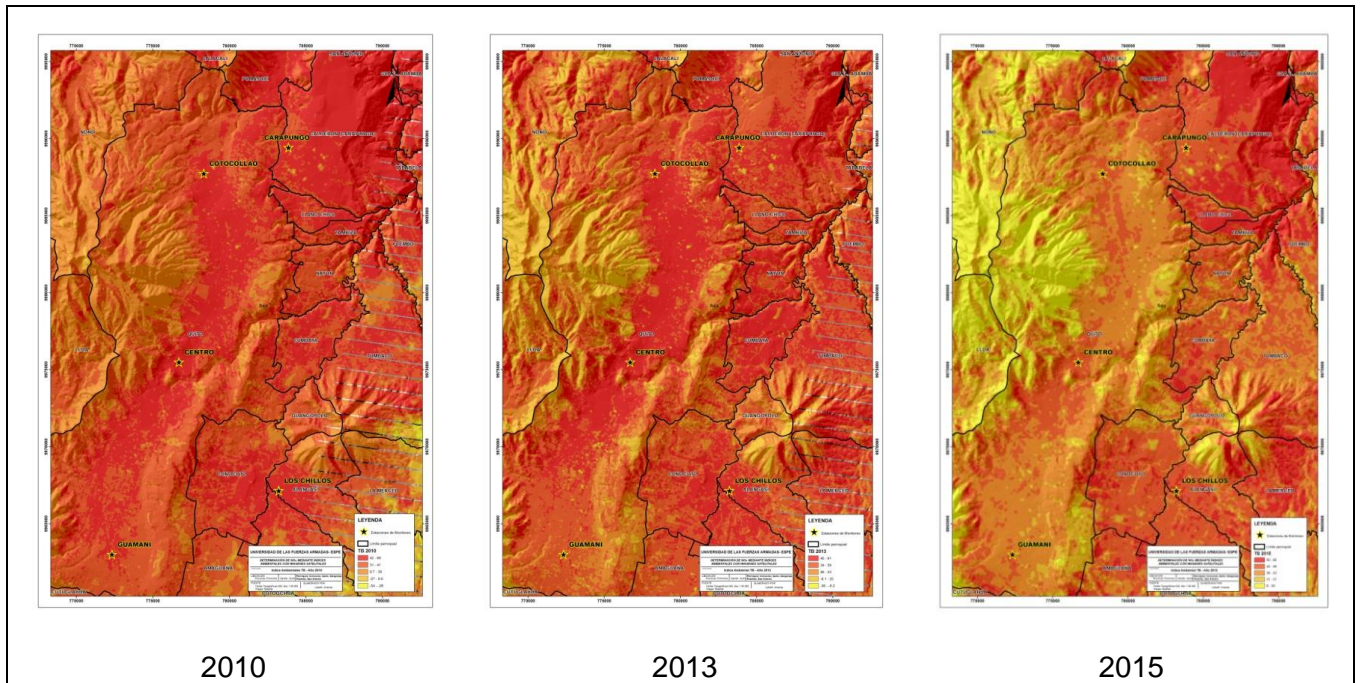


Figura 40: Representación del TB para los tres años

Conforme a las imágenes obtenidas se resuelve que la mayor reflectancia corresponde a las zonas que tiene mayor temperatura brillo (color rojo). En éste caso resulta con mayor temperatura la imagen del año 2013, se debe mencionar que la reflectancia en año 2015 se concentra en zonas quemadas, es por eso que es puntual su representación.

A fin de visualizar mejor los mapas con las imágenes de temperatura brillo, se adjunta los siguientes anexos: TB 2010 (Anexo17), TB 2013 (Anexo 18) y TB 2015 (Anexo 19).

4.2. Coef. de determinación: Índices Ambientales y NOx

En la Tabla 16, se visualiza los coeficientes de determinación resultantes de las cuatro regresiones no lineales aplicadas en éste estudio, siendo la regresión de tipo polinomial la que dispone de mejores valores de R^2 .

