

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS
ESCUELA DE GEOGRAFÍA

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
GEÓGRAFA EN GESTIÓN AMBIENTAL

ANÁLISIS DEL PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE EL
USO DE SENSORES REMOTOS
CASO DE ESTUDIO: BOSQUES PROTECTORES DEL DISTRITO
METROPOLITANO DE QUITO EN LOS AÑOS 2015 Y 2016

Arianna Baquero Rivadeneira

Director: Ing. Armando Echeverría, Mg.

Quito-2019

DEDICATORIA

A mi hermano Mathew Baquero a quien considero mi mejor amigo, por haber llenado mi vida de alegría desde el momento que formó parte de ella.

A mis padres Patricia Rivadeneira y Marcelo Baquero, por ser el mayor apoyo y motor para cumplir las metas y objetivos planteados.

A mis queridos tíos Mariana Baquero y Alfredo Baquero, por estar siempre presentes especialmente en los momentos difíciles.

A mis queridas primas Carla Báez y Stefany Merlo por ser quienes me inspiran y por haberme brindado sus valiosos consejos.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a mis padres y hermano por el apoyo brindado, el tiempo invertido y el esfuerzo realizado durante la etapa universitaria.

A mi director Armando Echeverría por toda la paciencia, tiempo dedicado y los conocimientos otorgados durante la etapa universitaria, quien con sus valiosos aportes permitió que culminara con éxito mi tesis.

A mis lectores Jorge Campaña y Galo Manrique por el tiempo invertido y sus valiosos aportes.

Especialmente a mi profesor Jorge Campaña por todas las experiencias y conocimientos compartidos en la etapa universitaria y laboral.

A mis queridas amigas Jimena Rosero, Jessica López, Diana Calero, Carolina Placencia y Lourdes Quiroz y por sus valiosos conocimientos académicos y su apoyo incondicional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.4 OBJETIVOS	7
1.4.1 Objetivo General	7
1.4.2 Objetivo Específico	7
1.5.1.1.3 Índice de peligro australiano	9
1.5.1.1.4 Índice de peligro francés	9
1.5.1.1.5 Índice de peligro italiano	10
1.5.1.1.6 Índice de peligro portugués	10
1.5.1.1.7 Índice de peligro español	10
1.5.1.2 Situación actual de los incendios forestales	11
1.5.1.3 Problemática de los incendios forestales	13
1.5.2 Marco teórico	15
1.5.3 Marco conceptual	19
1.5 METODOLOGÍA Y TÉCNICAS	21
CAPÍTULO II	25
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	25
2.1.1 Variables biofísicas	25
2.1.1.1 Localización y superficie	25
2.1.1.3 Geología	26
2.1.1.4 Geomorfología	27
2.1.1.5 Hidrografía	27
2.1.1.6 Clima	28
2.1.1.7 Suelos	28
2.1.2 Variables socioeconómicas	29
2.1.2.1 Demografía	29
2.1.2.2 Crecimiento poblacional	30
2.1.2.3 Actividades económicas	31

2.1.2.4	Infraestructura cercana a los bosques protectores.....	31
2.1.2.5	Accesibilidad vial a los bosques protectores.....	31
2.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS BOSQUES PROTECTORES.....	32
2.2.1	Tipo de Ecosistemas.....	35
2.2.2	Zonas de vida según Holdridge	
2.2.3	Tipos de bosques	37
2.3	INTRODUCCIÓN A LOS INCENDIOS FORESTALES	38
2.3.1	Definición.....	38
2.3.2	Origen	38
2.3.3	Geometría	39
2.3.4	Clasificación	39
2.3.5	Triangulo de fuego.....	40
2.3.6	Formas de propagación.....	41
2.3.7	Fases de combustión del fuego.....	41
2.3.9	Niveles de incendio.....	42
CAPITULO III		44
3.1	DESCRIPCIONES GENERALES	44
3.1.1	Áreas de susceptibilidad a incendios forestales – DMQ.....	44
3.1.2	Incendios forestales en el marco de cambio climático en el DMQ	46
3.1.3	Comparación de la metodología para la determinación de la susceptibilidad a incendios forestales propuesto por la Secretaría de Gestión de Riesgos	49
3.2	DESCRIPCION DEL PRE-PROCESAMIENTO DIGITAL	50
3.2.1	Definición de Teledetección.....	50
3.2.2	Definición del Espectro Electromagnético	50
3.2.3	Pre-procesamiento digital.....	52
3.2.3.1	Correcciones atmosféricas de las imágenes	53
3.2.4	Resoluciones de la Plataforma Landsat OLI/TIRS misión 8	54
3.2.4.1	Resolución radiométrica.....	54
3.2.4.2	Resolución espectral.....	54
3.2.4.3	Resolución temporal	55
3.2.4.4	Resolución espacial	55

CAPITULO IV	56
4. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA	56
4.1 RECOPIACIÓN Y VERIFICACIÓN DE INFORMACIÓN DE TIPO VECTOR Y RASTER	56
4.1.1 Vector	56
4.1.2 Raster	57
4.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN DE LOS DATOS VECTOR Y RASTER	57
4.2.1 Vector	57
4.2.2 Raster	64
4.2.2.1 Correcciones atmosféricas	64
4.2.2.2 Sustracción de la nubosidad	67
4.2.2.3 Extracción de la mancha urbana	71
4.3 CÁLCULO DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES Y DETERMINACIÓN DE ZONAS DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES	76
4.3.1 Cálculo del índice NDVI	76
4.3.2 Cálculo del índice NDMI	79
4.3.3 Cálculo del índice RGRE (Normalización del NDVI)	82
4.3.4 Normalización del índice NDMI	86
4.3.5 Ponderación de los índices normalizados (RGRE y NDMI)	89
4.3.6 Reclasificación de la imagen ponderada	92
4.4 CÁLCULO DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL PELIGRO DE INCENDIOS Y EL ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONNE	95
CAPITULO V	99
5.1 RESULTADOS Y CONCLUSIONES	99
5.1.1 Análisis de la correlación entre el índice de aridez y el peligro de incendios forestales	99
5.1.2 Análisis de resultados	100
5.1.3 Identificación de áreas de peligros de incendios forestales	101
5.2 RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXOS	110

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros para la obtención del NDVI.....	22
Tabla 2: Clasificación de Vegetación.....	33
Tabla 3: Niveles de incendios forestales	42
Tabla 4: Imágenes satelitales	53
Tabla 5: Resultados de la correlación.....	97

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Parámetros para la obtención del NDMI	23
Figura 2: Parroquias del Distrito Metropolitano de Quito	26
Figura 3: Proyección poblacional 2010 - 2020.....	30
Figura 4: Clasificación de los incendios forestales	40
Figura 5: Formas de propagación del calor	41
Figura 6: Espectro Electromagnético	51
Figura 7: Cálculo de índices espectrales	51
Figura 8: Bandas satelitales LANDSAT OLI/TIRS misión 8.....	52
Figura 9: Interpolación de coberturas.....	58
Figura 10: Cálculo del índice de aridez de Martonne 2015	59
Figura 11: Cálculo del índice de aridez de Martonne 2016	59
Figura 12: Resultados del cálculo de índice de Martonne	60
Figura 13: Interpretación de Índice de Martonne.....	61
Figura 14: Reclasificación de los valores del índice de aridez de Martonne 2015	61
Figura 15: Reclasificación de los valores del índice de aridez de Martonne 2016	62
Figura 16: Resultados de la reclasificación.....	63
Figura 17: Resultado de las correcciones atmosféricas.....	67
Figura 18: Cálculo de la extracción de nubes según el valor del pixel	68
Figura 19: Resultado de la sustracción de nubosidad	71
Figura 20: Cobertura de uso y ocupación del suelo (abril 2010)	72
Figura 21: Máscara con la nueva cobertura PUOS_abril2010.....	73
Figura 22: Resultados de la extracción de la mancha urbana	76
Figura 23: Cálculo del NDVI.....	77
Figura 24: Resultados del cálculo del NDVI	79
Figura 25: Cálculo del NDMI	80
Figura 26: Resultados del cálculo del NDMI.....	82
Figura 27: Valores de índice verde de distintos tipos de cobertura vegetal	83
Figura 28: Cálculo del RGRE	83
Figura 29: Resultados del cálculo del RGRE	85
Figura 30: Normalización del NDMI	86

Figura 31: Resultados de la normalización del NDMI.....	88
Figura 32: Cálculo de la ponderación de índices normalizados (RGRE y NDMI).....	89
Figura 33: Resultados de la ponderación de índices normalizados.....	91
Figura 34: Reclasificación de la imagen ponderada.....	92
Figura 35: Resultados de la reclasificación de la imagen ponderada.....	94
Figura 36: Peligro de Incendios forestales/15 de septiembre del 2015.....	95
Figura 37: Correlación entre el peligro de incendio y el índice de aridez de Martonne	96

INDICE DE MAPAS

Mapa 1: Localización de los bosques protectores del DMQ.....	4
Mapa 2: Susceptibilidad a Incendios Forestales del DMQ	45
Mapa 3: Peligro potencial de Incendios Forestales relacionados con factores de susceptibilidad a la iniciación y propagación	48
Mapa 4: DMQ-Peligro de Incendios forestales 27 de junio del 2015	110
Mapa 5: DMQ-Peligro de Incendios forestales 13 de julio del 2015	111
Mapa 6: DMQ-Peligro de Incendios forestales 30 de agosto del 2015.....	112
Mapa 7: DMQ-Peligro de Incendios forestales 15 de septiembre del 2015.....	113
Mapa 8: DMQ-Peligro de Incendios forestales 17 de octubre del 2015	114
Mapa 9: DMQ-Peligro de Incendios forestales 15 de julio del 2016.....	115
Mapa 10: DMQ-Peligro de Incendios forestales 16 de agosto del 2016.....	115
Mapa 11: DMQ-Peligro de Incendios forestales 17 septiembre del 2016.....	117

LISTA DE ACRÓNIMOS

BQA: Quality Assesment Band (banda de evaluación de calidad)

COE-M: Centro de Operaciones de Emergencia Metropolitano

CONAFOR: Comisión Nacional Forestal

DMQ: Distrito Metropolitano de Quito

FAO: Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

MAE: Ministerio del Ambiente

NBI: Necesidades básicas insatisfechas

NIR: Near Infrared (infrarrojo cercano)

PUOS: Plan de Uso y Ocupación del Suelo

SWIR: Short wave infrared (infrarrojo de onda corta)

USGS: United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estado Unidos)

CAPÍTULO I

1.1 JUSTIFICACIÓN

A diferencia de otras amenazas naturales, los incendios forestales son uno de los peligros más predecibles. Sin embargo, los esfuerzos por evitar la ocurrencia de este fenómeno a grandes magnitudes no han sido suficientes, las razones principales se deben al no percibir el riesgo como parte de la convivencia y al no incorporar el conocimiento del riesgo como una herramienta de prevención (Moreno, Castro, & Bretón, 2007). Es evidente que la erradicación de los incendios forestales no se puede lograr por el hecho de que un territorio es dinámico además de enfrentarse ante un número limitado de recursos y una expansión de zonas potenciales de riesgo, donde las variables medioambientales, sociales y económicas son analizadas individualmente (Biro, 2009).

Se considera necesario incorporar, además de estrategias y políticas integrales, invenciones tecnológicas como: el uso de los sensores remotos e imágenes satelitales que permitan el ahorro de recursos y se obtenga resultados en menor tiempo, por lo que disponer de índices y productos que favorecen a la toma de decisiones en cuanto a minimizar las consecuencias, es considerado como una gestión eficiente en el territorio y sus áreas naturales (Instituto Forestal, 2016).

Los sensores remotos son herramientas utilizadas para el estudio espacial del ambiente y se destaca por su capacidad de seguir procesos dinámicos. Uno de los productos que ofrece son las imágenes satelitales obtenidas a través de los sensores remotos que contiene valiosa información para estudiar los cambios que se producen en el hábitat terrestre, ya sea por los ciclos estacionales, catástrofes naturales o alteraciones antrópicas (Comisión nacional de actividades espaciales, 2015).

El análisis en el mapeo del peligro de incendios forestales, además de proporcionar información relevante sobre la ocurrencia e intensidad del fuego, considera las causas que lo originan asumiendo que el riesgo de incendio aumenta con los cambios de uso de suelo, causado por la intervención de bosques originadas por actividades agrícolas e invasión de zonas residenciales (Chéret & Denux, 2007). Como consecuencia de un incendio forestal inevitablemente se produce la pérdida de vegetación, lo cual en la mayoría de casos se percibe

como un factor negativo por provocar un incremento en la erosión, problemas de inundación, azolve en las reservas de agua, sedimentación, entre otros (Lentile, Holden, Smith, Falkowski, & Hudak, 2006). También se presenta una disminución de servicios ambientales como la calidad de agua, pérdida de hábitats y especies de flora y fauna silvestre, además de generar problemas en la salud y daños en cuanto a infraestructura que afectan a las poblaciones aledañas (Torres Rojo, Magaña Torres, & Ramirez Fuentes, 2005).

Al adecuar técnicas de teledetección mediante el uso de índices espectrales (RGRE) y meteorológicos (Martonne) que permitan identificar el peligro de incendios forestales, favorece a la prevención y al enfoque de esfuerzos en zonas vulnerables, además de considerar una evaluación y monitoreo permanente a largo plazo con el fin de priorizar acciones que aporten a la planeación y ejecución del combate de siniestros (Carroll, Blatner, & Cohn, 2008).

El índice de verdor relativo RGRE (*relative greenness index*) está considerado dentro de los índices de variación temporal que se obtiene a partir de valores máximos y mínimos del NDVI (*normalized vegetation index*), y es utilizado para realizar el monitoreo del estado de la vegetación y su predisposición al fuego. Los resultados obtenidos a partir del empleo de éste índice se consideran razonables por brindar una valoración de la tendencia a arder en áreas extensas (Burgan, 1995) citado en (Chuvieco & Martín, 2004). Los autores que han probado en RGRE son: Alonso, M. 1996 España (correlación del RGRE con un valor de 0.8 para matorrales); Deshayes, M. 1998 Francia (contenido de humedad en matorrales); Gonzales, F. 1997 (condiciones de riesgo mediante el decremento de valores de NDVI); Illera, P. 1996 (Índice de pendiente acumulada en periodos de tiempo de peligro de incendio) y López, A. 1991 (decremento relativo NDVI para el riesgo de incendio) (Chuvieco & Martín, 2004).

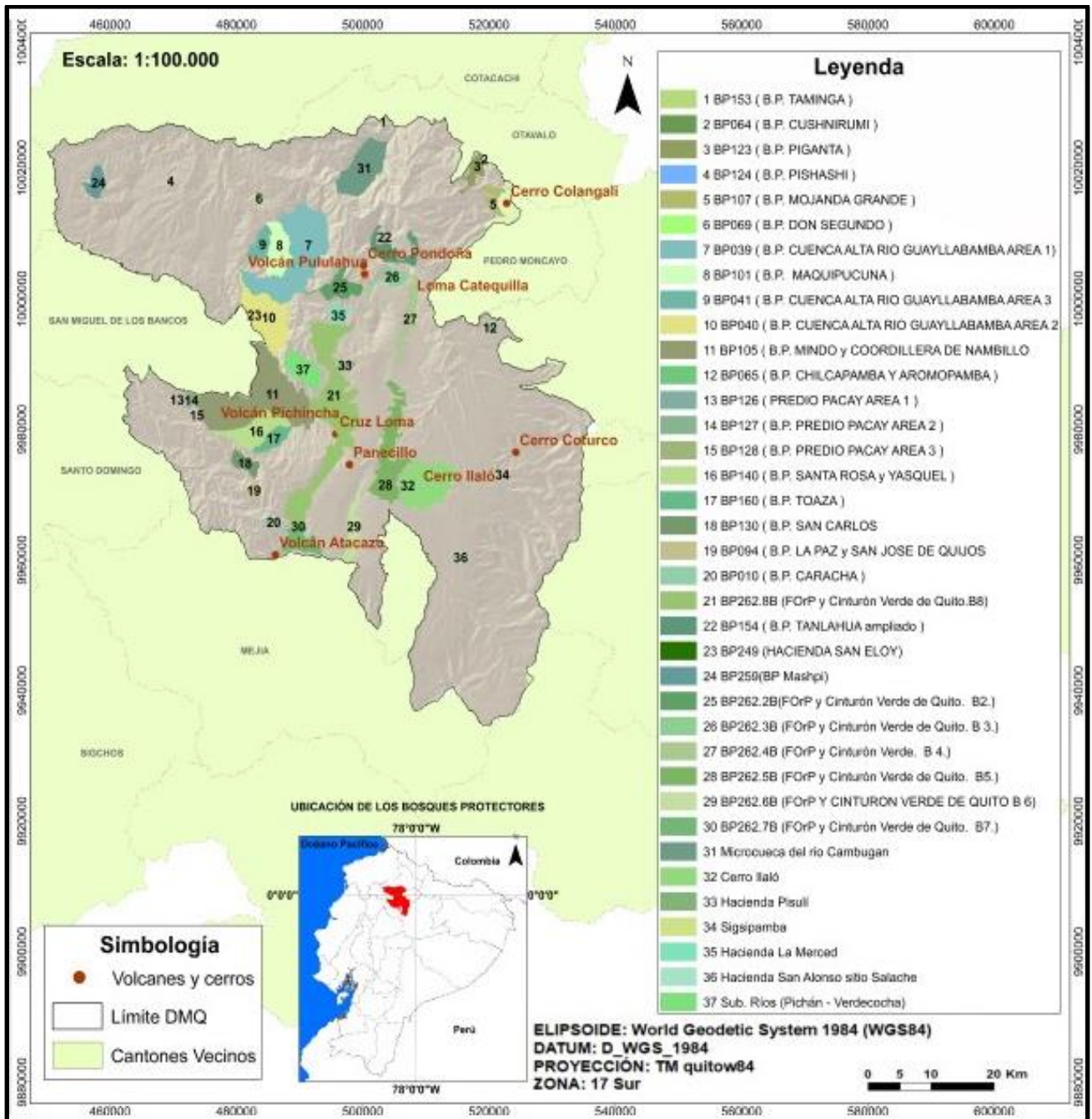
El índice de aridez de Martonne es utilizado para detectar la transición entre ambientes áridos, semiáridos y húmedos (Almarox, 2003). A continuación, se mencionarán algunos estudios en los que el índice de Martonne fue aplicado. Mercado, G. en el año 2010 consideró este índice para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zonas áridas de baja California Sur (Mercado, Troyo, & Aguirre, 2010). Mavrakis, A. en el año 2013 aplicó el índice para establecer zonas de estrés ambiental en Grecia (Mavrakis & Papavasileou, 2013). En el año 2006 fue utilizado por Chéret, V. para establecer el peligro

de incendios forestales en Francia mediante el uso de datos de precipitación y temperatura considerando una serie de 6 años (1998 al 2003) (Chéret & Denux, 2007).

En el estudio realizado por Chéret, V. que establece el peligro de incendios forestales, se realizó la correlación entre el RGRE y el índice de Martone. Como resultado se obtuvo un valor de $r=0,70$ lo que sugiere una correlación significativa, además que los valores anuales del RGRE coinciden con los valores más bajos del índice de aridez de Martonne, lo que resulta como resequeidad alta (Chéret & Denux, 2007).

Los bosques protectores del DMQ son considerados importantes por ser responsables de la variedad de climas y microclimas que inciden en la diversidad de ecosistemas. Además de caracterizar al territorio como un mosaico paisajístico, ambiental y sociocultural (Pacheco, Balarezo, Revelo, & Ulloa, 2011). La protección y cuidado de los mismos está regido bajo un marco legal que establece 25 boques protectores con 76.650 hectáreas del territorio, este reglamento está contemplado en el plan general de desarrollo territorial del DMQ a través del plan de uso y ocupación del suelo (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2006). Los incendios forestales han generado grandes consecuencias negativas en los bosques protectores. A escala regional y local los impactos son significativos por presentar modificaciones en el volumen de la biomasa, alteraciones del ciclo hidrológico, reducción de actividades fotosintéticas por la presencia del humo, afectaciones en la salud de los seres humanos y animales, entre otros; a escala mundial contribuye al calentamiento global por generar importantes cantidades de emisión de gases de efecto invernadero (Davies & Unam, 1999) citado en (FAO, 2001).