Tabla 16: R² para diferentes tipos de regresiones

<i>Imagen de Satélite 9-Sep-10</i>				
Índice	Simple	Polinomial	Exponencial	Logarítmica
NDVI	0.3659	0.8883	0.449	0.242
LWCI	0.8087	0.995	0.8632	-
NSI	0.3307	0.6819	0.3739	0.2819
SAVI	0.3919	0.975	0.4721	0.2798
TB	0.0055	0.3287	0.001	0.004
<i>Imagen de Satélite 19-Oct-13</i>				
Índice	Simple	Polinomial	Exponencial	Logarítmica
NDVI	0.4777	0.739	0.4814	-
LWCI	0.3997	0.5703	0.3407	-
NSI	0.3552	0.5566	0.3068	-
SAVI	0.5181	0.815	0.5198	-
TB	0.5224	0.5253	0.5227	0.5254
<i>Imagen de Satélite 15-Sep-15</i>				
Índice	Simple	Polinomial	Exponencial	Logarítmica
NDVI	0.1291	0.7	0.0711	0.2801
LWCI	0.1353	0.403	0.1987	0.1058
NSI	0.7147	0.8631	0.7627	-
SAVI	0.171	0.7251	0.1073	0.3123
TB	0.2327	0.2435	0.2877	0.2435

Los R² representado en color verde, son los valores que mejor correlación tiene las regresiones para los tres años; mientras que valores en color rojo corresponden a los segundos valores con buena correlación, éstos valores ya indica un parámetro de ajuste con el índice ambiental SAVI, debido a que se mantienen valores cercanos a 1, en las tres imágenes de estudio.

Los valores éstos serán considerados para realizar los modelos a fin de validar la mejor representación del contaminante NO_x.

4.3. Coef. de determinación: Reflectancia Atmosférica y NO_x

Una vez realizada la relación entre los valores de reflectancia atmosférica y datos de NO_x, mediante una regresión lineal múltiple usando los

datos de las Tablas 13, 14 y 15 del capítulo 3, se obtienen como resultados los siguientes valores de coeficientes de determinación, tal como muestra la Tabla 17.

Tabla 17: Coeficiente de determinación R^2 para regresión lineal múltiple

2010		2013		2015	
	<i>Coeficientes</i>		<i>Coeficientes</i>		<i>Coeficientes</i>
Intercepción	597.6	Intercepción	-96.9	Intercepción	37.0
b1	-392.9	b1	1781.5	b1	-475.1
b2	-11239.7	b2	455.6	b2	106.8
b3	8977.6	b3	-1784.7	b3	417.7
Coeficiente de determinación para cada año					
R^2	NA	R^2	-0.179	R^2	0.720

La Tabla 16 muestra que los resultados en función al coeficiente de determinación R^2 , son bajos. En el año 2010 no genera un R^2 , debido a la falta de datos para realizar una correlación apropiada, en este año se optó por generar tres ecuaciones polinómicas, siendo la variable independiente los valores correspondientes a cada banda, donde la banda 2 tiene un r^2 mayor de 0.44; en años 2013 y 2015 los coeficientes de determinación son bajos, siendo el mejor resultado es en el año 2015.

4.4. Ecuación de mejor ajuste

A partir de las regresiones no lineales entre los índices ambientales y datos de NOx, así como las regresiones lineales múltiples entre los valores de reflectancia atmosférica y datos de NOx; en Tabla 18 se definen las ecuaciones a partir de los mejores ajustes de ambas relaciones.

Tabla 18: Ecuación de ajuste y R^2 para cada regresión

<i>Fecha Imagen</i>	<i>Tipo de Regresión</i>	<i>Relación</i>	<i>Ecuación de ajuste</i>	<i>R^2</i>
9-Sep-10	Polinomial 2do grado	LWCI - NOx	$y = -1090.8x^2 - 559.3x - 15.492$	0.995
	Polinomial 2do grado *	R_{atm} - NOx	$y = 17249x^2 - 5554.4x + 466.53$	0.444
19-Oct-13	Polinomial 2do grado	SAVI - NOx	$y = -9226.8x^2 + 596.84x + 62.052$	0.815
	Lineal Múltiple	R_{atm} - NOx	$y = -96.8777 + 1781.526 B1 + 455.6088 B2 - 1784.7406 B3$	-0.179
15-Sep-15	Polinomial 2do grado	NSI - NOx	$y = -28.952x^2 - 17.907x + 31.639$	0.863
	Lineal Múltiple	R_{atm} - NOx	$Y = 36.9528 - 475.0552 B1 + 106.8278 B2 + 417.7488 B3$	0.720

*MB, mejor banda espectral de ajuste

Se puede notar en la Tabla 18, que en cada año se realizó dos tipos de regresiones a fin de validar la regresión más adecuada para representar el contaminante gaseoso NOx. En el primer año de evaluación (2010), se optó por realizar dos regresiones polinómicas de segundo grado, la primera regresión es la relación entre las mediciones de NOx con el índice ambiental LWCI y la segunda regresión, es la relación entre el valor de reflectancia atmosférica y los valores de NOx medidos en campo. En éste año particularmente, no se utilizó la regresión lineal múltiple puesto que no resultó valores de coeficiente determinante R^2 , es decir la ecuación presentó inconsistencias. Por lo tanto, se optó en verificar mediante regresión lineal simple con cada una de las bandas espectrales que compone una imagen, para éste estudio resultó el mejor R^2 , con banda 2 (b2) correspondiente al color verde. Para los años 2013 y 2015 desplegaron como resultados los dos tipos de regresiones, polinómica de segundo grado y múltiple lineal, donde el coeficiente determinante (R^2) resultaron ser mejor para las regresiones polinómicas de segundo grado.

En la Tabla 18, se resalta en color amarillo los coeficientes de determinación con mejor ajuste, que corresponde a la relación entre la medida del NOx con diferentes índices ambientales. Para el año 2010 el mejor ajuste

es con el índice LWCI, para el año 2013 es el índice SAVI y año 2015 es el índice NSI. Sin embargo, en un análisis de la Tabla 16, se puede determinar, que los segundos mejores coeficientes de determinación obedecen a un parámetro de mejor ajuste con el índice ambiental SAVI y eso se verificará en la representación gráfica del contaminante que resultó para el año 2013. El índice SAVI debido a la alta reflectancia en el suelo permite destacar zonas que son mayormente pobladas, por consecuencia ésta característica es directamente proporcional con ubicación de áreas donde se encuentra el transporte público, zonas comerciales y de industrias, mismas que se consideran principal fuente de contaminación.

Con los resultados obtenidos en la Tabla 17, se destaca que la regresión lineal múltiple propuesta por la Universiti Sains Malasia para la estimación del PM10 resulta ser exitosa para las ciudades de Quito y Cuenca, debido a que es un buen estimador para el contaminante PM10, sin embargo para el contaminante gaseoso NOx no resulta óptimos resultados.

4.5. Modelo de estimación del NOx para cada año de estudio

En éste análisis se toma en cuenta Ec.12 del capítulo 2, misma que fue validada con el contaminante PM10, conforme a los resultados del coeficiente de determinación R^2 , resulta que la R_{atm} (Reflectancia Atmosférica) debe ser remplazada por los índices ambientales que mejor se ajustan.

Las ecuaciones generadas a partir de los modelos de regresión lineal múltiple que mejor se ajustan a los valores del contaminante gaseoso NOx, se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19: Ecuaciones definitivas según ajuste de coeficiente R²

<i>Fecha Imagen</i>	<i>Ecuación Final mejor ajustada</i>
9-Sep-10	$NO_x = -1090.8(LWCI_{2010})^2 - 559.3(LWCI_{2010}) - 15.492$
19-Oct-13	$NO_x = -9226.8(SAVI_{2013})^2 + 596.84(SAVI_{2013}) + 62.052$
15-Sep-15	$NO_x = -28.952(NSI_{2015})^2 - 17.907(NSI_{2015}) + 31.639$

La obtención de las imágenes resultantes para cada año se consigue a partir de las ecuaciones indicadas en la Tabla 19. Para poder inscribir las ecuaciones en software, se utilizó la herramienta “Band Math” de ENVI 5.1, teniendo como resultado una imagen representando el contaminante NO_x para los tres años de estudio. En las Figura 41, 42 y 43 se observa la aplicación del algoritmo a partir de la Tabla 19.