Mapa 1: Localización de los bosques protectores del DMQ



Durante el verano del año 2015 se presentaron condiciones climáticas extremas debido a las altas temperaturas, vientos fuertes y humedades relativas muy bajas. En el Distrito Metropolitano de Quito los eventos registrados por incendios forestales fueron 3.330 con 3.287,52 hectáreas de área quemada según menciona el Cuerpo de Bomberos en su informe de gestión 2015, donde asegura que existió un incremento porcentual del 162,2% en el número de eventos con relación al 2014 (Cuerpo de Bomberos del DMQ, 2015). Para el año 2016 se evidencia una disminución de incendios forestales gracias a la ejecución de simulacros, la construcción de nuevas estaciones (parroquia de Nono), capacitaciones constantes dirigidas a los ciudadanos sobre medidas de prevención y la puesta en marcha del Plan de prevención y respuesta a incendios forestales con la campaña “Yo amo mis bosques”. En el año mencionado se tramitaron 1.068 emergencias relacionados con el plan de prevención y respuesta ante incendios forestales y se presentó una disminución del 64,55% de eventos por fuego. El número de siniestros por incendios forestales descendió a 716 respecto al año anterior con un área de quema de 128 hectáreas (Cuerpo de Bomberos del DMQ, 2016).

En consecuencia, se considera que los acontecimientos mencionados en los años 2015 y 2016 son relevantes para la aplicación de este estudio con el fin de realizar un análisis y comparación de los resultados que se van a obtener para identificar zonas vulnerables, cambios y efectos causados por incendios forestales.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este estudio se consideran como variables independientes a la precipitación y temperatura, y como variable dependiente al peligro de incendio. Las variables mencionadas presentan una gran influencia en el comportamiento fenológico que incide en el estado de la vegetación. Es importante mencionar que en el DMQ existe una variedad de climas y microclimas como son: nival, templado y subtropical, que presentan temperaturas promedio 14,78 Grados Centígrados y humedades relativas del 75% (Valdivieso, 2005). Según el INAMHI y la Secretaria de Ambiente consideran que los eventos extremos relacionados con lluvias intensas (deslizamientos de tierra por inundaciones) y sequías han aumentado en los últimos años, dando como resultado un incremento de fenómenos hidroclimáticos,

morfodinámicos e incendios forestales; consecuentemente se evidencia que el mayor número de incendios forestales producidos coinciden con la época de estiaje (Secretaría de Ambiente, 2015).

La distribución de las precipitaciones influye en el estado de la vegetación, existen zonas con precipitaciones inferiores a 400 mm al año correspondientes al bosque seco, representadas por San Antonio de Pichincha, El Quinche, Yaruquí y Tababela; y otras zonas con precipitaciones mayores a 4.500 mm anuales que están bajo la influencia de masas de humedad orientales con un período seco entre junio y octubre (Secretaría de Ambiente, 2013). La ausencia o presencia de precipitaciones determina el vigor de la vegetación, por ende, tiene una fuerte relación con la propagación de los incendios forestales. Cuando las precipitaciones son escasas se evidencia una disminución de escorrentía con la presencia de caudales mínimos que se consideran necesarios por aportar a las descargas subterráneas, aumentando la capacidad de retención de agua en el suelo y por ende humedeciendo la vegetación. Por el contrario, las temperaturas elevadas ocasionan mayores tasas de evapotranspiración consecuentemente se genera una menor producción de agua en los páramos afectando a la escorrentía. Sin embargo, las precipitaciones tienden a modificar el estado de la vegetación directamente, opuesto a lo mencionado, si se presentan temperaturas elevadas durante un periodo prolongado se produce un resecamiento de las especies vegetales siendo las más vulnerables las especies inflamables (Andrade & Ríos, 2014).

El presente proyecto de titulación tiene la finalidad de identificar las zonas con mayor peligro a incendiarse tomando en consideración variables meteorológicas como la precipitación y la temperatura que modifican el estado de la vegetación. Dichos procesos se realizaron a través del uso de sensores remotos y el tratamiento de imágenes satelitales con el propósito de obtener resultados que sirvan como medidas de prevención y disminución de daños económicos que son producidos por los incendios forestales.

1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- a) ¿Dónde se encuentran las zonas de riesgo potencial para que inicie los incendios forestales en los Bosques Protectores del DMQ?
- b) ¿Qué períodos presentan un mayor peligro de incendios forestales durante el año en el DMQ?
- c) ¿Qué períodos presentan una mayor sequedad en la vegetación de los bosques protectores del DMQ?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Realizar el análisis del peligro de incendios forestales mediante el uso de sensores remotos en los bosques protectores del Distrito Metropolitano de Quito en los años 2015 y 2016.

1.4.2 Objetivo Específico

- Caracterizar los bosques protectores del DMQ.
- Recopilar y validar la información de tipo vector (precipitación y temperatura) y de tipo raster (imágenes satelitales con los meses con mayor cantidad de incendios forestales del año 2015 y 2016).
- Realizar el procesamiento de la información de las imágenes satelitales y los datos de precipitación y temperatura.
- Calcular los índices NDVI (*normalized difference vegetation index*), RGRE (*greenness relative index*) y NDMI (*normalized difference moisture index*) de los meses con mayor cantidad de incendios forestales de los años 2015 y 2016.
- Analizar la correlación del resultado del peligro de incendios con el índice de aridez de Martonne.

1.5. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.5.1 Antecedentes

1.5.1.1 Estado del arte

La creación y empleo de los primeros índices surgió en Estados Unidos y Canadá por el Servicio Forestal en el año 1930 al aplicarse por primera vez un índice de peligro en Montana. Posteriormente se crea un sistema de peligro de incendios en 1978 que consistía en la combinación de 4 índices como: un índice de ocurrencia, un índice de combustión, un índice de carga, y finalmente un índice de severidad estacional (Chuvienco & Martín, 2004).

Gracias a Gisborne en 1993, se crea un medidor de peligro que se caracteriza por correlacionar 5 variables meteorológicas (grado de humedad, humedad relativa, evolución de los combustibles, actividad de los agentes causantes y radio de la visibilidad) para después analizar su efecto conjunto y establecer 7 clases de peligro que establecían información tanto del comportamiento como de organización para efectuar la extinción. Para el año 1963 se desarrollaron 8 sistemas diferentes a partir de las bases que establecía Gisborne, posteriormente mediante acuerdos se creó un sistema nacional en 1964 (Lawson, 1977) citado en (Chuvienco & Martín, 2004).

El origen de los sistemas de prevención de incendios forestales se ha otorgado a los índices de peligro y los países que desarrollaron los primeros índices experimentales fueron Australia en 1976, Rusia en 1949, Francia en 1974 y España en 1987 (Chuvienco & Martín, 2004).

1.5.1.1.1 Índice meteorológico de peligro canadiense

Este índice forma parte del sistema canadiense “*Canadian forest fire weather index system*” fue creado en 1970 y posteriormente ha sido modificado y utilizado en sucesivas ediciones por Van Wagner en 1984. Al ser un índice meteorológico tiene como objetivo estimar el comportamiento del fuego en el tipo de combustible referente al pino maduro. De este sistema se derivaron otros índices más como: FWI - *fire weather index*, FFMC - *fine fuel*

moisture code, DMC - *duff moisture code*, DC - *drought code*, ISI - *initial spread index* y BUI - *build up index* (Wagner, 1987) citado en (Chuvienco & Martín, 2004).

1.5.1.1.2 Índice de peligro estadounidense

Para determinar el peligro de incendios en este sistema se toma en cuenta variables como la humedad del combustible, la sequía, velocidad del viento y pendiente. Mediante la información obtenida de estas variables se crea una base de datos para analizar sus dinámicas y establecer el modelo de comportamiento del fuego Rothermel que tiene como fin predecir el comportamiento de fuego de superficie (Rothermel, 1983) citado en (Chuvienco & Martín, 2004).

1.5.1.1.3 Índice de peligro australiano

En Australia los índices más utilizados son: *grassland fire danger rating system* y *forest fire danger meter*. El primero sirve para estimar el contenido de humedad para cubiertas herbáceas a partir de ecuaciones empíricas, y segundo estima el grado de dificultad para controlar un incendio desarrollado a partir de combustibles finos. Un limitante del índice australiano es que es aplicable únicamente en los bosques de eucalipto (Cheney, 1991) citado en (Chuvienco & Martín, 2004).

1.5.1.1.4 Índice de peligro francés

Los índices utilizados en este sistema se enfocan a las condiciones de las áreas mediterráneas. El *risque numerique meteorologique* se comenzó a utilizar en el año 1988 con el propósito de identificar la ignición y propagación tomando en cuenta variables como la masa forestal, regímenes del viento, precipitaciones y el relieve. En el cálculo de este índice se consideran tres etapas: cálculo de las reservas de agua del suelo, previsión de parámetros meteorológicos y la obtención del riesgo final (Carrega, 1991) citado en (Chuvienco & Martín, 2004).

1.5.1.1.5 Índice de peligro italiano

Dependiendo de la zona geográfica en Italia se utilizan dos índices de peligro. En la zona mediterránea se calcula el índice denominado *forest fire danger meter* el cual fue creado por McArthur. En la región de los Alpes se utiliza el *indice di riduzione evapotraspirazionale per il pericolo di incendio* (IREPI). Existen registros de que los incendios se producen mayormente en el invierno y la primavera a causa del efecto Foehn (Pamieri, Inghilesi, Siani, & Martellacci, 1992) citado en (Chuvieco & Martín, 2004).

1.5.1.1.6 Índice de peligro portugués

Desde 1988 se utiliza una derivación del índice de Nesterov que consiste en el aumento de valores desde el inicio de la época de incendios en función del número de días sin lluvia y se utiliza dos indicadores uno numérico y otro subjetivo. El primero se considera como un índice de ignición que tiene que ver con el déficit de saturación y el segundo al ser un índice acumulativo recoge los valores diarios y representa la influencia que tiene la sequía en el vigor de la vegetación viva (Goncalves & Lourenco , 1990) citado en (Chuvieco & Martín, 2004).

1.5.1.1.7 Índice de peligro español

La metodología utilizada en España consiste en la experimentación de diferentes índices utilizados en distintos países. En primera instancia se aplicó la metodología canadiense para estimar la peligrosidad en base a datos de humedad relativa, viento y precipitación; en 1977 se utilizó el índice australiano que considera en los cálculos a la ignición y la propagación; en 1987 se aplicó el índice de la ICONA creado por Rothermel que incluía además de las variables meteorológicas el contenido de humedad de los combustibles ligeros y muertos. En la actualidad se están utilizando índices que determinan el grado meteorológico de peligro los cuales son realizados diariamente para integrar las variables con un índice de riesgo local de incendio (Chuvieco & Martín, 2004).

1.5.1.2 Situación actual de los incendios forestales

Estudios recientes demuestran que los bosques de las zonas ecuatoriales no son los únicos que están propensos a incendiarse. La relación de este fenómeno con climas cálidos por presentar períodos de sequías más prolongados, no son las únicas condiciones que generan grandes incendios. En las regiones boreales, tropicales, templadas áridas y semiáridas también están expuestas a este fenómeno de afectación global (Campo Velásquez, 2012). Las estimaciones realizadas identifican afectaciones anuales entre 10 a 15 millones de hectáreas comprendidas por bosques boreales y templados, así como también pérdidas de 20 a 40 mil hectáreas en los bosques tropicales, y en casos más severos hasta 500 millones de hectáreas en las sabanas tropicales y subtropicales, montes y bosques abiertos (Goldammer, 1995) citado en (Campo Velásquez, 2012).

El aumento de la temperatura del aire y la disminución de precipitaciones durante el verano, otorgado por los efectos del calentamiento global, están estrechamente relacionados con la ocurrencia, duración y frecuencia de incendios forestales que a su vez tienen influencia en los cambios vegetativos (FAO, 2001). Sin embargo, existen estudios que aseguran que algunos efectos del calentamiento global como la temperatura, influirían en el aumento o disminución del combustible vegetal donde intervienen procesos de descomposición y alteración del material existente, dependiente del régimen del fuego que mantenga un ecosistema (Pausas & Bradstock, 2007) citado en (Campo Velásquez, 2012).

A nivel mundial los incendios forestales son uno de los factores que generan daños ecosistémicos y afectaciones en los bosques. Se estima que alrededor de 350 millones de hectáreas anuales representan una pérdida por quemaduras en todo el mundo, considerados como causas principales los patrones climáticos, los cambios de usos de suelo y el incremento poblacional en zonas forestales (USDA, 2008).

En el caso de América del Sur los problemas como la destrucción de los recursos naturales renovables generan grandes impactos económicos, sociales y ambientales, además de ser considerado este territorio como una región forestal debido a que un 50,7% de su superficie se encuentra cubierta de bosques (Julio Alvear, 2004).

Según datos presentados por la FAO, 6 de los 13 países que conforman Suramérica contaron con registros de la ocurrencia de sus incendios forestales hasta el año 2000, los

cuales presentaron un promedio de 126,96 incendios por cada 10.000 hectáreas anualmente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2003). Los 7 países restantes no contaban con información sobre los incendios producidos y sus áreas afectadas, uno de ellos es Ecuador. En el artículo presentado por el Dr. G. Julio en el año 2004 titulado “Gestión de protección contra Incendios Forestales en América del Sur”, propone una estimación de las afectaciones, considerando una pérdida de 4,8 millones de hectáreas anuales en 230.000 incendios, este precedente establece un supuesto daño económico que ascenderían a 1,44 millones de dólares por año para toda la región Suramericana (Julio Alvear, 2004).

Según el informe realizado por la Secretaría de Gestión de Riesgos, en el Ecuador existen 9 amenazas principales que afectan su territorio, la séptima amenaza corresponde a incendios forestales (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2015). Entre los años 2012 al 2017 se han registrado 7.655 incendios forestales con una pérdida de 57.000 hectáreas de bosques y páramos siendo las provincias con mayor afectación Azuay, Bolívar, Cañar, Carchi, Chimborazo, Cotopaxi, Guayas, Manabí, El Oro, Tungurahua y sobretodo Loja, Imbabura y Pichincha; además de contar con hechos lamentables como el fallecimiento de 14 personas a causa de las quemaduras (La República, 2017).

Para el verano del 2017 el Ministerio del Ambiente, la Secretaria de Gestión de Riesgos y el Sistema Integrado de Seguridad ECU 911 realizaron el lanzamiento de la campaña “Ecuador sin Fuego”, además de contar con planes de prevención, control de incendios forestales, planes de contingencia y remediación de áreas afectadas ejecutadas a través de las diferentes Direcciones Provinciales, con el fin tener un absoluto control de zonas frágiles como el sistema nacional de áreas protegidas, patrimonio natural del estado, patrimonio forestal, boques, vegetación protectora y sus zonas de influencia (Ministerio del Ambiente, 2017).

La situación en el Distrito Metropolitano de Quito es regular ya que, según el informe que establece indicadores de ciudad sostenible con respecto a la gestión de riesgos forestales, los indicadores cualitativos y cuantitativos demuestran una gestión media en su evaluación final, siendo los parámetros considerados altos, medios y bajos. Ante esta calificación se propone mejorar la comunicación interinstitucional involucrada en la respuesta de las políticas públicas y emergencias referentes a la gestión de riesgos forestales, además de

agilizar la gestión con la creación de planes de contingencia a nivel parroquial (Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, 2014).

1.5.1.3 Problemática de los incendios forestales

Las condiciones meteorológicas están fuertemente racionadas con el desarrollo de un incendio forestal. Se considera al cambio climático uno de los causantes de las alteraciones en los fenómenos del clima y consecuentemente desencadenan problemas graves como son los incendios forestales (Bird & Molinelli, 2001).

La temperatura del aire es uno de los factores más importantes que controlan los procesos físicos. En cada incendio forestal se generan cambios ambientales a causa de las variaciones en la distribución de la temperatura que afectan a los ecosistemas de los boques por haber sufrido alteraciones provocadas por el fuego (Vlassova, Páez, Rodríguez, Montorio, & García, 2014). En consecuencia, los efectos de cambio climático producen sequías, aumentos de temperatura y disminución de precipitaciones por lo que es más probable la ocurrencia de un incendio forestal. Las precipitaciones son favorecedoras al momento de evitar un incendio forestal por tener gran influencia en la regulación del estado de la vegetación, la velocidad de acumulación de material combustible y disminución de características de inflamabilidad (Purkey, Baca, & Estacio, 2014).

Entre las amenazas más evidentes en el Distrito Metropolitano de Quito se consideran las sequías y las lluvias (Yates, y otros, 2013). Para la época de verano comprendida entre los meses de junio a septiembre (en algunos años hasta octubre) se reportan períodos de estiaje con temperaturas elevadas generando mayores días secos consecutivos, por lo que estas condiciones están relacionadas con el aumento de incendios forestales de duración y propagación mayor, además de provocar un cambio en el estado de la vegetación ya que mientras mayor sea la temperatura, la combustibilidad aumenta debido a que el combustible forestal se seca rápidamente; específicamente entre los 30 y 35 grados centígrados. Por el contrario en los meses del período lluvioso se presentan condiciones de mayor humedad del suelo y aire haciendo que la velocidad de propagación de incendios sea menor (Purkey, Baca, & Estacio, 2014).

Dentro del riesgo de incendios forestales se pueden considerar las amenazas naturales ya mencionadas y las amenazas antrópica. En el caso de los incendios producidos por la

actividad humana se considera que los detonantes también van acompañados de factores naturales (Yépez & Araúz, 2013).

En el territorio ecuatoriano 4 de cada 5 incendios forestales son causados por intervenciones antrópicas, entre las principales causas se consideran las ideologías arraigadas a una cultura donde se usa el fuego para la preparación del suelo, seguido de quemas relacionadas con actividades piro maniáticas en áreas protegidas y bosques (Ministerio del Ambiente, 2017).

A nivel del paisaje, la teledetección puede respaldar aspectos del manejo del fuego proporcionando información valiosa del riesgo y peligro de incendios, además de considerar la frecuencia de incendios a través de los canales multispectrales disponibles (Saglam, Bilgili, & Durmaz, 2008). Mediante la teledetección se puede realizar una observación terrestre y obtener información de los incendios forestales inmersos a los grandes procesos ambientales tanto a nivel local, regional y global que son considerados de alta complejidad por su dinamismo. El uso de los sensores remotos para aplicaciones de incendios forestales es viable porque se logra un abaratamiento de costos en relación a otras técnicas como fotografía aérea o la visita de campo, se puede realizar actualizaciones en cortos intervalos de tiempo si el fin es el monitoreo, se dispone de información de regiones no visibles del espectro infrarrojo y se puede realizar los procesamientos digitales que ayuda a una interpretación visual (Chuvieco, 2000). Además, se puede identificar variables atmosféricas como el contenido de humedad de la vegetación relacionada con las precipitaciones, que no se pueden detectar fácilmente a partir de observaciones de campo por requerir de la evaluación de cada espécimen, lo que sería un proceso no representativo. Cabe mencionar que existen ciertas limitaciones que pueden alterar los resultados relacionados a los datos obtenidos por satélites artificiales como la falta de información en zonas con cobertura nubosa para el caso de LANDSAT 8 (Chuvieco & Martín, 2004).

A pesar de que existen diferentes metodologías y técnicas para enfrentar, controlar y determinar el daño de un incendio forestal, todavía se presentan algunas limitaciones que se pretenden superar mediante el empleo de la teledetección, la cual permitirá identificar los estados de la vegetación y su comportamiento ante agentes meteorológicos, con el fin de identificar áreas que son propensas a quemarse.

1.5.2 Marco teórico

Los aportes conceptuales detallados a continuación tienen la finalidad de fundamentar este estudio tomando en cuenta áreas de la Geografía como la Teledetección.

La Geografía es considerada una ciencia espacial por ser una disciplina que incorpora el estudio y la observación de las variaciones y comportamientos de los patrones espaciales. Las relaciones espaciales se basan principalmente en el desarrollo de leyes racionales y teóricas que puedan explicar y predecir la localización y distribución espacial de todos los fenómenos que ocurren sobre la superficie terrestre, sean estos de carácter natural o cultural (Quintero & Gerardo, 2010).

El término Geografía, al significar descripción de la tierra, incorpora el análisis de las interrelaciones de los sistemas espaciales entre las sociedades humanas y los entornos naturales que modifican la superficie terrestre (Fellmann & Getis, 1999). La interacción entre el ser humano y su medio ambiente obedece a una interrelación recíproca que procura un equilibrio que dependerá del grado de hostilidad ambiental y del desarrollo tecnológico, material y cultural de la sociedad, en donde se presentan una variedad de posibilidades en las que en ocasiones se impone más el ambiente y en otras la acción humana (Quintero & Gerardo, 2010).

La Geografía física, al pertenecer a la rama de las ciencias de la tierra, permite el estudio del medio natural que rodea al hombre y vincula un conjunto de principios básicos de las ciencias naturales que tiene relación con las influencias ambientales que varían de un lugar a otro en la superficie terrestre. La Geografía física dirige su atención al ambiente natural del humano, su preocupación se centra en los accidentes geográficos, su distribución, las condiciones atmosféricas y cambios climáticos (Strahler, 1979).