Exp: $-1090.8(B1)^2 - 559.3(B1) - 15.492$

Variables used in expression:
 B1 - Band Math $((-\log_{10}(1-(b4-b5)))/(-\log_{10}(1-(0.990400-0.892268*(b4-b3)/(b4+b3+0.5)))):SAVI_{2010}$

Figura 41: Herramienta Band Math, ecuación de mejor ajuste 2010

Exp: $-9226.8(B1)^2 + 596.84(B1) + 62.052$

Variables used in expression:
 B1 - Band Math $((b4-b3)/(b4+b3+0.5))^{(1+0.5)}:SAVI_{2013}$

Figura 42: Herramienta Band Math, ecuación de mejor ajuste 2013

Exp: $-28.952(B1)^2 - 17.907(B1) + 31.639$

Variables used in expression:
 B1 - Band Math $((b6-b5)/(b6+b5)):NSI_{2015}$

Figura 43: Herramienta Band Math, ecuación de mejor ajuste 2015

Con las imágenes resultantes a partir de las ecuaciones antes descritas en las Figuras 41, 42 y 43, se realiza el mapa de estimación del NO_x, considerando las normas de calidad del Aire como es la OMS 2005, TULAS LIBRO VI anexo 4. A fin de obtener dicho mapa de las zonas contaminadas con NO_x (Oxido Nítrico (NO) y dióxido de Nitrógeno (NO₂)). Se prestará particular atención los rangos permisibles para el NO₂, puesto que el Oxido Nítrico (NO) se transforma inmediatamente en y dióxido de Nitrógeno (NO₂) (Secretaria del Ambiente Quito, 2017). Además el NO₂ se encuentra categorizado según las normas de calidad del aire, estableciendo que la media anual para proteger al público de los efectos del NO₂ gaseoso en la salud es de 40 µg/m³. Y tomando en cuenta el libro VI del TULAS se establece valores de Alerta 1000 µg/m³ NO₂, Alarma 2000 µg/m³ NO₂ y Emergencia 3000 µg/m³ NO₂.

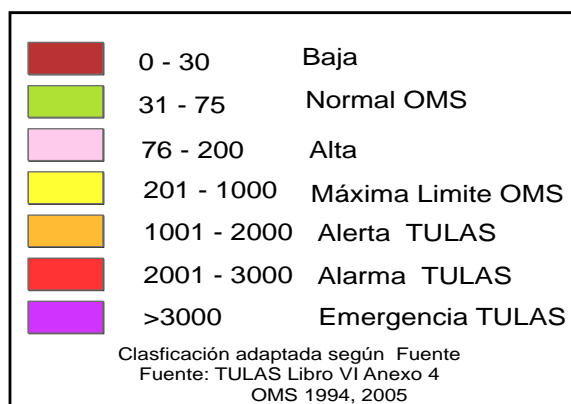


Figura 44: Clasificación del NO_x con Índices Ambientales

Una vez adaptado la fuente para clasificar a los raster resultantes, en función a la Normativa vigente, se realiza los mapas que representa los NO_x calculados a partir de índices ambientales. Es importante mencionar que los modelos deben ser validados conforme a la interpretación del resultado con la situación real de cada sitio.