En la aplicación de la teledetección y el uso de imágenes satelitales, se consideran a estas ciencias dentro del marco de los principios de la Geografía aplicada propuesta por L. Dudley Stamp en 1963, y consiste en la aplicación de conocimientos y habilidades geográficas para la solución de problemas dentro de la sociedad, considerando el surgimiento de técnicas de planificación urbana y regional, los problemas de uso inadecuado de la tierra, la necesidad de ordenación del territorio y la utilización óptima de los recursos naturales mediante la implementación de métodos geográficos con experiencia en técnicas de

fotointerpretación y sensores remotos, sistemas de información geográfica, catastros y problemas ambientales (Quintero & Gerardo, 2010). En consecuencia se define a la teledetección como la observación remota de la superficie de la tierra donde no solo se toma en cuenta los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento en el contexto de una determinada aplicación (Chuvienco, 2000). Es considerada como una técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie de la tierra (Gonzaga, 2014). Se considera como una técnica aplicada ya que incluye aspectos variados como óptica y detectores del sensor, plataformas que lo sustentan, sistemas de transmisión, equipos de tratamientos, entre otros (Chuvienco, 2010).

El riesgo de incendios forestales generalmente considera una combinación de dos componentes: peligro de incendios y vulnerabilidad al fuego; y hace referencia a la probabilidad a que se produzca un incendio en un espacio y tiempo determinado tomando en cuenta la naturaleza y los factores causantes, además de considerar las variables históricas que permiten reconocer ciertos patrones de comportamiento de fuego (Chuvienco & Martín, 2004). El concepto de peligro de incendio se define como la probabilidad de que ocurra un incendio y depende de dos elementos complementarios: la ocurrencia espacial (la probabilidad de que un incendio comience o se propague en un lugar determinado) y la intensidad del fuego (la fuerza del frente de la llama y el área potencialmente quemada) (Chéret & Denux, 2007).

Existe una confusión sobre los términos inmersos en los estudios de incendios forestales y sus aplicaciones. Conceptos como intensidad de fuego, severidad del fuego, severidad de la quemadura y términos relacionados pueden resultar en el uso indebido de la información utilizada por practicantes de la teledetección y los administradores de la tierra para evaluar el comportamiento, efectos y gestión de incendios forestales (Chuvienco & Martín, 2004).

Los conceptos asociados con intensidad y severidad del fuego están relacionados con las condiciones previas al incendio, características del fuego activo y respuesta del ecosistema post – incendio. La severidad se utiliza para identificar la magnitud de los cambios ecológicos causados por el fuego y está relacionado con la pérdida de la vegetación, alteración de las propiedades del suelo, cambios en la reflectancia y las condiciones en las que se va a recuperar la vegetación; mientras que la intensidad del fuego se refiere a la

cuantificación del comportamiento del fuego causado por la temperatura y el calor liberado durante un incendio. La intensidad de fuego se mide por dos factores físicos que sirven para su cuantificación: la tasa de propagación y el flujo de energía (Vlassova, Páez, Rodríguez, Montorio, & García, 2014).

La intensidad en un incendio puede ser alta o baja. En el primer caso el ecosistema puede presentar un beneficio por producir efectos como aumento en la cantidad de nutrientes disponibles; por lo contrario, un movimiento lento de baja intensidad tiene un gran impacto en los componentes de la planta por tener el tiempo suficiente para que penetre el calor en la tierra, matando a la mayoría de la vegetación y consecuentemente afectando a la salud del ecosistema (Lentile, Holden, Smith, & Falkowski, 2006).

Mientras se produce un incendio forestal una gran parte de los árboles del bosque caen, ocasionando un mayor ingreso de luz solar al sustrato, lo que conlleva a la resequedad del bosque, la acumulación de material combustible y al aumento de especies herbáceas inflamables (Nasi, Dennis, Meijaard, Applegate, & Moore, 2001) citado en (FAO, 2001).

En el caso de los bosques pluviales la sustitución de extensas áreas de bosques por especies herbáceas inflamables produce un efecto negativo debido al aumento en la susceptibilidad y vulnerabilidad de áreas idóneas para que se propague un incendio forestal con mayor facilidad, por ende, la probabilidad de desarrollo de nuevos episodios en los años subsiguientes es muy alta, lo que se considera como factor detonante para escenarios repetitivos de incendios (FAO, 2001). Cuando la alteración de los bosques pluviales ha sido mínima la ocurrencia de incendios forestales son poco probables debido a las condiciones naturales en las que permanece como: formación de árboles de gran altura, predominancia de cubierta de copas cerrada, microclima húmedo, escasa velocidad del viento y elevadas precipitaciones. En los períodos de intensas sequías las especies del soto bosque presentan un alto riesgo al no estar adaptadas al fuego, por lo que árboles jóvenes, lianas, plántulas y brotes no están protegidos por una corteza gruesa y el daño generado impide la recuperación de especies originales (Woods, 1989) citado en (FAO, 2001).

En los bosques tropicales las especies han desarrollado adaptaciones como la presencia de cortezas más gruesas para la protección, y capacidades como un rápido rebrote, además del cierre de cicatrices dejadas por el fuego. Los beneficios que conllevan estas adaptaciones

solo se producen cuando la intensidad del fuego es baja y los incendios son poco frecuentes (Schindele, Thoma, & Panzer, 1989).

La percepción del fuego en muchas comunidades es asociada con la destrucción y daño por haber sufrido efectos negativos que los incendios generan cuando carecen de un fin legítimo; es decir cuando una quema no tiene una planificación y un control establecido. Sin embargo, existen ocasiones en el que la presencia del fuego es benéfica (CONAFOR, 2015).

A lo largo de la historia, el fuego ha sido empleado como herramienta de trabajo para el desarrollo de las culturas, otorgando a sus efectos como un aspecto positivo para su evolución por permitir la preparación de suelos para la agricultura, eliminación de plagas y enfermedades, limpieza de la maleza y proporción de ciertos nutrientes contenidos en las cenizas para la fertilización del suelo (Ruiz Herrera, García Martínez, & Aguiar López, 2001). Se considera una medida eficaz al empleo en fuego en estas circunstancias por ser económico a comparación del uso de maquinaria pesada y herbicidas en lo que respecta a la preparación del suelo (Urquiza, Fernandez, & Pino, 2010). A su vez la presencia del fuego en algunos ecosistemas asegura la supervivencia de especies arbóreas por inducir la germinación de semillas, controlar la abundancia de plantas invasoras y competitivas, mejorar el hábitat de la fauna silvestre, estimular el crecimiento de rebrotes nutritivos y rejuvenecer los ecosistemas especialmente adaptados a episodios naturales de incendios y a sus efectos (Urquiza, Fernandez, & Pino, 2010).

Existen tres clasificaciones de ecosistemas según régimen de fuego que presentan: ecosistemas sensibles al fuego, ecosistemas dependientes del fuego y ecosistemas independientes del fuego. La primera clasificación tiene como condición que el fuego no es un factor esencial para mantener el tipo de vegetación y su recurrencia es eventual, es decir que se presentan incendios únicamente en condiciones extremas. La segunda clasificación presenta incendios superficiales con una frecuencia de incendios de dos a diez años. Por último, la tercera clasificación se produce en condiciones meteorológicas muy secas sin continuidad suficiente entre combustibles vegetativos que propician la propagación del fuego o también en áreas con una humedad contrastante y zonas frías (CONAFOR, 2015).

Para el caso de los ecosistemas dependientes del fuego, las especies han desarrollado rasgos adaptativos como espesor de la corteza, mayor diámetro del tallo, alto contenido de humedad y un mayor grado de desarrollo. Las condiciones que se deben cumplir son: la

presencia de una corteza con un diámetro superior a 10 centímetros a nivel del suelo, un alto contenido de humedad en las copas de los árboles que podrá resistir una temperatura de hasta 58 grados centígrados y un banco de semillas abundante; además de presentar adaptaciones post – fuego como la capacidad de sanar las cicatrices y la capacidad de rebrotar y desarrollar semillas con una mayor resistencia. Como consecuencia de las características mencionadas anteriormente se genera la aparición de especies tolerantes al fuego que reemplazan a las especies que crecen en un hábitat inalterado y aseguran el vigor y capacidad reproductiva del ecosistema (Urquiza, Fernandez, & Pino, 2010) & (Nasi, Dennis, Meijaard, Applegate, & Moore, 2001).

1.5.3 Marco conceptual

- **Incendio forestal:** Según el Centro Nacional de prevención de desastres es la propagación libre y no programada del fuego sobre la vegetación en los bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas donde el combustible es el factor principal que determina la magnitud del mismo (CENAPRED, 2007). Para la Corporación Nacional Forestal, un incendio forestal es un fuego que, cualquiera que sea su origen presenta un peligro o daño a las personas, a la propiedad o al medio ambiente; se propaga sin control a través de la vegetación leñosa, arbustiva o herbácea (CONAF, 2011). Para Martínez un incendio forestal puede definirse como el fuego que se propaga sin control en un sistema forestal cuya quema no cumple ninguna función enfocada a objetivos de gestión, por ende se requiere de trabajos de extinción (Martínez, 2001).
- **Peligro de incendio:** Es la contingencia o posibilidad de que se produzca un incendio forestal en un lugar y en un momento determinado (Vélez , 2000) citado en (Chuvieco & Martín, 2004). Para la FAO el peligro de incendio se define como el resultado de los factores constantes y variables que afectan a la ignición, propagación y a la dificultad de controlar el fuego y los daños que estos generen (FAO, 1986).
- **Ocurrencia de fuego:** Es la probabilidad de que un incendio comience o se propague en un lugar determinado, además de considerar la posibilidad de que un evento ocurra (Chéret & Denux, 2007). La ocurrencia puede ser medida, definida o determinada y se

representa de forma cualitativa o cuantitativa en términos de la probabilidad o frecuencia (SNGRD, 2017).

- **Combustible:** Es el proceso natural de acumulación de toda la materia orgánica muerta y seca que se encuentra depositada en el suelo de un área verde (Blanco, y otros, 2008).
- **Riesgo de incendios forestales:** Debe ser comprendido desde su origen como un factor de causas antrópicas y a la vez naturales (Estacio & Narváez, 2012). El riesgo está asociado al inicio o propagación de incendios forestales y se define como la probabilidad de que se produzca un incendio en un lugar y momento dado, considerando la naturaleza e incidencia de los agentes causante, una de ellas es la incidencia histórica (Chuvienco & Martín, 2004). Expresa la probabilidad de que un fuego se inicie bajo la presencia y la actividad de agentes causantes, un agente detonante y la cantidad de hojarasca potencial a la cual un área dada estará expuesta en un periodo específico (FAO, 1986).
- **Percepción remota:** Es el proceso mediante el cual se obtiene información acerca de una escena, utilizando luz visible, infrarroja y radiación de microondas, por medio del análisis automatizado de datos obtenidos a distancia, empleando un sistema formado por un grupo de sensores remotos (Lira, 2011).
- **Régimen de fuego:** Son todas las relaciones que existen entre un ecosistema con el fuego como la severidad, la intensidad, la escala espacial, la estacionalidad y la fuente principal de ignición (CONAFOR, 2015). Es la interacción entre el patrón espacial y temporal de las características y efectos de los incendios, donde se toma en cuenta el intervalo entre la recurrencia de incendios, el tamaño, las características del fuego y la estación (Plana, Font, & Serra, 2016).
- **Índice de verdor relativo RGRE:** Este índice es utilizado por el Servicio forestal estadounidense y ofrece información sobre el estado de la vegetación como la proporción de material vegetal vivo y muerto, por ende se obtiene información de la posibilidad de que pueda producirse un incendio (Newnham, Verbesselt, Grant, & Anderson, 2010).
- **Índice de aridez de Martonne:** Es un índice climático que expresa el nivel de sequedad en base a las condiciones de temperatura (indicador de la capacidad para

evaporación) y precipitación (fuente de agua) existentes en una zona determinada (Almarox, 2003).

1.5 METODOLOGÍA Y TÉCNICAS

Fase 1: Recopilación y verificación de información de tipo vector y raster

Pasos para la obtención de información

- La información tipo vector de las variables meteorológicas (temperatura y precipitación) de los años 2015 y 2016 se solicitaron en las instituciones INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) y la Secretaría de Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- La información tipo raster se obtuvo mediante la plataforma Glovis (*The global visualization viewer*) del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) donde se procedió a descargar las imágenes satelitales Landsat misión 8 OLI/TIRS de los meses en los que se identificó la mayor cantidad de incendios del 2015 y 2016, discriminando cual presenta una menor nubosidad en el área de interés.

Fase 2: Procesamiento de la información de las imágenes satelitales (raster), y los datos de precipitación y temperatura (vector)

- Para realizar el procesamiento de las imágenes satelitales se utilizó el software ERDAS Imagine el cual sirvió para realizar correcciones atmosféricas para las imágenes satelitales con mayor número de incendios de los años 2015 y 2016. En el programa ArcGIS se realizó la extracción de la nubosidad y la mancha urbana de cada imagen.
- Una vez obtenido los datos de precipitación y temperatura de los meses con mayor cantidad de incendios de los años 2015 y 2016, se procedió a realizar el cálculo del índice de aridez de Martonne.

Fase 3: Cálculo de los índices espectrales NDVI, RGRE y NDMI para determinación de zonas de peligro de incendios forestales

Los cálculos mencionados se realizaron en el software ArcGIS 10.3 mediante la herramienta ArcToolBox/ Spatial analyst tools/ Map algebra/ Raster calculator.

- **Índice de Vegetación de diferencia normalizada**

Pasos para el cálculo del NDVI

En el cálculo del NDVI se consideraron las bandas 4 y 5 en Landsat 8, aplicando la fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR: \text{Banda } 5 - RED: \text{Banda } 4)}{(NIR: \text{Banda } 5 + RED: \text{Banda } 4)} \quad (1)$$

Se tomó en cuenta los siguientes parámetros (Cloutis, 2015).

Tabla 1: Parámetros para la obtención del NDVI

Nombre del índice	Fórmula	Característica
Basados en la Pendiente		
De diferencia normalizada (NDVI)	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$	Minimiza efectos topográficos la escala va de -1 a 1, con el valor cero representando el

Fuente: (Cloutis, 2015)

- **Índice de verdor relativo**

Pasos para calcular el RGRE

Para el cálculo del índice RGRE (Relative greenness index) se procedió a utilizar valores máximos y mínimos del NDVI empleando la siguiente fórmula obtenida de (Chéret & Denux, 2007).

$$\text{RGRE} = (\text{NDVI0} - \text{NDVImin} / \text{NDVImax} - \text{NDVImin}) \quad (2)$$

Dónde: RGRE es el porcentaje relativo verde en la fecha de observación

NDVI0 es el valor de NDVI en fecha de observación para un píxel

NDVImax es el valor máximo de un píxel para todo el período de referencia

NDVImin es el valor mínimo de un píxel para todo el período de referencia

- **Índice de Vegetación de diferencia normalizada**

Para el cálculo del NDMI se aplicó la siguiente fórmula para Landsat 8, obtenida de (USGS, 2017).

$$\text{NDMI} = (\text{NIR: Banda 5} - \text{SWIR: Banda 6} / \text{NIR: Banda 5} + \text{SWIR: Banda 6}) \quad (3)$$

In Landsat 8,
 $\text{NDMI} = (\text{Band 5} - \text{Band 6}) / (\text{Band 5} + \text{Band 6}).$

Figura 1: Parámetros para la obtención del NDMI

Fuente: (USGS, 2017)

Fase 4: Cálculo de la correlación lineal entre el peligro de incendios y el índice de aridez de Martonne

- El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que determina el grado de covarianza entre distintas variables relacionadas linealmente donde sus valores resultantes oscilan entre -1 y 1. Cuando se aproxima a +1 la correlación tiende a ser directa y si se aproxima a -1 la correlación tiende a ser inversa (Vila, Sedano, & Lopez, 2014).

- Para este paso se utilizó el programa ArcGIS, donde se ingresaron los valores obtenidos del peligro de incendio y los valores de aridez de Martonne para realizar la correlación lineal.

CAPÍTULO II

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1.1 Variables biofísicas

2.1.1.1 Localización y superficie

El Distrito Metropolitano de Quito está ubicado geográficamente esta entre 727.932m E y los 10.027.234 y 9.935.049m N, con una altura que varía desde los 500m en el noroccidente, hasta los 4.100m en la cordillera oriental y 4.800m en la cordillera occidental, una temperatura promedio de 18 a 22,2°C y precipitaciones que alcanzan un promedio de 101,59 mm/año (MECN, 2009).

Cuenta con una superficie de 423.000 hectáreas aproximadamente de las cuales el 10,09% corresponde a la mancha urbana y el 89,91% corresponde a áreas agrícolas, preservación natural y bosques protectores. Limita al norte con la provincia de Imbabura, al sur con los cantones de Mejía y Rumiñahui, al este con la provincia de Napo y los cantones Pedro Moncayo y Cayambe y al oeste con la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas cantones Pedro Vicente Maldonado y San Miguel de los Bancos (Secretaría General de Seguridad, 2016).

2.1.1.2 División administrativa

El DMQ se localiza al centro norte de la provincial de Pichincha, y se encuentra dividido en 8 zonas administrativas (Calderón, Manuela Sáenz, Los Chillos, Eloy Alfaro, La Delicia, Eugenio Espejo, Quitumbe y Tumbaco) que contienen 65 parroquias de las cuales 33 son rurales (caracterizadas por presentar una tendencia de asentamientos dispersos con actividades productivas vinculadas al sectores primarios) y 32 son urbanas (caracterizadas por su tipología de servicios, conectividad y equipamiento); y un total de 1.237 sectores barriales de los cuales 420 se encuentran en una situación irregular debido a una ocupación informal del suelo (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito , 2011).



Figura 2: Parroquias del Distrito Metropolitano de Quito

Fuente: (Secretaría de ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, 2011)

2.1.1.3 Geología

Las formaciones geológicas en el DMQ son el resultado de procesos naturales exógenos y endógenos que dan lugar a dos grandes cadenas montañosas como la cordillera occidental y la cordillera real. A su vez presenta 6 formaciones principales que son: formación San Toledo, formaciones volcánicas Pisayambo, unidad de Apagua, formación Silante, formación el Cayo y formación Macuchi (Valdivieso, 2005).

El vulcanismo en el Ecuador se produce por la subducción de placa de Nazca bajo la sudamericana dando origen a la formación del paisaje Andino. En el DMQ existe la presencia de volcanes activos, inactivos y potencialmente activos como son: Pululahua, Atacazo, Casitahua, Sincholagua, Guagua y Rucu Pichincha (Secretaría General de Seguridad, 2016). Los volcanes que tienen una cercanía a la ciudad también son consideraciones como generadores de amenaza potenciales de caída de ceniza (Atacazo, Guagua Pichincha,

Quilotoa, Pululahua, Cayambe, Reventador, Antisana), flujos piroclásticos (Atacazo y Pululahua) y lahares (Cotopaxi) (FLACSO, 2011).

2.1.1.4 Geomorfología

El DMQ al estar ubicado en el flanco central de la cordillera de los Andes presenta un relieve heterogéneo, en este se puede encontrar áreas con pendientes casi planas en el valle interandino hasta zonas montañosas con fuertes pendientes mayores al 70% que son características de las estribaciones de la cordillera occidental de los Andes. Existen 6 unidades geomorfológicas como son el relieve montañoso, zonas fluviales, vertientes de forma cóncava, convexa e irregular, relieves exógenos, relieves estructurales (relieves montañosos, gargantas de valles encañonados, valles interandinos y zonas deprimidas), colinas de mediana altitud (Valdivieso, 2005).

Vertientes externas de la cordillera occidental, relieves de la cordillera oriental, cimas frías, construcciones volcánicas de tipo estrato-volcán, vertientes y relieves superiores e inferiores de la cuenca interandina y relieves de fondos de cuenca interandina (Secretaría General de Seguridad, 2016).

2.1.1.5 Hidrografía

Existe un total de 13 microcuencas componen el DMQ como son Coyango, Mindo, Alambi, Monjas, Guayllabamba, Uravia, Guambi, Chiche, Intag, Pachijal, Machángara, Pita y San Pedro (Secretaría de Ambiente, 2015).

El DMQ pertenece al sistema hidrográfico de las subcuentas del río Guayllabamba y río Blanco. Los afluentes del río Guayllabamba que abarcan la mayor parte del territorio del DQM, son aportados por Atacazo, Ilinizas, Cotopaxi, Sincholagua, Guagua y Rucu Pichincha, que a su vez forman parte de la macro cuenca del Esmeraldas que desemboca en el Océano Pacífico (Secretaría General de Seguridad, 2016). La sub cuenca del río Blanco que también desemboca en el Guayllabamba tiene el aporte de los afluentes de los ríos como el Alambí que nace de las laderas occidentales del Guagua Pichincha formando los ríos Cinto, Mindo y Saloya (FLACSO, 2011).

2.1.1.6 Clima

El DMQ se caracteriza generalmente por encontrarse en una zona templada húmeda, presenta niveles de humedad relativa del 73% al año y una velocidad del viento al norte de 3,0 m/seg y al centro 0,7 m/seg (Secretaría General de Seguridad, 2016).

La temperatura media presenta valores de 14,5°C que durante el día varía entre 9,6°C y 21°C. En la vertiente oriental a los 3.200 msnm y en la vertiente occidental a los 3.400 msnm, se registran temperaturas inferiores a 10°C, lo que resulta en la interrupción de actividades agrícolas (Secretaría General de Seguridad, 2016).

En la zona de presencia de volcanes del sur como el Pasochoa, Pichincha, Atacazo y la zona del Valle de los Chillos se registran precipitaciones abundantes mayores a 1.400 mm. En la zona norte de San Antonio de Pichincha se registran precipitaciones más bajas, menores a 600mm (Secretaría General de Seguridad, 2016).

Existen 2 periodos en el DMQ que caracterizan las condiciones climáticas. El periodo seco comprendido entre los meses de junio, julio, agosto y septiembre y el veranillo del niño de noviembre a diciembre, presentan condiciones de sequía y existe disminución o ausencia de precipitaciones. Y el periodo lluvioso que va desde febrero a mayo y octubre a diciembre donde se presentan deslizamientos, flujos de lodo y deslaves (Secretaría General de Seguridad, 2016).

Según el régimen de precipitaciones, existen 5 tipos de clima ecuatoriales característicos del DMQ. El nival con precipitaciones mayores a 1.000 mm, el tropical megatérmico húmedo con precipitaciones mayores a 2.000 mm, el ecuatorial mesotérmico semi-húmedo con precipitaciones de 600 a 2.000 mm, el ecuatorial mesotérmico seco con precipitaciones menores que 750 mm y el ecuatorial de alta montaña con precipitaciones de 750 a 2.000mm (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2005).

2.1.1.7 Suelos

En el DMQ predominan los suelos del gran grupo *dystradenmt* pertenecientes al suborden Andept y al orden Inceptisol con una presencia del 43,68% en el territorio, seguido del orden de los Mollisoles con un 19,86% y Entisoles con un 13,89% (Valdivieso, 2005).

Los suelos *distrahepts* se caracterizan por retener la humedad por lo que están asociados a climas húmedos con estaciones secas, además de ser ricos en carbono orgánico y potasio, y favorecer a la fijación de fósforo. Estos suelos presentan una textura franco limoso, su pH es ácido y contienen minerales de origen volcánico (Valdivieso, 2005).

Los suelos presentes en la ciudad de Quito son susceptibles a la erosión debido a la situación de uso y ocupación del suelo que enfrentan. El 66% del suelo son susceptibles a erosión, el 10,8% presentan procesos erosivos, el 5,5% están erosionados y el 2,2% corresponden a suelos desnudos. Los suelos considerados como contaminados son los que se encuentran en las cercanías del vertedero Zábiza con una afectación de 20 hectáreas, el relleno sanitario del Inga con hectáreas 6 hectáreas contaminadas y las quebradas Santa Anita, Chilibulo, El Calzado, Villaflora y Conchas Azules (FLACSO, 2011).

2.1.2 Variables socioeconómicas

2.1.2.1 Demografía

Quito es la segunda ciudad más poblada después de Guayaquil, representado un 15,5% con respecto a la población de todo el Ecuador. Según el último censo de población y vivienda el DMQ alcanzó una población de 2'239,191 habitantes en el 2010. En el área urbana se ha evidenciado un crecimiento acelerado, siendo la relación del aumento de la población 8 veces más respecto al año 1950 con el 2010, en el caso del área rural se cuadruplicó esta desigualdad debido a procesos migratorios internos (Secretaría General de Seguridad, 2016).

En términos generales la pirámide poblacional muestra una base demográfica joven. La estructura de la población indica una tendencia a concentrarse en el rango de edades de 20 a 40 años representando el 33,57% y una minoría comprendida entre menores de 1 año con 1,60%. A su vez existe una mayor población de mujeres con un porcentaje del 51%, en el caso del porcentaje de hombre representa el 49% de la población, además de presentar una composición étnica donde predomina la población mestiza con un 83%, seguido de blancos con un 6,7%, e indígenas con un 4,7% (Secretaría General de Seguridad, 2016).

En lo que respecta al índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI), la pobreza en hogares de las parroquias rurales es del 48% al 76% especialmente en Atahualpa, Lloa,

Nanegal, Nono, Gualea, San José de Minas, y Puellarro; y con un 24% y 48% las parroquias de Pintag, Guangopolo, La Merced y Amaguaña (FLACSO, 2011).

2.1.2.2 Crecimiento poblacional

La tasa de crecimiento poblacional en los años 2001 respectó al 2010 fue de 2,2% del promedio anual, se estima que para el año 2022 la población ascenderá 2'698.477 habitantes y tendrá una densidad bruta de 118 hab/ha. En las áreas no urbanizable el número de habitantes será de 112.518, en el área urbanizable de los valles será 667.964 habitantes y en área urbana actual será de 1917.955 habitantes (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito , 2011).

Año	Población
*2010	2.239.191
2011	2.365.973
2012	2.412.427
2013	2.458.900
2014	2.505.344
2015	2.551.721
2016	2.597.989
2017	2.644.145
2018	2.690.150
2019	2.735.987
2020	2.781.641

Figura 3: Proyección poblacional 2010 - 2020

Fuente: (Secretaría General de Seguridad, 2016)

Existen dos tendencias que marcan la dinámica de los asentamientos humanos en el DMQ. En la zona centro de la ciudad existe un estancamiento o disminución del crecimiento poblacional, por el contrario, la población ubicada en los extremos norte, sur y los valles orientales tienden al incremento poblacional, estas últimas son consideradas como zonas en proceso de consolidación (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2005). En el caso de las poblaciones rurales muestran un crecimiento de 4,2% anual por lo que en estas áreas

se presenta una mayor presión por la cobertura de servicios básicos, transporte e infraestructura (FLACSO, 2011).

2.1.2.3 Actividades económicas

Las principales actividades económicas que desempeña la población en el Distrito son el comercio al por menor y mayor con un 23,8%, la industria manufacturera con un 14%, las actividades relacionadas con inmobiliarias y empresas con un 9%, construcción con un 8% y lo relacionado con transporte, comunicaciones y almacenamiento con un 7,3%. En lo que confiere a la provincia de Pichincha, la ciudad de Quito representa el 90% aproximadamente del Producto Interno Bruto con una población económicamente activa del 37% (Valdivieso, 2005).

2.1.2.4 Infraestructura cercana a los bosques protectores

Para demostrar la relación de la presencia de incendios respecto a la influencia antrópica como la accesibilidad vial y cercanía de población en las zonas boscosas, Salmerón, M. utilizó dos índices empleados para el análisis espacial: “el índice de distancia a caminos y poblaciones” y “el índice de gravedad poblacional”; además de considerar variables climáticas como temperatura y precipitación que influyen directamente en el estado de la vegetación (Pérez, Márquez, Cortés, & Salmerón, 2013).

Los resultados obtenidos a partir del análisis espacial de incendios forestales demuestran que las áreas con menores afectaciones han sido aquellas que están localizadas a una distancia menor a las poblaciones, esto se debe a que los habitantes realizan un aviso oportuno de los incendios a las autoridades, no obstante, la presencia de incendios está estrechamente relacionada con la existencia de poblaciones (Pérez, Márquez, Cortés, & Salmerón, 2013).

2.1.2.5 Accesibilidad vial a los bosques protectores

Según Salmerón, M. (2012), la cercanía de vías en los bosques protectores tiene aspectos positivos y negativos. En el primer caso la presencia de vías permite un fácil acceso

a el área donde se está desarrollando el incendio, por ende, la afectación va a ser menor a comparación de los incendios que se desarrollan en zonas alejadas y con limitada accesibilidad debido a que se dificulta las labores de combate oportuno. En el segundo caso se ha demostrado que la superficie afectada es mayor debido a que la accesibilidad se dificulta al momento de atender el incendio (Salmerón , 2012).

El riesgo de que se inicie y se propague un incendio forestal es mayor cuando la influencia de vías es menor o igual a 100 metros, a su vez el riesgo es menor cuando la distancia a vías es mayor de 200 a 300 m (Hermann, Funiss, & Brookes, 2000) citando en (Salmerón , 2012).

A pesar de que la cercanía de vías en zonas con peligro de incendios es favorable para su pronta atención, también se ha demostrado que la frecuencia de los incendios es mayor por la influencia antrópica. Se le atribuye al ser humano como responsable directo en la generación de fuego, a su vez facilita una pronta respuesta y la reducción de los impactos de gran magnitud que conlleva la generación de incendios forestales (Salmerón , 2012).

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS BOSQUES PROTECTORES

Existen varias formas de clasificar los ecosistemas como se muestra en la siguiente tabla donde se especifican las formaciones vegetales para el DMQ (MECN, 2009).

Tabla 2: Clasificación de Vegetación

AUTOR	AÑO	DESCRIPCIÓN	CLASES (DMQ)
Josse C, Navarro P, Comer R, Evans D, Faber M, Fellows G, Kittel S, Menard M, Pyne M, Reid K, Schuld K, Tangué J.	2003	Sistemas ecológicos para el Ecuador	1) Páramo norteandino herbáceo de almohadilla
			2) Páramo norteandino de pajonal
			3) Páramo norteandino arbustivo
			4) Bosque altimontano norteandino <i>Polylepis</i>
			5) Bosque altimontano pluvial de los Andes del norte
			6) Bosque enano y arbustal alto andino paramuno
			7) Bosques y arbustales montanos xéricos interandinos de los Andes del norte
			8) Arbustal montano de los Andes del norte
			9) Bosque montano pluvial de los Andes del norte
			10) Bosque pluvial montano bajo de los Andes del norte
			11) Bosque pluvial piemontano de los Andes del norte
Baquero F, Sierra R, Ordonez L, Tipán M, Espinoza L, Rivera M, Soria P.	2004	Formaciones vegetales	1) Bosque siempre verde piemontano
			2) Bosque siempre verde montano bajo
			3) Bosque de neblina montano

			4) Bosque siempre verde montano alto
			5) Páramo herbáceo y almohadillas
			6) Super páramo
			7) Herbazal lacustre montano
			8) Nival
			9) Matorral húmedo montano
			10) Matorral seco montano
			11) Espinar seco montano
Sierra R y Valencia R	1999	Clasificación de la vegetación para el Ecuador	1) Gelidofita
			2) Páramo herbáceo
			3) Páramo de almohadillas
			4) Herbazal lacustre montano
			5) Bosque siempre verde montano alto
			6) Matorral húmedo montano
			7) Matorral seco montano
			8) Espinar seco montano
			9) Bosque de neblina montano
			10) Bosque siempre verde montano bajo
			11) Bosque siempre verde piemontano
Cañadas	1983	Sistema Bioclimático de Holdridge	1) Monte espinoso pre montano
			2) Estepa espinosa montano bajo
			3) Bosque húmedo montano

			4) Bosque húmedo montano bajo
			5) Bosque húmedo piemontano
			6) Bosque muy húmedo montano
			7) Boque muy húmedo sub alpino
Albuja L, Ibarra M, Urgiles J, Barriga R	1980	Pisos Zoogeográficos	1) Altoandino
			2) Temperado
			3) Subtropical occidental
			4) Tropical noroccidental

Fuente: (MECN, 2009)

Elaboración propia

2.2.1 Tipo de Ecosistemas

Según la Secretaria de Ambiente existe un remanente de vegetación silvestre del 20% en el DMQ, de la cual una quinta parte corresponde al páramo de los volcanes de Mojanda, Pichincha Sincholagua, Cayambe y Atacazo (FLACSO, 2011). El 63% de las formaciones corresponden a los bosques húmedos con el 29,4%, a los arbustos húmedos con el 12%, a los herbazales húmedos 10,5%, a los arbustos secos 10,2% y el bosque seco y herbazal seco representan a un porcentaje minoritario (FLACSO, 2011).

En los ecosistemas de las estribaciones de los Andes existe una importante biodiversidad por la presencia de especies silvestres, plantas vasculares, vertebrados, invertebrados, y especies de epífitas que presentan un mayor grado de diversificación respecto a otros ecosistemas. Por el contrario en los valles interandinos se presenta una baja diversidad pero el endemismo es alto (FLACSO, 2011).

En los parques metropolitanos ubicados en la cercanía de las zonas urbanas como el parque Guanguiltagua, Itchimbía, Ilaló y laderas del Pichincha, existe una diversidad baja debido al alto grado de alteraciones antrópicas, transformación de ecosistemas e introducción de especies exóticas como eucalipto, sin embargo se puede encontrar escasos remanentes de vegetación arbustiva (FLACSO, 2011).

2.2.2 Zonas de vida según Holdridge

La clasificación de las zonas de vida realizado por Leslie Holdridge en 1986 consiste en la identificación de unidades ecosistémicas en base a condiciones bioclimáticas como son la temperatura y precipitación, además de tomar en cuenta la evapotranspiración. Para el DMQ se ha identificado 5 clasificaciones ecológicas correspondientes al modelo de Holdridge que se detalla a continuación (MECN, 2009).

- El bosque muy húmedo montano bajo con su abreviatura bmh- MB, presenta una altitud comprendida entre los 2.000 hasta 3.000 msnm, una temperatura que varía entre 12 y 18 °C y la presencia de precipitaciones que tienen un régimen de 2.000 a 4.000 mm anuales.
- El bosque muy húmedo pre montano con su abreviatura bmh-PM, presenta una altitud correspondiente de 300 hasta 600 y 1.800 hasta 200 msnm, su temperatura característica es de 18 a 24 °C y las precipitaciones varían entre 1.000 a 2.000 mm anuales.
- El bosque húmedo montano bajo con su abreviatura bh- MB, se caracteriza por presentar alturas de 200 a 2.900 msnm, la temperatura en este ecosistema tiene una variación de 12 y 18 °C y las precipitaciones son de 1.000 y 2.000 mm anuales.
- El bosque húmedo pre-montano con su abreviatura bh-PM, presenta una altitud de 300 a 600 hasta 1.800 a 2.000 msnm, la temperatura tiene una variación de 18 a 24 °C y las precipitaciones anuales se encuentran entre 1.000 y 2.000 mm.
- El bosque seco montano bajo con su abreviatura bs- MB, tiene una altitud de 2.000 – 3.000 msnm, una temperatura de 12 °C y sus precipitaciones varían anualmente entre 500 y 1.000 mm.
- La estepa espinosa del bosque montano bajo con su abreviatura ee-MB, tiene una altura comprendida entre 2.000 hasta 2.900 msnm, una temperatura que varía entre 12 y 18 °C y un régimen de precipitaciones de 250 y 500 mm anuales.
- El Bosque seco montano con su abreviatura bs-M, están presente en los valles interandinos característico de un relieve plano a ondulado, con una altura de 2.000 a 3.000 msnm, temperaturas medias que varían entre 12 y 18 °C y precipitaciones de 500 a 1.000 mm anuales.
- El bosque muy húmedo montano con su abreviatura bmh-M, se caracteriza por tener precipitaciones sobre los 1.400 mm anuales, las temperaturas de este bosque pueden ser

menores a 5 °C y las formaciones vegetativas presentes son las especies arbóreas y arbustivas.

- En el caso del bosque húmedo montano con su abreviatura bh-M, se ubica en los valles interandino con una altura de 2.000 a 5.000 msnm, un relieve plano a ondulado, una temperatura que varía de 12 a 18 °C y precipitaciones de 1.000 a 2.000 mm anuales. Se puede encontrar pastizales y cultivos de papas y hortalizas.
- Finalmente, el bosque de páramo ubicado entre los 2.000 y 3.000 msnm con temperaturas menores a los 6 °C y precipitaciones superiores a los 1.400 mm que favorecen a la presencia de pajonales.

2.2.3 Tipos de bosques

Los tipos de bosques en el DMQ están descritos en base a la información de uso del suelo y su cobertura forestal. La cobertura forestal tiene un porcentaje de representación de un 27,5 de la superficie total, siendo la más significativa con un área de 117.615 hectáreas (Valdivieso, 2005).

- Los bosques plantados de eucalipto y pinos o ciprés representan un porcentaje menor al 1%, están ubicados en los límites occidentales y orientales que son consideradas zonas de alto riesgo.
- En los bosques categorizados con otros usos existe la presencia de asociaciones de bosques con cultivo, bosques con pasto y usos agrícolas. El bosque de pasto cada vez es menor debido a la presión de la expansión urbana e influencia humana.
- Los bosques muy húmedos y tropicales del noroccidente del DMQ al presentar condiciones especiales de clima, relieve y altitud están afectados por un alto grado de intervención humana, lo que ha ocasionado la alteración de sus condiciones ecológicas.
- El bosque natural poco intervenido tiene una representación del 17,40% del área total de cobertura de bosques y está representada por bosques montanos o bosques nublados de las zonas de Mindo, Maquioucura y Nambillo con una altura de 2.400 y 3.000 msnm. En estos bosques la presencia de especies maderables es baja, por el contrario, existe una gran riqueza florística con variedades de especies de mamíferos, aves, especies arbóreas

medianas con una altura que varía entre 10 y 30 metros, vegetación epífita de musgos, helechos, orquídeas y bromelias.

- La vegetación de páramo por su elevada humedad y temperaturas bajas, existe la presencia de formaciones vegetales predominantes como el pajonal almohadillas, arbustos coriáceos formaciones de *Polylepis* y *Gynoxys*, con un porcentaje de representación del 11,29%.

2.3 INTRODUCCIÓN A LOS INCENDIOS FORESTALES

2.3.1 Definición

Los incendios forestales se definen como la combustión de material combustible vegetal, donde la presencia del fuego se extiende libremente y sin control por causas naturales o accidentales (Fernández, Picolotti, Pellerano, & Epele, 2006). El fuego es considerado como un elemento del incendio y para que se produzca se requiere de calor, combustible y aire (Plana , Font, & Serra, 2016).

Según la Secretaria de Gestión de Riesgos un incendio forestal es “*el fuego que se propaga sin control, especialmente en zonas rurales, afectando la vegetación como árboles, matorrales, pastos y cultivos*” (Secretaría de Gestión de Riesgos , 2017).

2.3.2 Origen

Los incendios forestales pueden ser de origen natural o provocados por el hombre. En el primer caso las condiciones climáticas, la presencia de especies inflamables, la acumulación de material combustible, la topografía y los rayos pueden provocar un incendio forestal. En el segundo caso, las actividades negligentes como las quemas de pastos, residuos agrícolas, explotaciones forestales, fogatas, presencia de rastrojos y quema de basura pueden producir un incendio de mayor magnitud sobre todo si se realizan sin tomar medidas previas para que la quema se pueda controlar. Y actividades como la piromanía o las protestas con fuego en zonas cercanas a bosques se consideran como actividades intencionadas para que se produzca un incendio forestal (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2015).

2.3.3 Geometría

La forma que pueda adoptar un incendio forestal dependerá de las condiciones meteorológicas, topográficas y ecológicas (Zárate, 2017). Estas formas pueden ser:

- **Circular:** ausencia o presencia mínima de viento, relieve plano, combustibles homogéneos.
- **Irregular:** presencia de viento variable, relieve irregular con pendiente, material combustible heterogéneo.
- **Elíptico:** presencia de viento que genera una propagación más rápida, relieve plano, combustibles homogéneos.

2.3.4 Clasificación

Los incendios forestales se pueden clasificar en tres tipos según su forma de propagación y ubicación:

- **Incendio de subterráneos o subsuelo:** propagación del incendio en el producto vegetal acumulado debajo del suelo o la materia orgánica en descomposición, en algunos casos la llama no es visible pero su actividad puede durar mucho tiempo (Plana, Font, & Serra, 2016).
- **Incendio de copas o aéreos:** la propagación del incendio se produce en la copa de los árboles o cualquier vegetación que supere una altura de 1,50 metros. La propagación puede ser de forma pasiva, activa o antorcheo (Fernández, Picolotti, Pellerano, & Epele, 2006).
- **Incendio de superficie:** se produce cuando la quema se desarrolla en los estratos herbáceos y arbustivos sin que la llama alcance la copa de los árboles, es decir la llama no supera una altura de 1,50 metros de altura por lo que las especies mayormente afectadas son los pastizales, arbustos, troncos, árboles jóvenes (Fernández, Picolotti, Pellerano, & Epele, 2006).