En la Figura 45 (Anexo 20), se puede apreciar claramente que el contaminante gaseoso prevalece en la zona urbana de Quito, concentrada en

el centro histórico, la Villaflora al sur de Quito y en el Norte alrededor de antiguo aeropuerto, esto es debido a la gran concentración de vehículos. En otras parroquias como Calderón el modelo sobre estima la ubicación con respecto a la concentración de NOx, siendo la parte central donde se dispone en cantidades en rango normal de NOx. El centro de Conocoto y Sangolquí es un claro ejemplo de la concentración de este contaminante

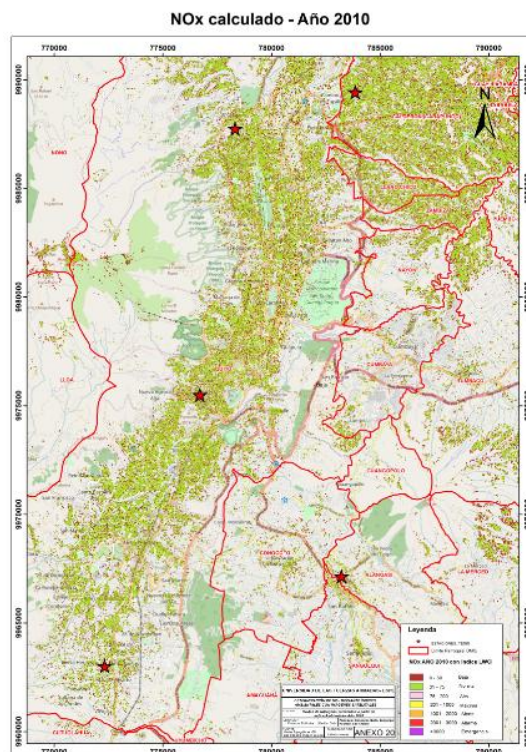


Figura 45: Mapa de estimación del NOx para el año 2010

Es importante mencionar que todos los sectores antes indicados, se encuentran en un rango normal de NOx, por lo tanto, no se evidencia valores altos que puedan afectar a la salud humana. Los valores bajos de NOx se encuentran de forma dispersa.

En año 2013 se realiza una espacialización del NOx tal como muestra el mapa de la Figura 46 (Anexo 21), en donde se refleja que el contaminante NOx se concentra en la zona urbana de Quito. A diferencia del año 2010 ya no se

visualizan valores bajos dispersos de NO_x, es decir, valores comprendidos en el rango de 0 a 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo tanto, es visible un aumento los NO_x, a un rango normal tolerable, es decir de 31 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En ésta imagen se visualiza que en la parroquia de Calderón, el contaminante no se concentra por todo el límite como muestra en la imagen del 2010, sino únicamente en la zona central urbana, por lo tanto es más coherente la estimación con el índice SAVI.

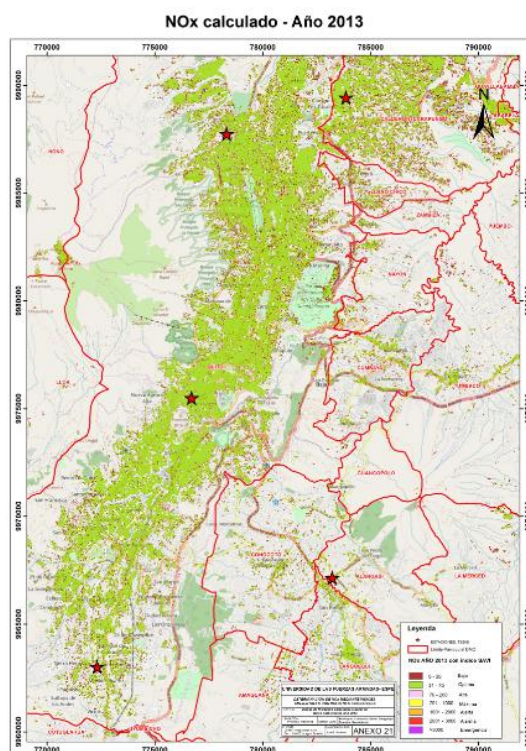
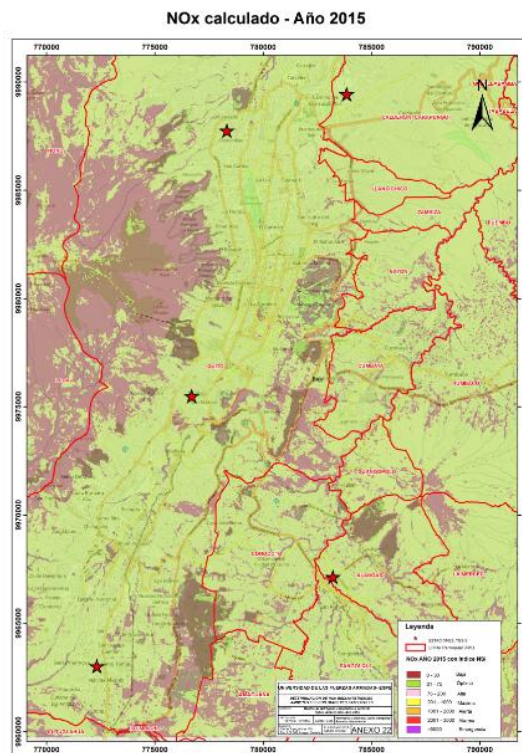


Figura 46: Mapa de estimación del NO_x para el año 2013

La representación del NO_x para el año 2015 a partir del índice NSI es muy general y subjetiva, debido a que los valores óptimos se encuentran a lo largo de la zona urbana y rural, además se observa que el contaminante es continuo en las zonas parroquiales, no discrimina zonas donde son libres de contaminación como es el área rural que disponen de grandes extensiones de cobertura vegetal. Finalmente se define que éste modelo, ejecutado con el

NSI, no representa la realidad en la estimación del contaminante NO_x, siendo un modelo de estimación del NO_x muy general.



Realizando una comparación de la presencia del NO_x en los años de estudio, se define que el contaminante NO_x va ocupando mayor espacio dentro del territorio de DMQ, aunque los valores se encuentran en el límite permisible se debe considerar acciones respecto al control del crecimiento parque automotor y emisiones a causa de las industrias.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. La estimación del contaminante gaseoso NO_x a través de imágenes satelitales es factible realizar siempre y cuando, anteceda de los procedimientos de correcciones radiométricas y atmosféricas en las imágenes de satélite.

2. En el procesamiento de las imágenes satelitales de los tres años de estudio, se realizaron las correcciones radiométricas y atmosféricas correspondientes, obteniendo con éxito los valores de reflectancia atmosférica.

3. Con las imágenes satelitales corregidas se hallaron los cinco índices ambientales NDVI, LWCI, NSI, SAVI y TS, que serán de utilidad para evaluar la correlación con los datos de NO_x.

4. Se obtuvieron dos tipos de regresiones, polinomiales y múltiples; siendo la regresión polinomial, la mejor que se ajusta a los datos de NO_x medidos en campo durante los 3 años de estudio con R^2 entre 0.8 y 0.9, mientras que la regresión múltiple resulta tener valores bajos en correlación, decir menores o iguales a 0.7.

5. El modelo de regresión polinomial de segundo grado fue generado a partir de la relación NO_x con los índices ambientales, por lo tanto, el estudio muestra que los mejores resultados corresponden a la correlación con los

índices ambientales, en lugar que la correlación con valores de reflectancia atmosférica.

6. En la relación entre el NOx y los índices ambientales, se identifica a través del R^2 , los valores más altos (cercanos a 1) para los años de estudio 2010, 2013 y 2015, donde se obtuvieron tres índices ambientales diferentes para cada año LWCI, SAVI y NSI; sin embargo, se identificó que en los segundos valores más altos del R^2 , tienen un parámetro constante con respecto al índice ambiental SAVI, por lo tanto, dicho índice resulta ser el adecuado para estudios de contaminación del NOx.