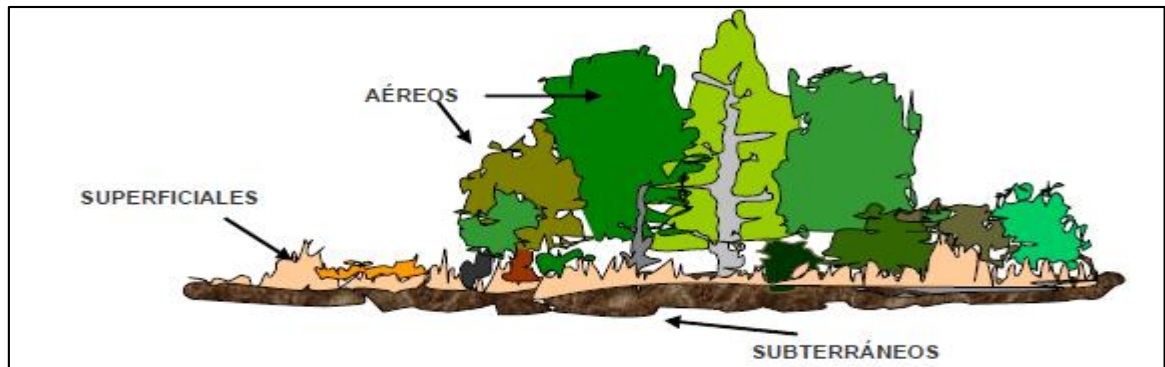


Figura 4: Clasificación de los incendios forestales

Fuente: (Fernández, Picolotti, Pellerano, & Epele, 2006)

2.3.5 Triángulo de fuego

Para que se inicie y se desarrolle un incendio forestal se requiere de la existencia de cobertura vegetal bajo condiciones de combustibilidad, oxígeno y energía de activación.

- **Combustible:** sustancia capaz de arder en condiciones determinadas de oxidación. En el caso de los incendios forestales, en el material combustible influyen características como: la cantidad, el tipo de vegetación, la distribución en los estratos herbáceos, arbustivos y arbóreos, y la humedad de la vegetación; determinan el nivel de combustibilidad (Plana , Font, & Serra, 2016).
- **Comburente (oxígeno):** es el factor que permite que el combustible alcance un estado de oxidación y pueda arder (Bomberos de Navarra , 2017).
- **Energía de activación:** se produce cuando la energía se convierte en calor y que hacen reacción junto al combustible y el comburente en el punto de ignición del incendio forestal (Bomberos de Navarra , 2017).

2.3.6 Formas de propagación

Según la guía de prevención de incendios forestales de Mejía, M. existen 3 formas de propagación de incendios (Mejía , 2011).

- **Convección:** es el calor que asciende y que calienta el combustible por el movimiento del aire, cuando desciende el aire sucede el efecto contrario, es decir se produce un enfriamiento del aire.
- **Radiación:** calor generado por el fuego y por medio del aire se trasmite a objetos cercanos, en este caso la vegetación existente.
- **Conducción:** es el calor transmitido entre los combustibles u otro material.

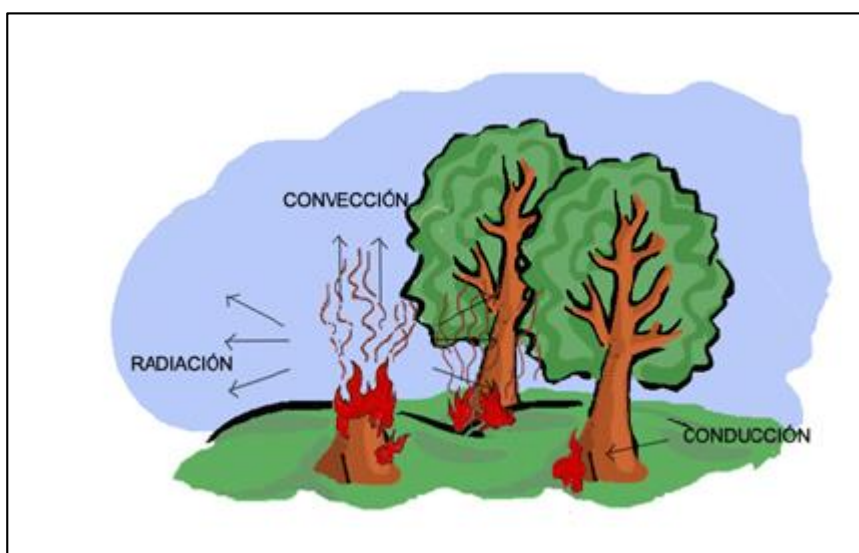


Figura 5: Formas de propagación del calor

Fuente: (Mejía , 2011)

2.3.7 Fases de combustión del fuego

La combustión en un incendio sigue las siguientes fases (Fernández, Picolotti, Pellerano, & Epele, 2006):

- **Precaentamiento:** el combustible sufre un aumento de calor. A los 100°C la humedad sale del combustible y emite vapor de agua, cuando alcanza los 200°C se presenta una reacción química haciendo que los elementos se conviertan mediante la volatilización o vaporización.
- **Combustión de los gases:** entre los 300 y 400 °C se produce la gasificación de los elementos y la ignición (inicio del incendio). A partir de los 500 a 600°C existe una combustión permanente, inclusive si se retira la fuente de calor, produciendo una reacción en cadena.
- **Fase sólida:** presencia de emisiones de carbono debido al material vegetal que se está quemando, en esta fase la llama se caracteriza por tener un color azulado, finamente los residuos se transforman en cenizas.

2.3.9 Niveles de incendio

Los conatos e incendios forestales son términos que no se pueden confundir al momento de determinar el nivel del incendio. Un conato es el inicio del incendio forestal, se determina mediante la presencia de fuego poco avanzado y su área de afectación es menor a 0,5 hectáreas. Un incendio forestal en cambio tiene un área de superficie afectada mayor a 0,5 hectáreas (Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito, 2016).

Según el plan de prevención contra incendios del Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito existen 3 niveles de incendios según el número de hectáreas quemadas (Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito, 2016).

Tabla 3: Niveles de incendios forestales

NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III
Tipo de incendio: rastreros, subterráneos, pastizales, matorrales, raíces y humus; Superficie: 0.5 a 2 hectáreas; Velocidad de Propagación: 1 a 5 mts.x min. en cabeza, con 1 a 2,5 mts. altura de llama; Vientos de hasta 15Km./h, hojas y ramas se agitan constantemente, combustibles secos con temperatura hasta 30°C; Pendiente: 0 a 15%.	Tipo de incendio: bosques, copas, matorrales, pastizales bajos; Superficie: 2.1 a 10 hectáreas; Velocidad de Propagación: 6 a 10 mts.x min. en cabeza, con 2,6 a 4 mts. altura de llama; Vientos de 15-25 Km./h, levantan polvo hojas y ramas se agitan constantemente, combustibles muy secos; Temperatura de 32 a 35°C; Pendiente: 16 a 32%.	Tipo de incendio: bosques, copas, matorrales, pastizales bajos; Superficie: más de 10.1 hectáreas; Velocidad de Propagación: 6 a 10 mts.x min. en cabeza, con 2,6 a 4 mts. altura de llama; Vientos de 26-61 Km./h, arbustos y ramas se balancean, hay dificultad al caminar combustibles muy secos; Temperatura mayor a 36°C; Pendiente: sobre 33%.

Fuente: (Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito, 2016)

- **Nivel 1:** cuando el área afectada, producto de un incendio, se encuentra entre 0,5 hasta 2 hectáreas.
- **Nivel 2:** cuando el área afectada, producto de un incendio, se encuentra entre 2,1 hasta 10 hectáreas.
- **Nivel 3:** cuando el área afectada, producto de un incendio supera las 10,1 hectáreas de quema.

En la guía de prevención y control de incendios forestales elaborado por Mejía M, los niveles de gravedad son 4 y tienen las siguientes características (Mejía , 2011).

- **Nivel 0:** cuando no se presenta un peligro para bienes y personas y el incendio se puede controlar con medios inmediatos.
- **Nivel 1:** representa un mayor peligro en las masas forestales. Las áreas de afectación son mayores a 30 hectáreas con impactos ambientales permanentes o pasajeros y el tiempo de control y sofocación del incendio dura más de 12 horas.
- **Nivel 2:** cuando los bienes y personas ya tienen una afectación evidente y se producen daños a infraestructura como carreteras, ferrocarriles, líneas eléctricas o se produce una simultaneidad de incendios de nivel 1.
- **Nivel 3:** declaración de emergencia a nivel nacional.

CAPITULO III

3.1 DESCRIPCIONES GENERALES

3.1.1 Áreas de susceptibilidad a incendios forestales – DMQ

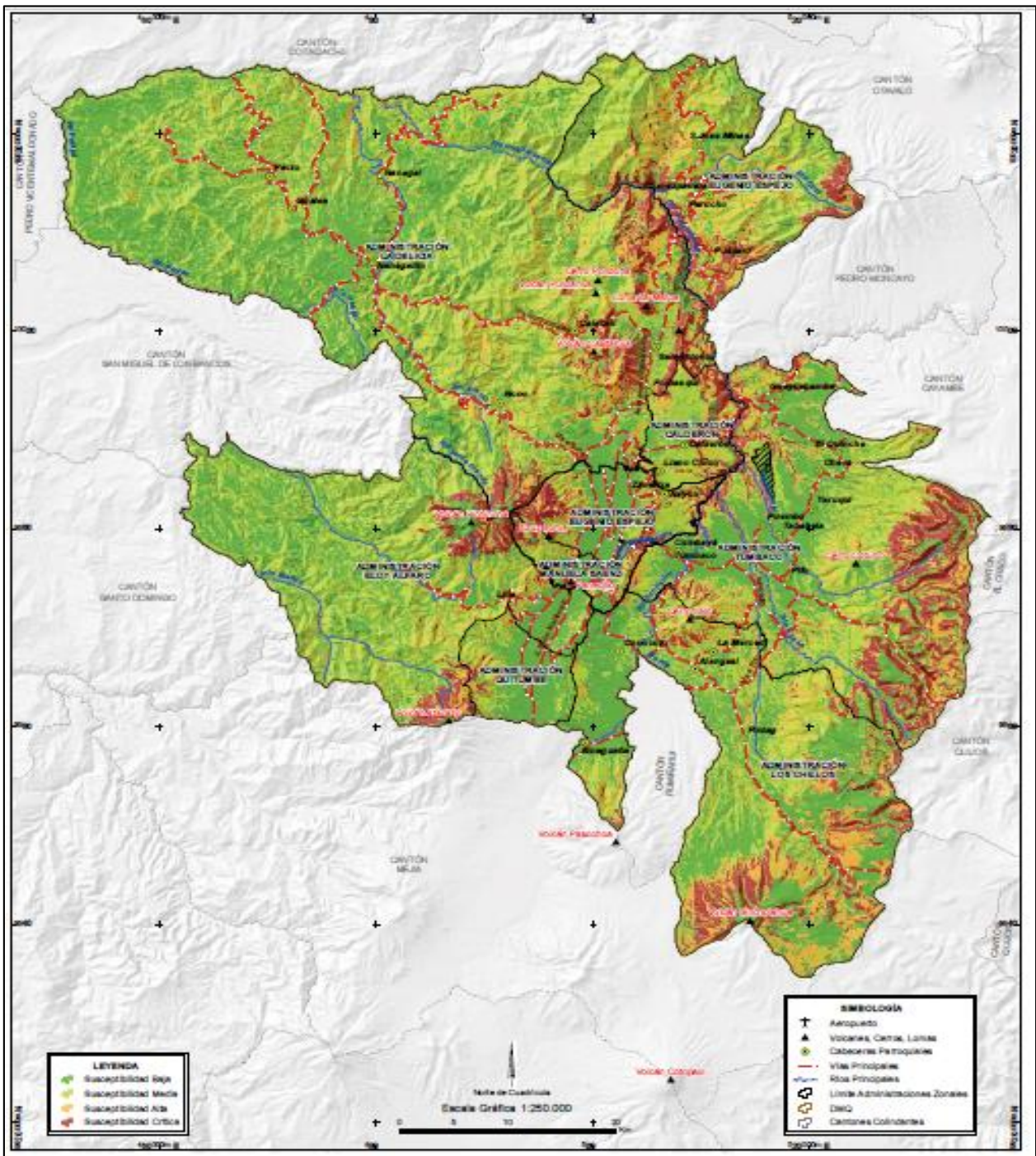
Dentro del marco del “*Programa de reducción de riesgos del Distrito Metropolitano de Quito*”, la propuesta metodológica de áreas susceptibles a incendios forestales ha enfocado sus esfuerzos en la prevención y diseño de planes de emergencia con el uso de la teledetección, la aplicación de análisis espacial y tratamiento digital de imágenes satelitales, tomando en consideración la densidad y frecuencia de incendios forestales (Estacio & Narváez, 2012).

La metodología propuesta emplea el uso de una serie temporal de imágenes satelitales LANDSAT ETM desde 1991 hasta el año 2009, para identificar las áreas con mayor frecuencia de incendios forestales. Los resultados sugieren que la ocurrencia es mayor en el Cerro Ilaló; las parroquias San José de Minas, Puellaró, Nayón y Guayllabamba; lo valles de Tumbaco y los Chillos; laderas del Pichincha (Estacio & Narváez, 2012).

Los principales hallazgos de este estudio mencionan que el mayor número de reportes de incendios se registran la época de verano en zonas periurbanas principalmente, en áreas de protección como laderas del Pichincha, zonas orientales, bordes de quebradas y zonas de recreación. Estas áreas están estrechamente vinculadas a condiciones de accesibilidad e influencia antrópica (Estacio & Narváez, 2012).

Mediante la aplicación de técnicas de teledetección con el empleo de índices de combustión, vegetación y topomórficos, además de incluir el cálculo de coeficientes de biomasa; la metodología aplicada para identificación de áreas susceptibles permite una actualización periódica y la predicción de incendios que son considerados como hechos no aislados ya que la gran mayoría de estos eventos están relacionados con la presión ejercida por los seres humanos vinculados a acciones negligentes. Las áreas que presentan una mayor susceptibilidad son los volcanes Pichincha, Casitagua y Atacazo; el Cerro Ilaló y las parroquias del ubicadas al norte del Distrito como San José de Minas, Guayllabamba y Pomasqui (Estacio & Narváez, 2012). A continuación, se muestra la localización de áreas susceptibles a incendios forestales.

Mapa 2: Susceptibilidad a Incendios Forestales del DMQ



Fuente: (Secretaria de Ambiente DMQ, 2011)

3.1.2 Incendios forestales en el marco de cambio climático en el DMQ

La metodología para la “*evaluación de la vulnerabilidad de impactos al cambio climático en el DMQ*” fue llevada a cabo por la Dirección de Riesgo y Ambiente, instituciones adscritas a la Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad. Esta metodología presentó sus resultados en el año 2010 y se caracteriza por considerar los eventos climáticos extremos que se presentan en el DMQ tales como: sequías extremas y lluvias intensas, además de evaluar la vulnerabilidad al cambio climático para 5 sectores estratégicos tales como agricultura, salud, agua, ecosistemas y riesgos. Éste último sector enfoca sus esfuerzos en la temática de Incendios Forestales (Purkey, y otros, 2014).

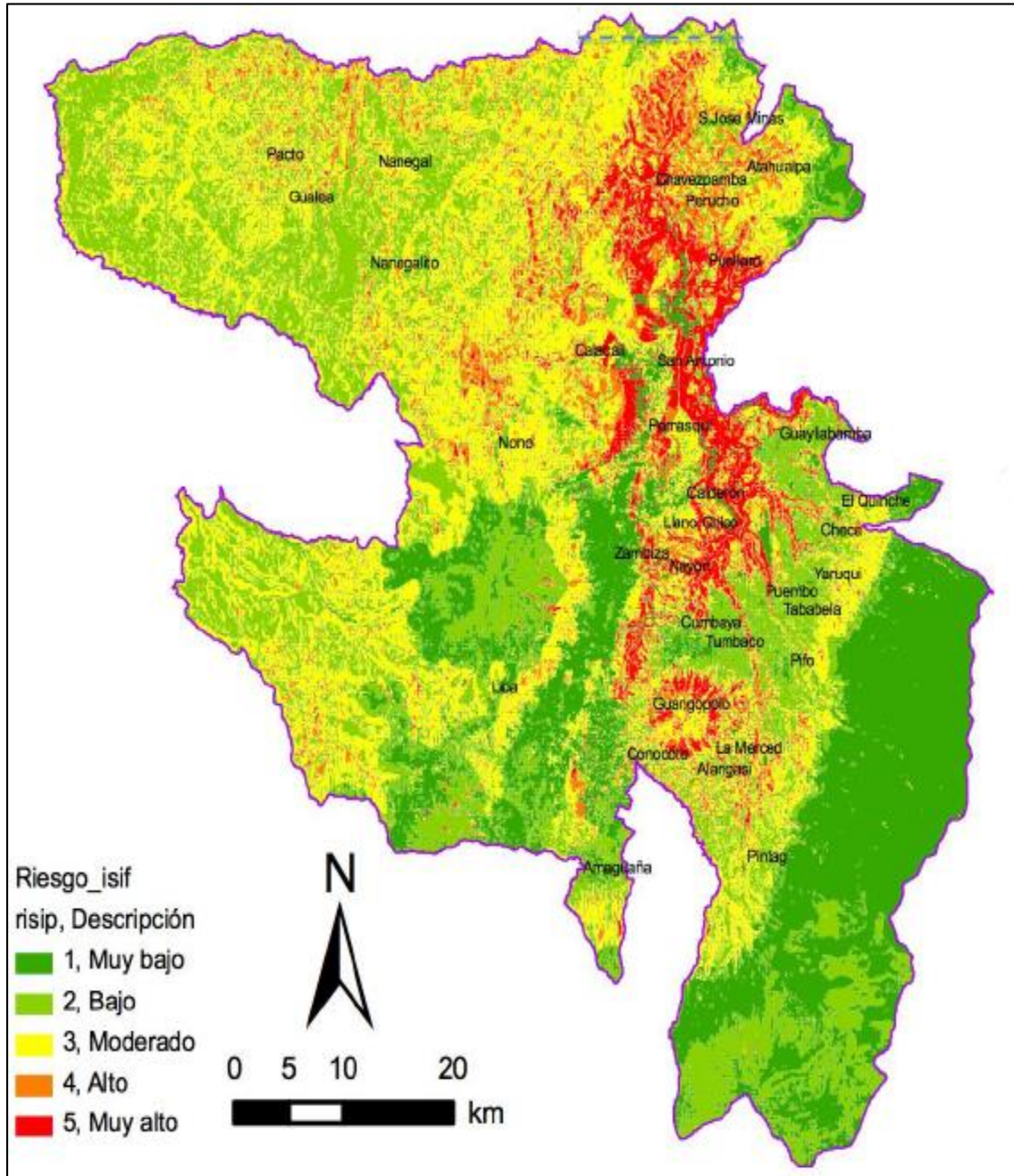
La metodología referente a la determinación de áreas susceptibles de incendios forestales fue considerada como un complemento para realizar este estudio enfocado en el “*mapeo áreas de riesgo o peligros potenciales de incendios forestales*” que propone este estudio; que además de considerar la susceptibilidad de la vegetación a incendiarse, pone a consideración el análisis de factores como el reconocimiento de la relación entre las acciones antrópicas con la formación de incendios y efectos de la variabilidad climática en el incremento de los mismos (Purkey, y otros, 2014).

Haciendo referencia a la metodología de “susceptibilidad de incendios forestales” existe una controversia debido a que únicamente se considera en la evaluación a la vulnerabilidad mas no la amenaza como tal, por el contrario “el peligro potencial de incendios forestales” hace alusión a las zonas de presión antrópica y factores que tienen una relación directa con la ignición y propagación, con el objetivo de concentrar los esfuerzos de prevención en la localización de zonas de peligro y así poder realizar una planificación de la emergencia. En conclusión, los factores anteriormente mencionados están inmersos en la gestión de riesgos que no solo se enfoca en la prevención si no en la identificación de efectos post desastre y en la cuantificación de afectaciones en el funcionamiento normal del territorio (Purkey, y otros, 2014).

En el desarrollo del estudio de peligro potencial de incendios forestales se contemplan una serie de indicadores tanto climáticos como sociales, entre los principales es la influencia de las actividades antrópicas en el inicio de fuego, indicadores históricos de la recurrencia, la sensibilidad climática en cuanto a variables de temperatura y precipitación y sus

regímenes. Como hallazgos relevantes se determina que las áreas con mayor peligro de incendios forestales son el Cerro Ilaló, Parroquias de Calacalí, Puéllaro, Nono, Calderón, Nayón, Llano Chico y Lloa con una representación del 35% del territorio del territorio y las afectaciones más severas son los daños en la salud de las poblaciones y la interrupción de funcionamiento de los sectores estratégicos que tienen una alta exposición sobre todo en la parte oriental del Distrito debido a la ubicación el relleno sanitario, el aeropuerto de Quito, por la presencia de vías de conectividad estratégica, zonas industriales, proyectos de abastecimiento de agua y poliductos. En lo que respecta a la vegetación los arbustos y bosques húmedos y secos, pastizales y zonas de cultivos se determinaron como zona de riesgo (Purkey, y otros, 2014).