7. La contaminación atmosférica a partir del NOx, tiene una relación inversa con la cantidad de vegetación, debido a que en zonas donde existe mayor cobertura vegetal disminuye la detección del contaminante. En tal sentido, se puede representar el contaminante a través de las imágenes satelitales resultantes, producto de la correlación entre índices ambientales y medición del contaminante.

8. Los modelos de estimación del contaminante gaseoso NOx fueron representados mediante un mapa que dispone de un raster con valores de NOx a lo largo de área de estudio, el valor del NOx para los tres años se encuentran dentro de los límites permisibles según la normativa vigente. Los resultados fueron validados conforme a los informes de Calidad del Aire (ICA) presentados por la Secretaría del Ambiente para los años 2010, 2013 y 2015.

5.2.Recomendaciones

1. Se debería considerar nuevos contaminantes para verificar del ajuste de ecuaciones con respecto a los índices ambientales y a la reflectancia atmosférica.

3. Realizar un estudio en que se pueda establecer, cuantas estaciones de monitoreo del aire deben ser las mínimas necesarias para realizar el estudio de estimación de contaminantes.

4. Realizar un análisis de estimación del contaminante NO_x, aplicando un método alternativo de corrección atmosférica (diferente a FLAASH), a fin de verificar si influye el método de corrección en la estimación del contaminante.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, L. (2016). *Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana de la ciudad de Cuenca*. Cuenca.
- Acuña, E. (s.f.). *Regresión Lineal*. Mayaguez.
- Adlen Golden, B. A. (1992). *Flaash, a modtran4 atmospheric correction packate for hyperspectral data retriv als and simulation*.
- Alvarez. (2016). Estimación de contaminación del aire por pm10 en quito determinado por índices ambientales obtenidos con imágenes satelitales Landsat ETM+. *Revista Cartográfica IPGH*.
- Ambrosio R., González J., Arévalo V. (2002). *Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal*. España.
- Arozarena. (2004). *Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes*.
- Briz, S. (2004). *Teledetección infrarroja de gases atmosféricos mediante espectroradiometría FTIR*. Madrid.
- Brizuela A., Aguirre C., Velasco I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *Teledetección*.
- Canada Centre for Remote Sensing. (2006). *Sensores de Teledetección: los ojos de los satélites* . Canadá.
- Castillo, O. (2012). *Aplicación espectral y topológica en el procesamiento de imágenes satelitales*. Manizales.
- Chuvieco. (2002). *Fundamentos de la Teledetección*.

- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de la Teledetección Espacial*. Madrid.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid.
- Coll C., G. J. (2009). *Validación de la calibración y la corrección atmosférica de la banda térmica del landsat 7/etm+ con medidas de campo*. Valencia.
- Condorchem. (27 de Octubre de 2015). *óxidos de nitrógeno*. Obtenido de <http://blog.condorchem.com/tag/oxidos-de-nitrogeno/>
- Díaz Cervigón, Juan José. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Madrid.
- ENVI. (2015). *Atmospheric Correction Module*.
- ENVI. (2015). *Manual de usuario*.
- Estrada, M. R. (2010). *Metodología para el rellenado de las imágenes Landsat 7 ETM+ SLC-Off. Implementación del algoritmo Phase 2 Gap-Fill*. Cuba.
- Fernandez, I. (s.f.). *El Satélite Landsat analisis visual ETM+*. Valladolid.
- Galán D., Fernández R. (2006). Implicación de los nox en la química atmosférica. *Electrónica de ambiente UMC*.
- García, L. (2013). *Relación entre reflectancia y reflectividad*.
- Geoservice. (2009). *Información técnica resumida Landsat 7 ETM*. GeoservicePerú: Handbook.
- Geoservice Perú. (s.f.). *ENVI*. Perú.
- Gonzaga, C. (2014). *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la obertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador*. La Plata.
- Heileen, A. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes aster, rapideye, spot 2 y landsat 8 con el módulo FLAASH del software envi. *Revista Geográfica de América Central*. Nº 53, 39-59.
- INEC. (2015). *Anuario de Transporte 2015*. Quito.
- INEC. (2016). *Proyección del población ecuatoriana*. Quito.
- INEGI MEXICO. (2014). *Teledetección*. Recuperado el 18 de 02 de 2017