Mapa 3: Peligro potencial de Incendios Forestales relacionados con factores de susceptibilidad a la iniciación y propagación



Fuente: (Purkey, y otros, 2014)

3.1.3 Comparación de la metodología para la determinación de la susceptibilidad a incendios forestales propuesto por la Secretaría de Gestión de Riesgos

La propuesta metodológica de la Secretaría de Riesgos consiste en la determinación de áreas con susceptibilidad física a incendios forestales y el comportamiento de ignición y propagación, enfoca sus esfuerzos para una estimación a nivel nacional; sin embargo se menciona que puede ser aplicada a escalas regionales. Dentro de este análisis se incluye 3 fases: antes, durante y después, es decir no solo se presentan alternativas de prevención con la identificación de la susceptibilidad sino también capacitaciones para saber enfrentar los eventos y planes de reforestación a futuro para la recuperación de las áreas afectadas. Para la estimación de la susceptibilidad física las variables consideradas son: precipitación, temperatura, vegetación, pendiente, radiación, elevación y textura del suelo; estas tienen una gran influencia en las condiciones de ignición y propagación de los incendios forestales. En cuanto al procesamiento de la información obtenida se hace uso de los Sistemas de Información Geográfica con la aplicación de álgebra de mapas para la generación de nuevas capas y la ponderación de variables físicas anteriormente mencionadas con el fin de identificar su influencia espacial e incidencia. Los resultados propuestos se obtuvieron en base al análisis del comportamiento de la ignición y propagación, una serie de cálculos matemáticos con pertinencia a cada variable física y su respectivo análisis multi-criterio donde se obtiene los resultados a partir de todo el análisis conjunto (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2017).

En comparación con el anterior estudio descrito, la metodología propuesta en esta tesis tiene un enfoque local, debido a que las condiciones sociales y ambientales de cada territorio pueden llegar a contrastar diferencias abismales; sin embargo se puede considerar esta metodología como una forma de complementar a otras; además el enfoque principal es la prevención de incendios.

Para el desarrollo metodológico se emplearon principalmente herramientas de teledetección para el tratamiento de imágenes satelitales y obtención de índices espectrales para su posterior interpretación, también se emplearon herramientas de Sistemas de Información Geográfica con el uso de álgebra de mapas para obtención de cálculos derivados de índices y su análisis conjunto. Las variables climáticas consideradas son la precipitación y temperatura de los años 2015 y 2016 (fuente INAMHI y Secretaría de Ambiente del DMQ).

Estos datos permitieron el cálculo del índice de aridez e identificar la correlación existente con los otros índices como el RGRE que se deriva del NDVI en donde se considera el estado de la vegetación y el NDMI para realizar una interpolación con las condiciones de humedad.

3.2 DESCRIPCION DEL PRE-PROCESAMIENTO DIGITAL

3.2.1 Definición de Teledetección

Se define como la técnica que permite la observación de la superficie terrestre mediante sensores que se encuentran en plataformas espaciales de una manera remota, es decir a distancia del objeto. Además, se considera en la Teledetección el procedimiento para la obtención de los productos que ofrecen los satélites como son las imágenes satelitales y su tratamiento posterior con el fin de facilitar la interpretación y la caracterización de los objetos por parte del usuario que dependerán de la aplicación del estudio (Chuvieco, 2010) y (Campbell , 2007).

Existen tres elementos que interactuaran en la observación remota y son considerados indispensables en la teledetección: el sensor, fuente de energía, superficie u objeto de estudio y el flujo energético que incide en los objetos. Esta última se encuentra entre la cubierta terrestre y el sensor (Chuvieco, 2010) y (Martínez Vega & Martín , 2010).

3.2.2 Definición del Espectro Electromagnético

Se define como la forma de radiación electromagnética que tiene una secuencia continua en los valores de longitud de onda en función a la frecuencia de organización de las mismas. La longitud de onda varía desde la más corta (micrómetros) hasta la más larga (centímetros o metros). Según la longitud de onda se divide al espectro electromagnético en espectro visible, infrarrojo próximo, infrarrojo medio, infrarrojo térmico y microondas (Chuvieco, 2010).

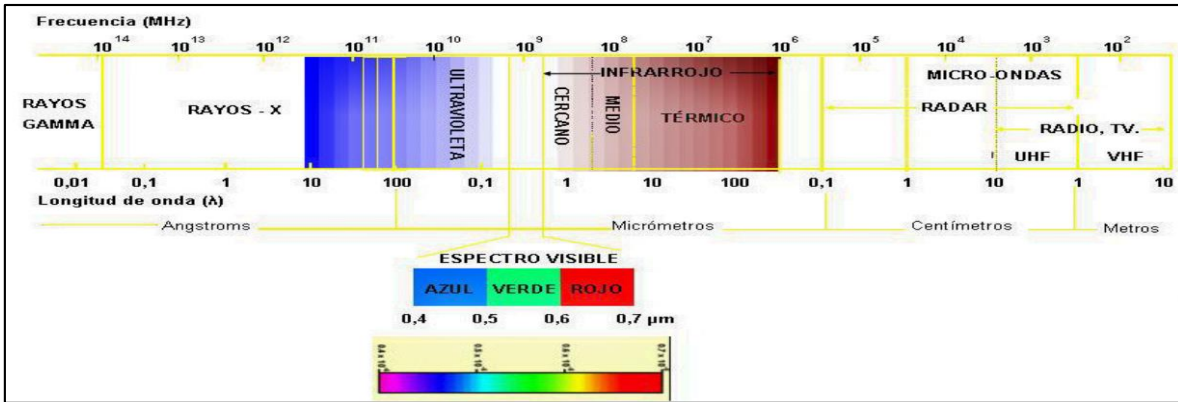


Figura 6: Espectro Electromagnético

Fuente: (Martínez Vega & Martín , 2010)

A efectos de este estudio, por emplear el índice de vegetación NDVI y el índice de humedad NDMI (ver figura 8), se considera el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio, correspondientes al RED, NIR y SWIR respectivamente (ver figura 9); en los cuales se puede discriminar cubiertas vegetales, contenido de agua y contenido de humedad en la planta (Chuvieco, 2010). En el caso de la plataforma de Landsat 8 OLI/TIRS representan a las bandas 4 (0,64 a 0,67 μm), 5 (0,85 a 0,88 μm) y 6 (1,57 a 1,65 μm) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi , 2013).

$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$	$NDMI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$
Dónde: NIR= banda 5, R= banda 4	Donde: NIR= banda 5, SWIR= banda 6

Figura 7: Cálculo de índices espectrales

Fuente (CONAE, 2016)

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100	

Figura 8: Bandas satelitales LANDSAT OLI/TIRS misión 8

Fuente: (Instituto Geográfico Agustín Codazzi , 2013)

3.2.3 Pre-procesamiento digital

En el presente estudio se seleccionaron 2 años relevantes en cuanto a incendios forestales. El año 2015 es representativo debido se registraron eventos por incendios forestales abundantes y de gran magnitud. Contrariamente en el año 2016 el número de eventos por incendios forestales fueron menores respecto al año antecesor. En consecuencia, las imágenes satelitales seleccionadas son inherentes a los meses donde se presenciaron incendios a partir de media hectárea en adelante, considerando un total de 8 imágenes que corresponden a las fechas del 27 de junio al 9 de octubre en el año 2015 y del 11 de junio al 9 de septiembre para el año 2016 (ver anexo 1 y 2) (COE-M, 2015) y (COE-M, 2016).

Tabla 4: Imágenes satelitales

Nº	Año	Mes	Día
1	2015	Junio	27
2		Julio	13
3		Agosto	30
4		Septiembre	15
5		Octubre	17
6	2016	Julio	15
7		Agosto	16
8		Septiembre	17

Fuente: (USGS, 2018)

Elaboración propia

3.2.3.1 Correcciones atmosféricas de las imágenes

Las correcciones de la imagen son procesos que tienen el objetivo de corregir distorsiones y desaparecer cualquier tipo de anomalías que se presente en el producto como: errores de altura u orientación, ángulo de barrido, rotación de la tierra, localización o distorsión en los niveles digitales de información del pixel. Al momento de realizar la corrección se procura que la imagen sea lo más similar posible a la visualizada en la plataforma, tanto en posición de los pixeles como en radiancia, con el fin de facilitar la interpretación llevada a cabo por el usuario. Existen 3 tipos de correcciones: atmosféricas, radiométricas y geométricas (Chuvieco, 2010).

Las correcciones atmosféricas tienen el propósito de disminuir o eliminar las distorsiones generadas en la atmósfera que son captadas por el sensor. Este proceso se lleva a cabo mediante una serie de pasos que son realizados por softwares especializados y como resultado se obtiene la mejoría de la calidad visual de la imagen corregida, en el caso de este estudio las correcciones atmosféricas se realizan en ERDAS IMAGINE (Chuvieco, 2010).

3.2.4 Resoluciones de la Plataforma Landsat OLI/TIRS misión 8

Al hablar de la resolución de un sensor se hace relación a la característica de discriminación de contrastes en una porción de la superficie terrestre; existe una relación directa entre estas dos variables, es decir mientras los contrastes sean mayores en la imagen la discriminación de información el nivel de detalle será mejor (Chuvienco, 2010).

El Sistema Landsat OLI/TIRS 8 se caracteriza por incorporar dos sensores en su plataforma: el primer instrumento denominado OLI “*Operational Land Imager*” que está relacionado con las condiciones de barrido y TIRS “*Thermal Infrared Sensor*” que se caracteriza por incluir un sensor térmico infrarrojo. En comparación de la anterior misión de Landsat 7 TM y ETM+, la misión 8 ofrece 2 bandas espectrales: la banda especializada en la detección de cuerpos de agua enfocado a estudios marino-costeros (banda 1) y la banda correspondiente al infrarrojo para la detección de nubes de tipo cirrus (banda 9) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi , 2013).

3.2.4.1 Resolución radiométrica

La resolución radiométrica consiste en la capacidad de identificar variaciones en los niveles de radiancia, es decir, hace alusión al rango de valores en la codificación digital del sensor y el número de bits almacenados. Para el caso de la interpretación visual se debe considerar que el ojo humano tiene capacidades limitadas a comparación de una computadora, según Beaven, 1988 se recomienda el uso de 16 bits con 4096 tonalidades (Chuvienco, 2010).

La resolución radiométrica en Landsat OLI/TIRS 8 incorpora una mejoría de 12 bits a comparación de las misiones anteriores (8 bits en Landsat TM y EM+), permitiendo la detección de cambios significativos (Instituto Geográfico Agustín Codazzi , 2013).

3.2.4.2 Resolución espectral

Es la característica para procesar comportamientos espectrales de las bandas, permitiendo la discriminación de las cubiertas que depende del número y ancho de bandas

que registre el sensor (Chuvieco, 2010). Landsat OLI/TIRS se caracteriza por ofrecer imágenes multispectrales ya que sus productos incluyen un total de 11 bandas con distinciones específicas para cada una (ver figura 9) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi , 2013). En el caso de este estudio se harán uso de 3 bandas: RED (banda 4), NIR (Banda 5) y SWIR (Banda 6) inherentes al cálculo del “*Índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI*” y “*Índice de humedad de diferencia normalizada*”.

3.2.4.3 Resolución temporal

Es la capacidad de registrar información en un intervalo de tiempo con un ciclo de retorno específico (frecuencia de cobertura) que depende del tipo de sensor. Este intervalo dependerá del fenómeno que se desee estudiar. La resolución temporal en Landsat OLI/TIRS es de 16 días (Chuvieco, 2010).

3.2.4.4 Resolución espacial

Se refiere al nivel de distinción de los objetos en una imagen y depende del tamaño del pixel que se define como la mínima unidad de información, los factores que tienen influencia en la resolución espacial son: la cantidad de detectores, la altura orbital y velocidad de la exploración. En el momento de realizar la interpretación de la imagen es importante tomar en cuenta la resolución espacial debido a que permite la discriminación de los elementos de la imagen y su detalle. Las unidades de medida en la imagen son los milímetros mientras que en el terreno las mediciones son en metros (Chuvieco, 2010).

En el caso de Landsat 8 posee 9 bandas con una resolución espacial de 30 metros, en el caso de las bandas térmicas (10 y 11) la resolución es de 100 metros y la banda pancromática (8) es de 15 metros (Instituto Geográfico Agustín Codazzi , 2013)

CAPITULO IV

4. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

En el análisis de áreas potenciales a incendios forestales se consideran cuatro fases que se describirán a continuación y que contienen el proceso comprendido desde la adquisición de la información tanto raster como vector, considerado el punto de partida, hasta el análisis de los resultados finales que consiste en la identificación de áreas propensas a incendiarse tomando en cuenta la influencia de las variables meteorológicas como precipitación y temperatura, y el estado de la vegetación que fue determinada mediante 3 índices: NDVI, RGRE y NDMI.

4.1 RECOPIACIÓN Y VERIFICACIÓN DE INFORMACIÓN DE TIPO VECTOR Y RASTER

4.1.1 Vector

La información de las variables meteorológicas de precipitación y temperatura fueron adquiridas de dos fuentes: INAMHI y Secretaria de Ambiente del DMQ.

En el caso de INAMHI se solicitó los datos de las estaciones que tengan la información de precipitación y temperatura de los años 2015 y 2016, y se utilizó únicamente la información con datos completos. Se consideraron a las estaciones de La Tola, Izobamba, Ñaquito y Tababela pertenecientes al DMQ y otras estaciones fueron del catón como de Pedro Vicente Maldonado, Puerto Ila y Tomalon-Tabacundo, Esmeraldas (Tachina), Ambato, Napo (Jumandi), Santo Domingo, Coca, Riobamba y Latacunga.

Los datos de las estaciones de Cotocollao, Carapungo, Belisario, Tumbaco y Los Chillos fueron descargadas de la base de datos de la Secretaria de Ambiente del DMQ en la sección de red de monitoreo atmosférico, considerando, de igual manera las que contenían la información completa de los años 2015 y 2016.

4.1.2 Raster

La información tipo raster fue adquirida mediante la plataforma de USGS- Earth Explorer. Se procedió a descargar las imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS de los meses en los que se presentaron la mayor cantidad de incendios forestales de los años de estudio, obteniendo un total de 8 imágenes de las cuales 5 corresponden al año 2015 de los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre; y los 3 restantes que corresponden al año 2016 de los meses de julio, agosto y septiembre.

4.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN DE LOS DATOS VECTOR Y RASTER

4.2.1 Vector

El procesamiento de la información de datos tipo vector consistió en la construcción de las bases de datos en Excel con los valores de precipitación total y temperatura media de los años 2015 y 2016 de las fuentes de información INAMHI y Secretaria de Ambiente del DMQ. Se transformó las bases de datos de Excel a Shape file mediante el programa ArcGIS con uso de ArcCatalog y la herramienta create feature class/from XY table. Para realizar la interpolación de la precipitación y temperatura del 2015 y 2016, se procedió utilizar la herramienta del ArcToolBox/Spatial Analyst Tools/Interpolation/Natural Neighbor.

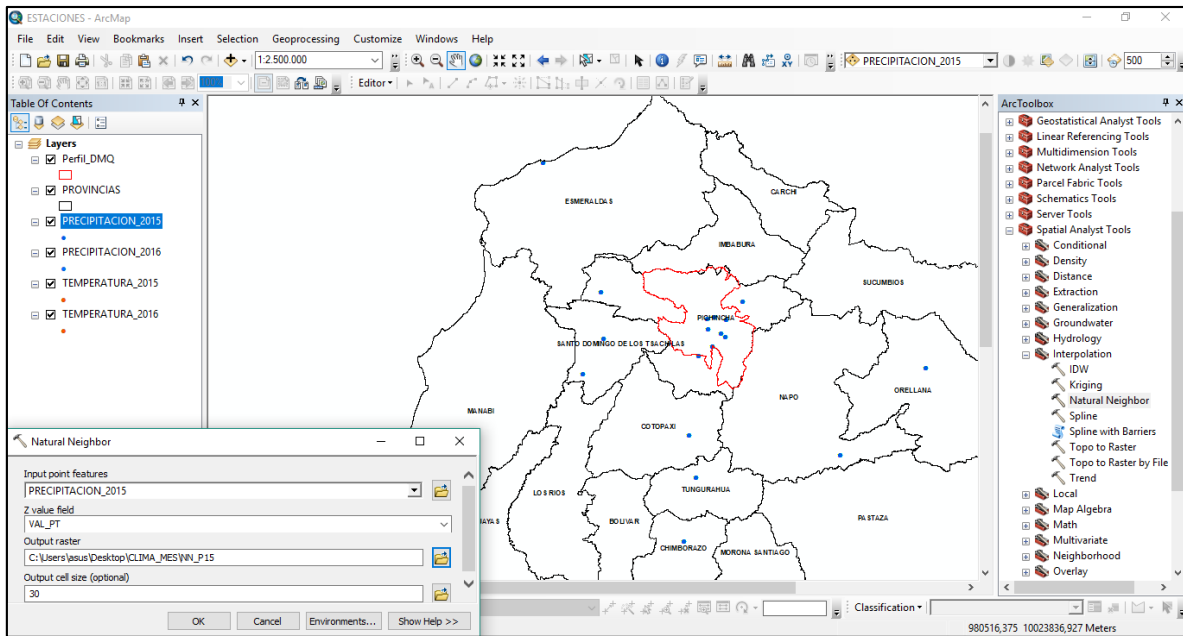


Figura 9: Interpolación de coberturas

Como resultado de la interpolación, se obtiene cuatro raster (precipitación y temperatura 2015 y 2016), creados a partir de los puntos de las estaciones meteorológicas, los cuales sirven para el cálculo del índice de aridez de Martonne obtenido de la aplicación de la fórmula de $P/T+10$, mediante la herramienta ArcToolBox/Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator para los años 2015 y 2016.

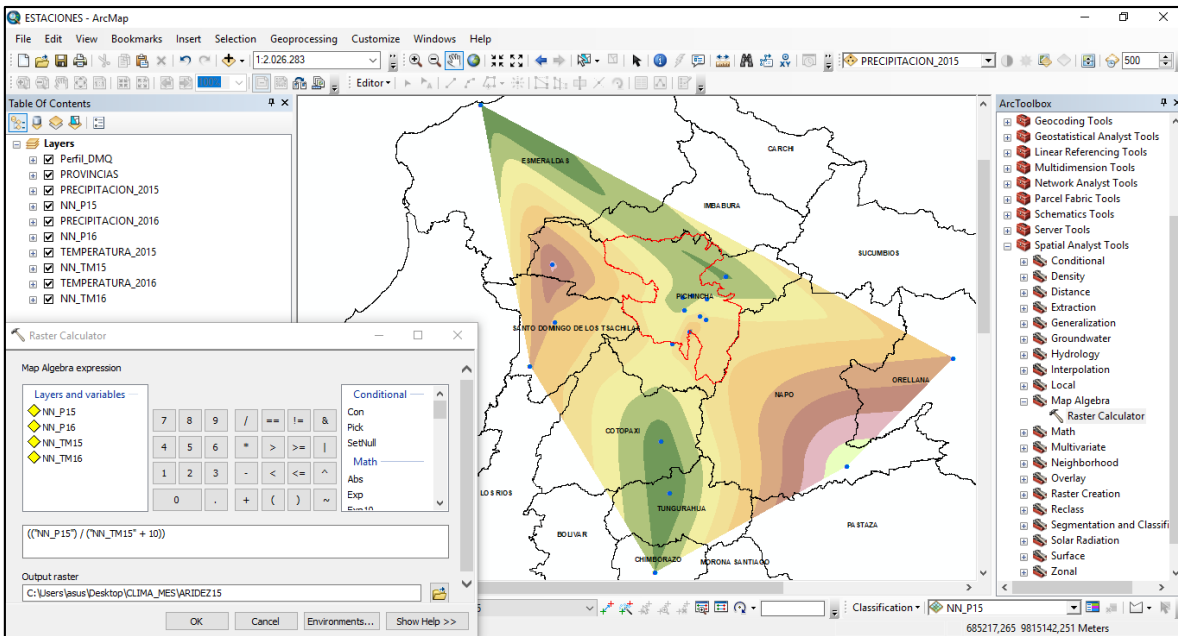


Figura 10: Cálculo del índice de aridez de Martonne 2015

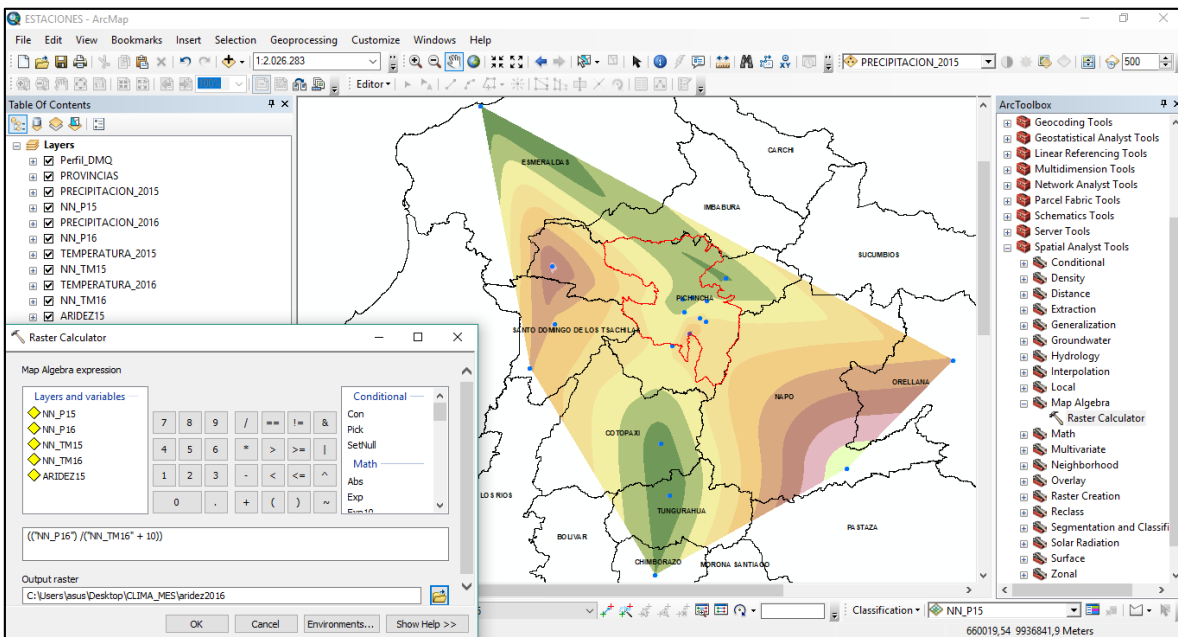
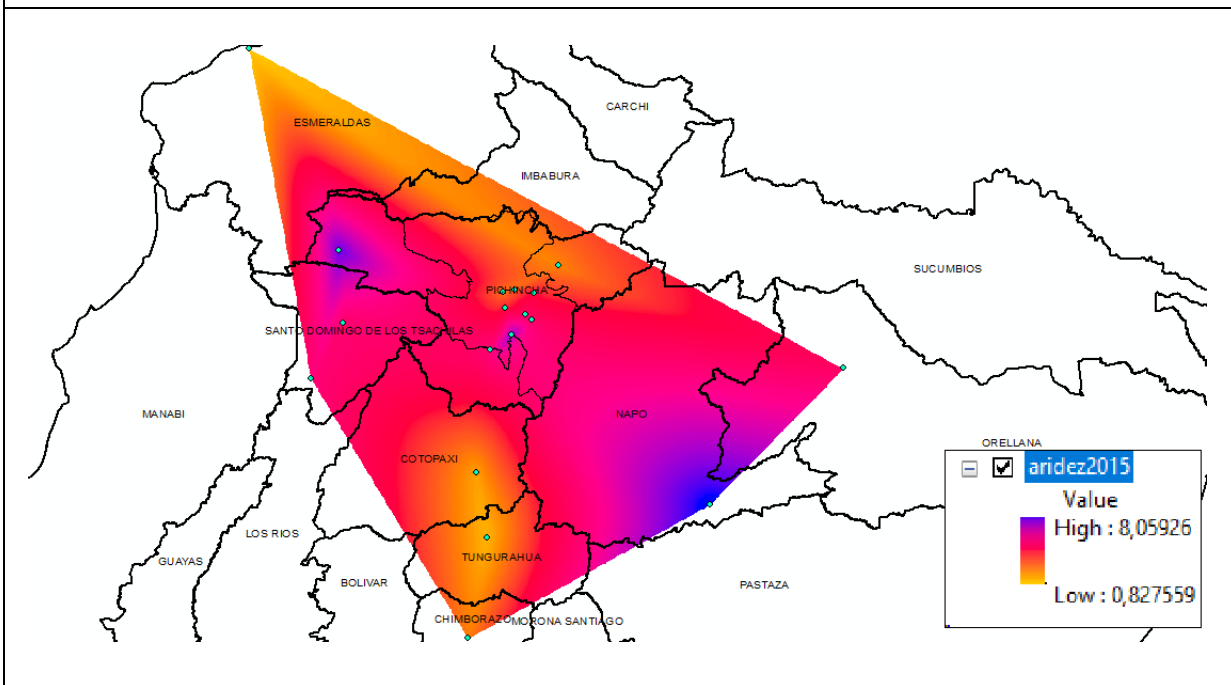


Figura 11: Cálculo del índice de aridez de Martonne 2016

Índice de aridez de Martonne 2015



Índice de aridez de Martonne 2016

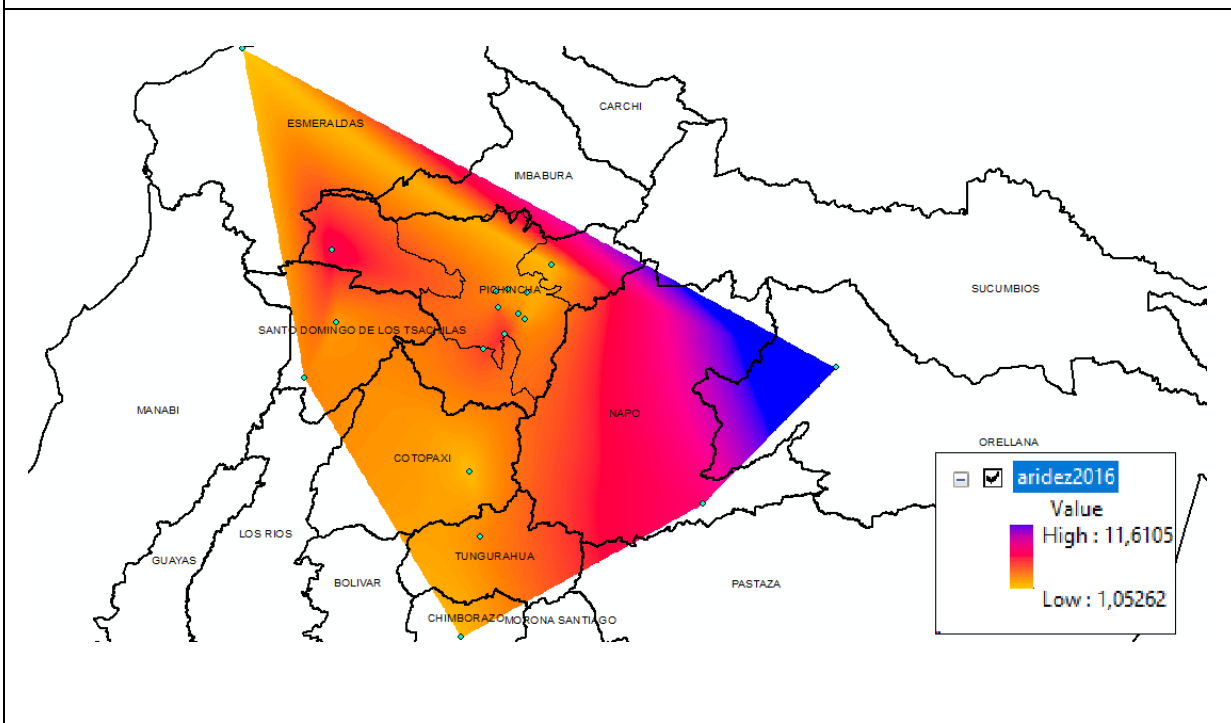


Figura 12: Resultados del cálculo de índice de Martonne

Con los rasters generados que contienen la información de índice de aridez de Martonne se procedió a realizar una clasificación de la imagen tomando como parámetros a los rangos del índice de aridez. Las clases son distintas en el caso de la imagen del 2015 como la del 2016 debido a los rangos resultantes.

Valor de I_a	Zona
0 - 5	Desiertos (Hiperárido)
5 - 10	Semidesierto (Arido)
10 - 20	Semiárido de tipo mediterráneo
20 - 30	Subhúmeda
30 - 60	Húmeda
> 60	Perhúmeda

Figura 13: Interpretación de Índice de Martonne

Fuente: (Almorox, 2010)

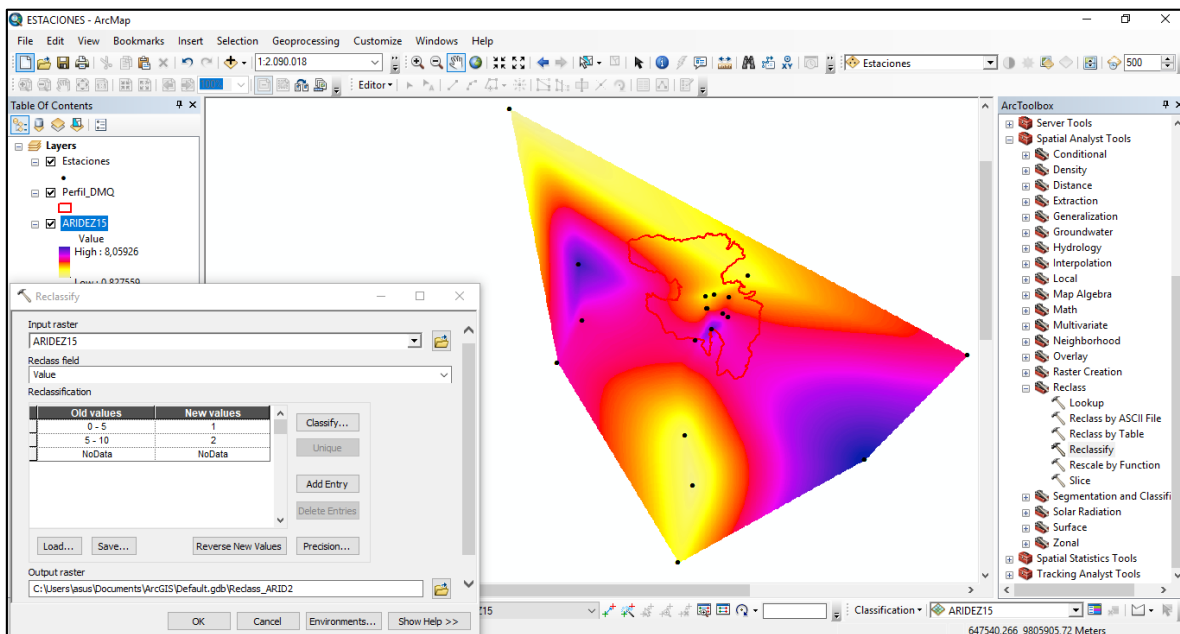


Figura 14: Reclasificación de los valores del índice de aridez de Martonne 2015

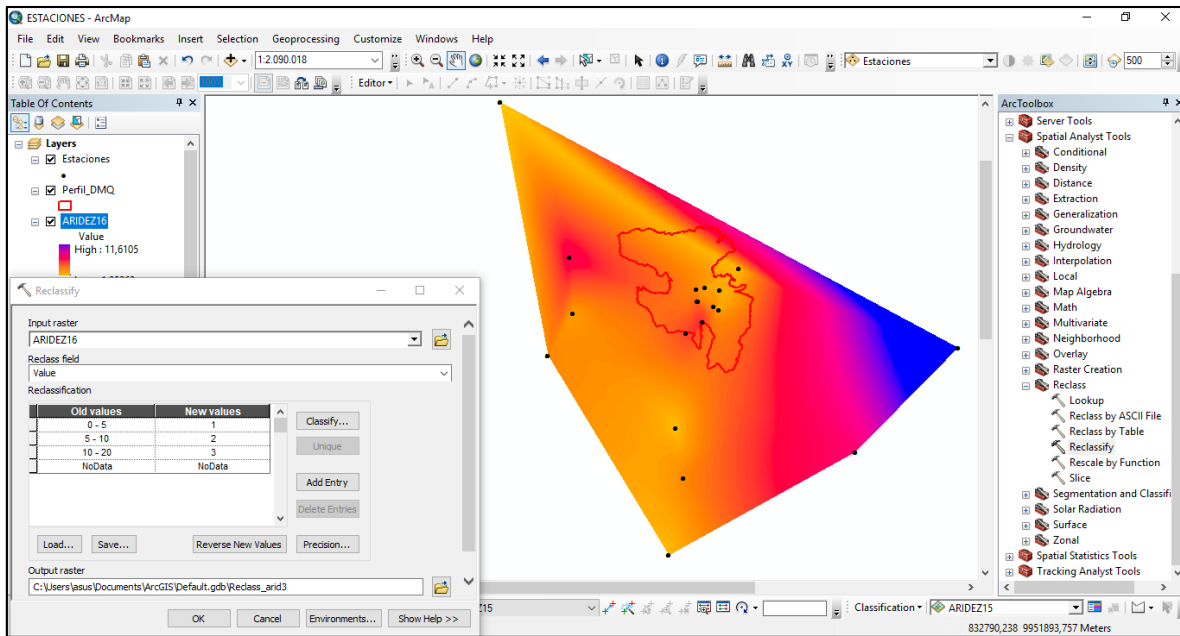


Figura 15: Reclasificación de los valores del índice de aridez de Martonne 2016

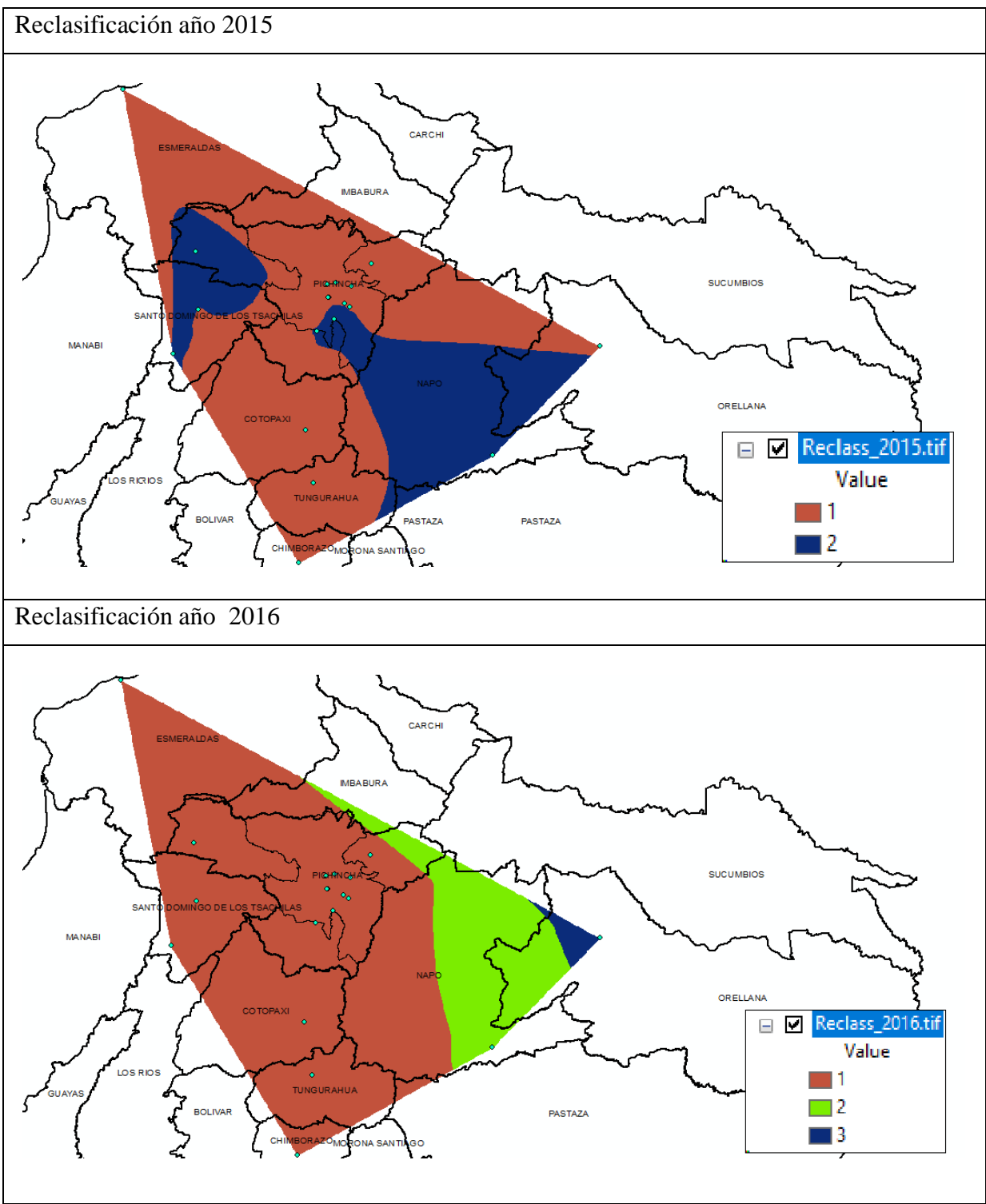



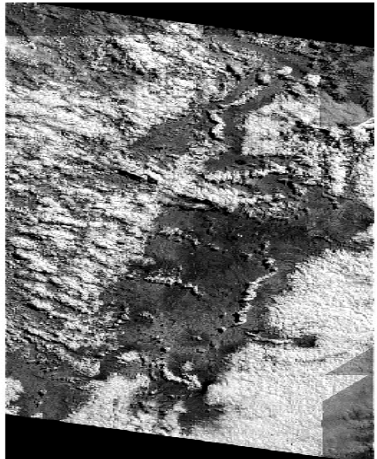

Figura 16: Resultados de la reclasificación



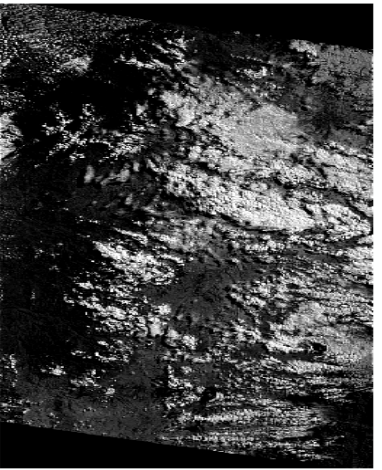


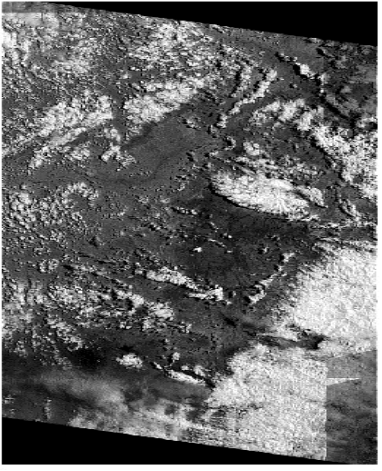



4.2.2 Raster

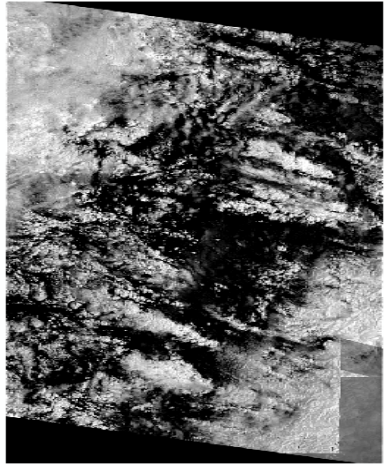

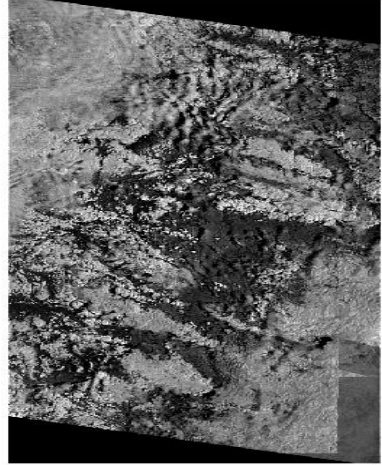

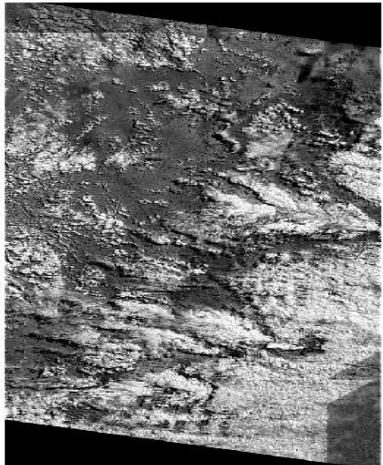
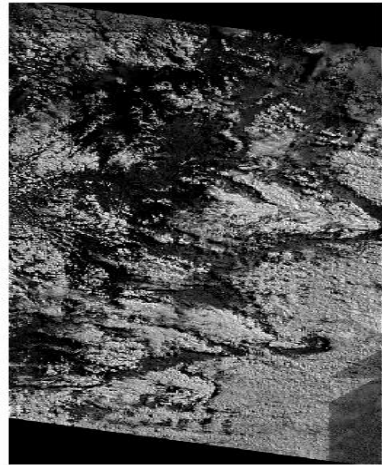
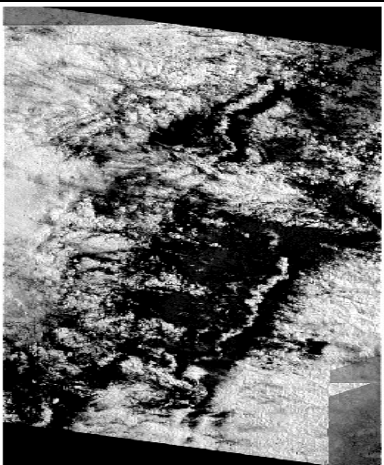

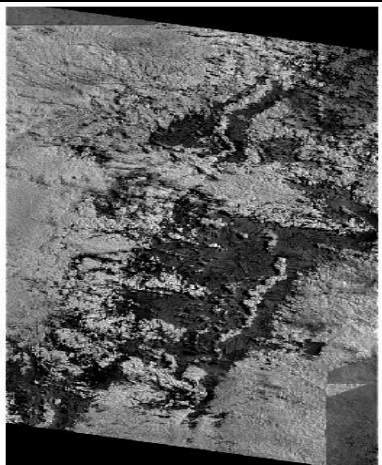
4.2.2.1 Correcciones atmosféricas

Para realizar el proceso de las correcciones atmosféricas, previamente se obtuvo un modelo digital de elevación, el cual fue descargado de la plataforma USGS de Aster Global DEM. Se adquirió dos imágenes correspondientes al hemisferio norte y sur (path 10/ rou 60).