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2007). *Teledetección*. Guajira.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. (s.f.). *INEGI*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/landsat.aspx>
- JABAR, A. S. (2014). *Survey on gap filling algorithms in Landsat 7 ETM+ IMAGES*. Malaysia.
- Kruse. (2004). *Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO*.
- Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid. (2007). *Determinación de gases de efecto invernadero y gases traza mediante Teledetección*. Valladolid.
- Labrador M., Évora J., Arbelo M. (2012). *Satélites de Teledetección para Gestión del Territorio*. Canarias.
- Leon, Y. (2002). *Introducción a las Imágenes Satelitales*. República Dominicana.
- Martínez J., Martín P. (2010). *Teledetección y Medio Ambiente*. Madrid.
- Martínez, J. (2005). *Percepción Remota "Fundamentos de Teledetección Espacial"*.
- Melia. (1991). *La teledetección en seguimiento de los fenómenos naturales*. Madrid.
- Ministerio del Ambiente. (2010). *Plan Nacional de la Calidad del Aire*. Quito.
- Ministerio del Medio Ambiente de Gobierno de España. (2016). *Oxidos de Nitrógeno*. Obtenido de <http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.aspx>
- Minnaard, C. (s.f.). *Modelos de regresión lineales y no lineales: su aplicación en problemas de ingeniería*. Buenos Aires.
- NASA. (2015). *NASA crea mapa global de la calidad del aire*. *scientificamerican*.

- OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre*. Suiza.
- Peláez, I. M. (2006). Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística. *SEDEN*.
- Rejas, J. (2008). *Tratamiento digital previo de las imágenes*.
- Rivas, G. (s.f.). Regresión No Lineal. *Revista Colombiana de Estadística*.
- Rivera R., Vargas E., Terrazas S., Gavi F. (2002) *Utilización de imágenes de satélite para determinar áreas con problemas de lixiviación de nitratos*. Chapingo .
- Rodriguez, G. S. (2009). *Software para corregir los datos inválidos en las imágenes Landsat 7*. Cuba.
- Sánchez, J. (s.f.). *Curso de corrección atmosférica con modtran*. Castilla.
- Santana L., Escobar L., Capote P. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*.
- Satellite Imaging Corporation. (2015). Recursos Naturales. Canada.
- Secretaría del Ambiente Quito. (2017). *Informe de la Calidad del aire 2016 Distrito Metropolitano de Quito*. Quito.
- Sobrino, A. (2000). *Teledetección*. Valencia.
- Tecnológico de Monterrey. (s.f.). *Tecnologías de la comunicación y la sociedad*. Mexico.
- UNCPBA. (2012). *Curso sensores remotos*.
- UNESCO RAPCA. (s.f.). *Sistemas de teledetección Introducción*.
- Universidad de Alicante. (13 de Abril de 2015). *Regresión lineal simple y múltiple. Regresión no lineal*. Obtenido de <https://web.ua.es/es/lpa/docencia/analisis-estadistico-de-datos-geoquimicos-con-r/regresion-lineal-simple-y-multiple-regresion-no-lineal.html>
- Universidad de Granada. (2016). *Descripción del RStudio*. Obtenido de <http://wpd.ugr.es/~bioestad/guia-r-studio/practica-1-r-studio/>

Universidad de la Plata. (16 de 03 de 2016). Percepción Remota. Argentina.

Universidad de Murcia. (2003). *Teledetección*.

Universiti Sains Malaysia. (2010). *Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing: A Case Study in Makkah, Saudi Arabia*. Malaysia.

Uribe, S. T. (2012). *Estimación de temperatura superficial en el valle de aburrá mediante técnicas de percepción remota*. Medellín.

Valiente, S. (2009). *Contaminación de la Atmósfera*.

Yolanda, L. (2002). *Introducción a las Imágenes Satelitales* . República Dominicana.

ANEXOS