En el programa ERDAS IMAGINE se utilizó la herramienta Toolbox/ATCOR/ATCORE 3 (Terrain) donde se ingresó el DEM adquirido que fue empleado en el siguiente paso donde se escogió ATCORE (work station) para realizar las correcciones atmosféricas de las 3 bandas (RED, NIR, SWIR) de las 8 imágenes obteniendo un total de 24 imágenes corregidas.

Correcciones Atmosféricas		
27 de Junio del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		

13 de Julio del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		
30 de Agosto del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		
15 de Septiembre del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		

17 de Octubre del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		
15 de Julio del 2016		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		
16 de Agosto del 2016		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		

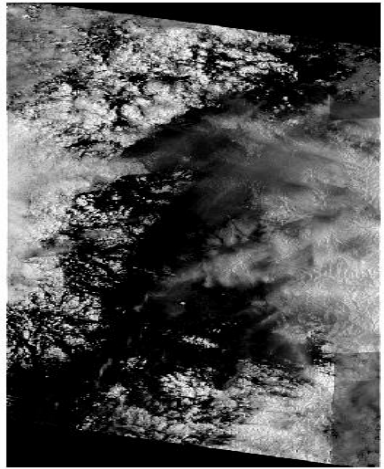
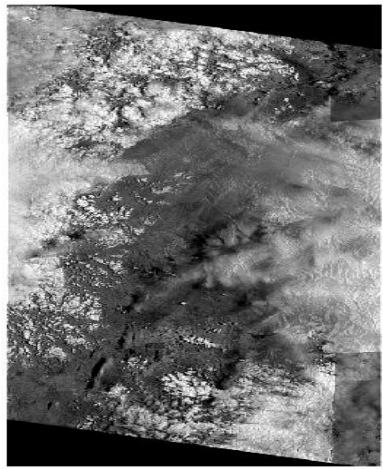
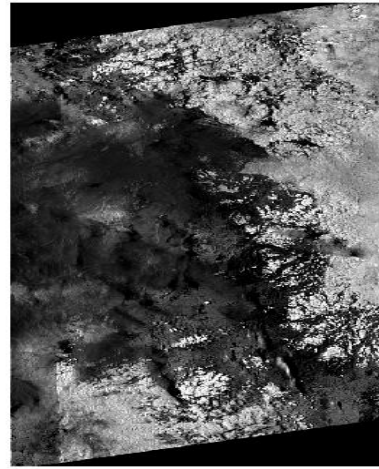
17 de Septiembre del 2016		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		

Figura 17: Resultado de las correcciones atmosféricas

4.2.2.2 Sustracción de la nubosidad

Para realizar el procedimiento de la eliminación de nubosidad se hizo uso de las 24 bandas corregidas y la banda BQA correspondientes de cada fecha. Éstas bandas se encuentran en los DataSets de los productos de la imagen Landsat 8 OLI/TIRS, se caracterizan por ser bandas de calidad y proporcionar datos de las condiciones de los sensores, relleno de la superficie y la atmósfera, y son utilizadas para obtener una máscara de la nubosidad de la imagen (Instituto Geográfico Agustín Codazzi , 2013).

En el programa ArcGIS se importó las imágenes BQA para realizar la eliminación de la nubosidad a las imágenes corregidas mediante la herramienta ArcToolBox/Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator, con el fin de que las condiciones de nubosidad no interfieran en los resultados y su veracidad. Los valores de pixel que corresponden a la nubosidad son de 6.826 a 2.800 (dependiendo del tipo de nube presente en la imagen) y para el caso de la sombra reflejada por la nube es de 2.976.

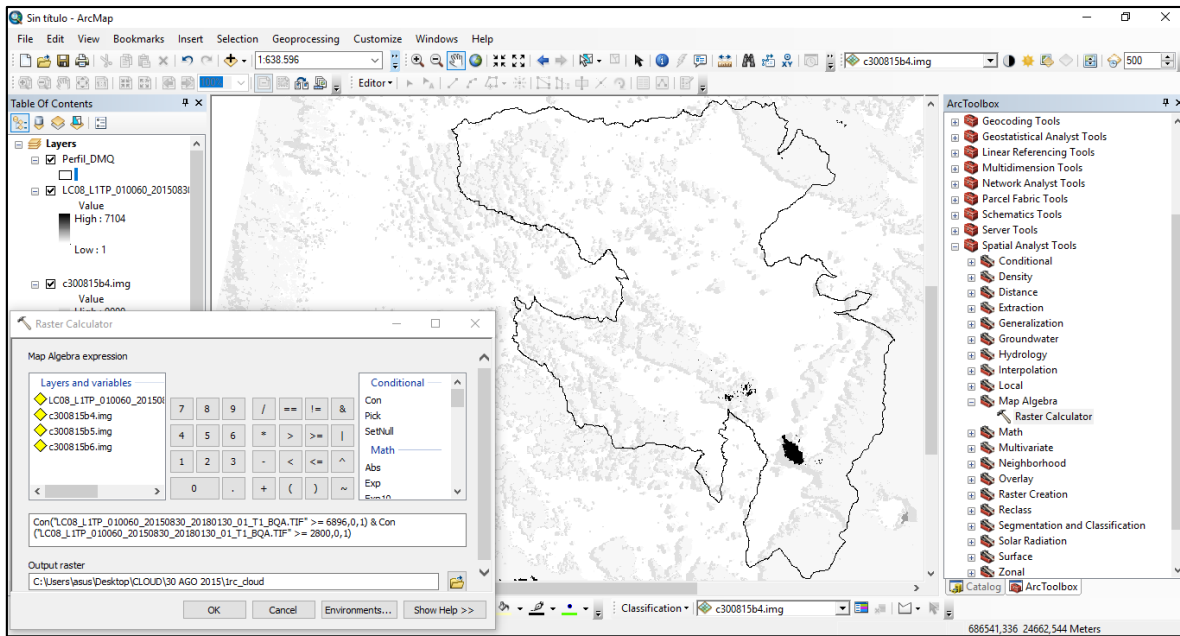
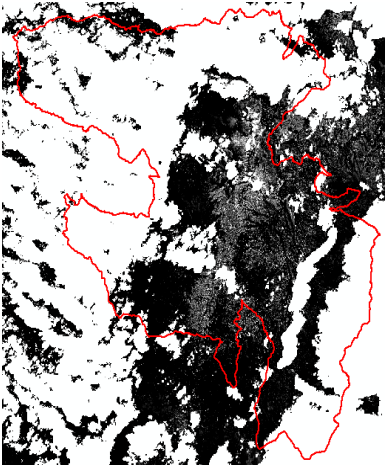
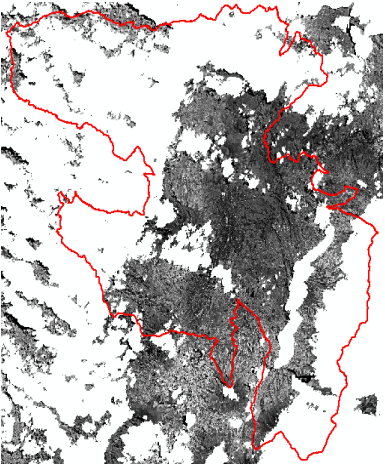
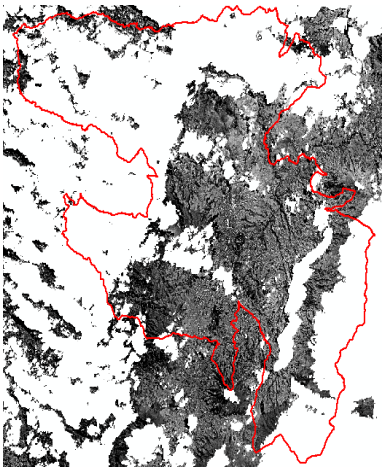
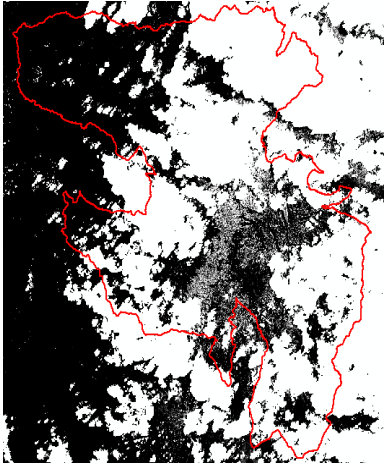
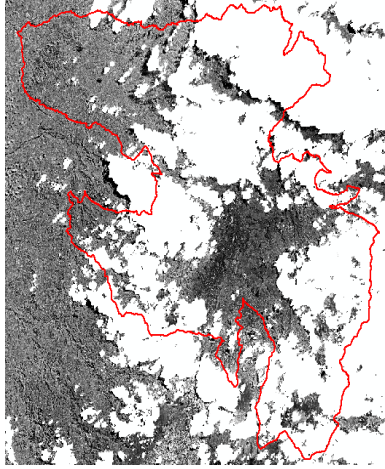
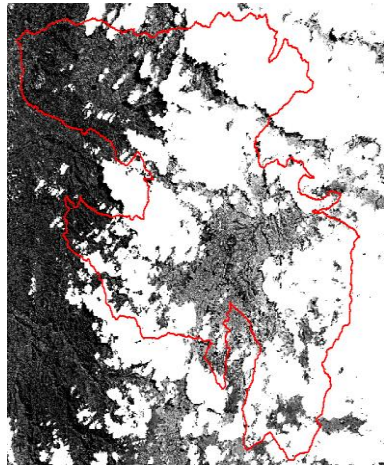
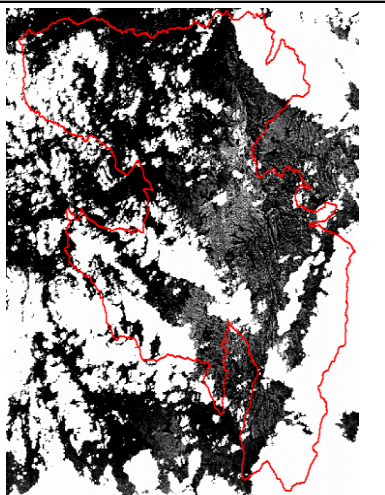
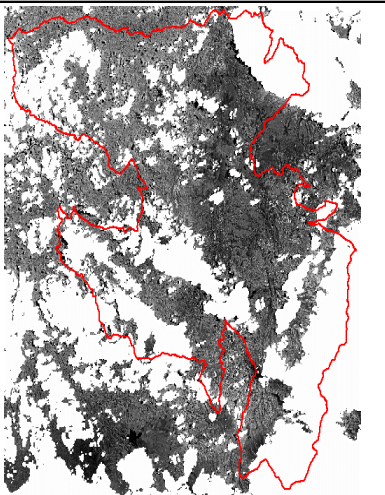
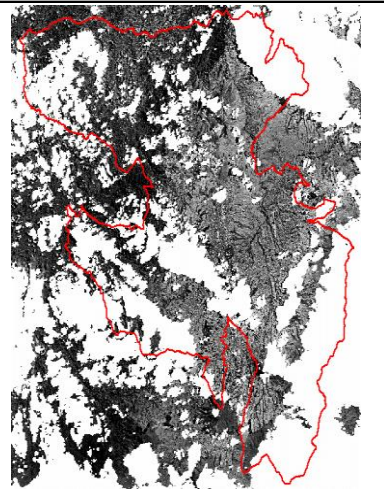
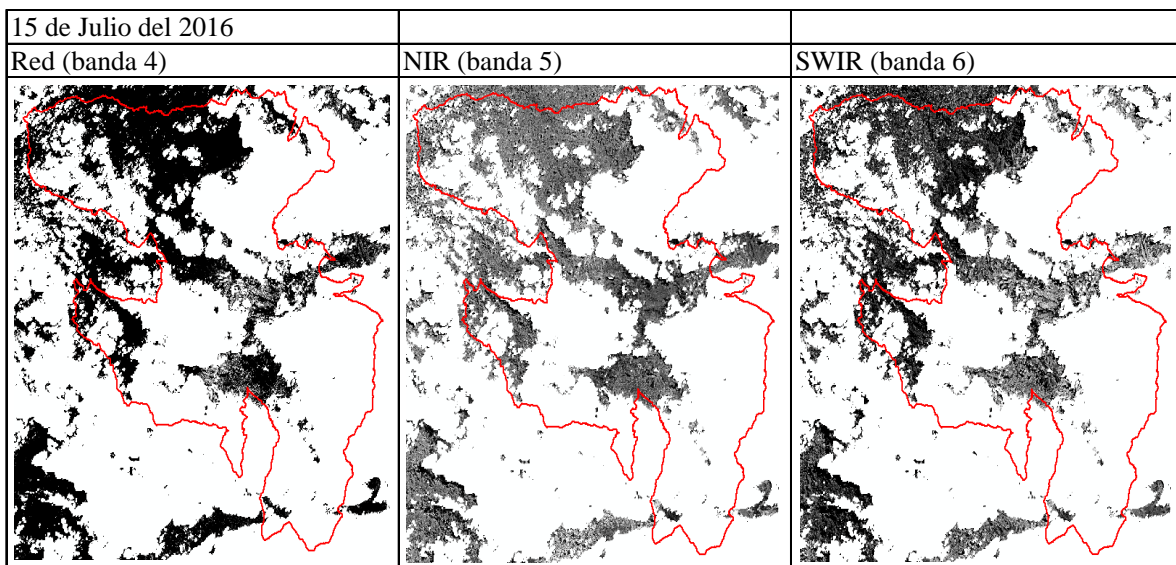
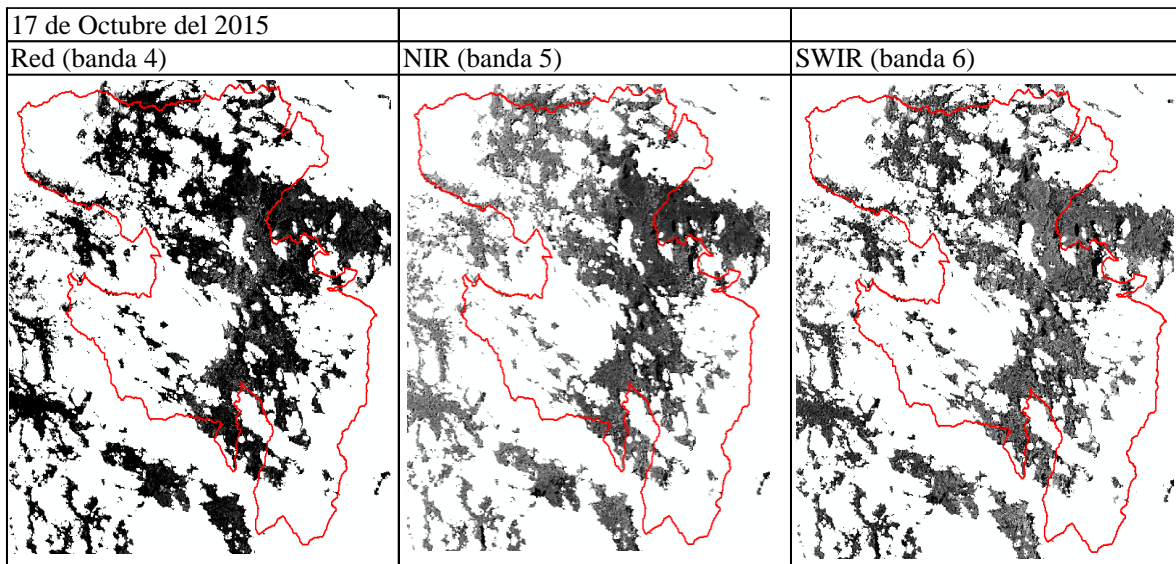
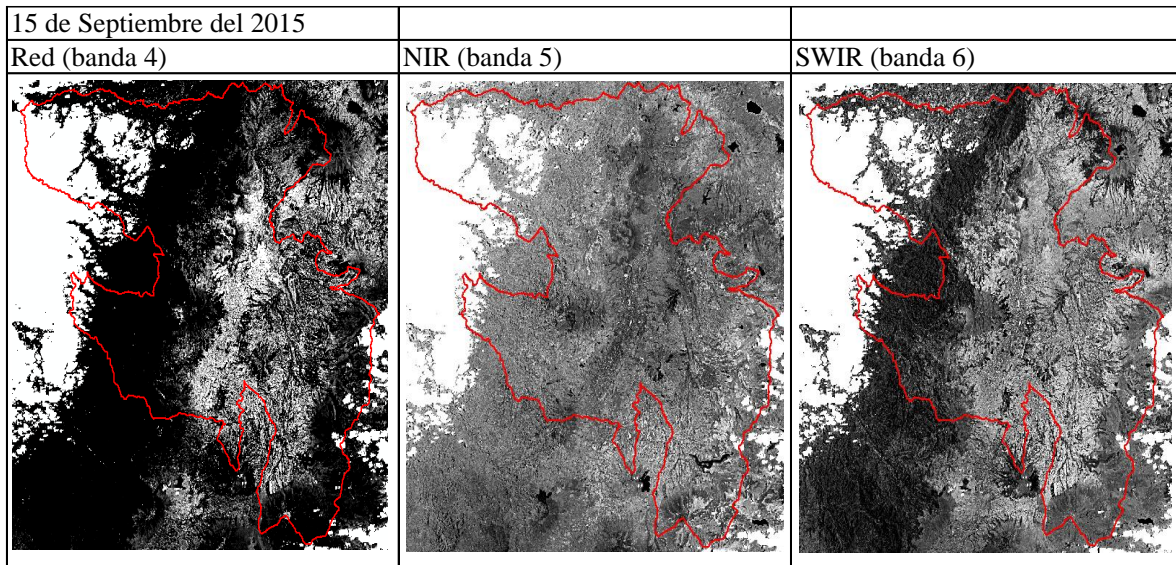


Figura 18: Cálculo de la extracción de nubes según el valor del píxel

Como resultado se obtuvo una clasificación de la imagen raster con valores de 0 y 1, los cuales sirven para realizar una selección de 1 en el campo generado “GRIDCODE” con el fin de obtener solo el área de interés sin nubosidad. Se procedió a transformar la imagen clasificada raster a polígono mediante la herramienta ArcToolbox/Conversion Tools/From Raster/Raster to Polygon. Para obtener solo un campo del nuevo shape generado, se realizó un Dissolve de “GRIDCODE” de la clase seleccionada con la herramienta Geoprocessing/Dissolve y obtener únicamente el área de interés la cual sirvió para realizar una máscara en cada una de las bandas corregidas (banda4, banda5 y banda6 de las 8 imágenes satelitales adquiridas). Este paso se realizó mediante la herramienta ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/ Extraction/ Extract by Mask. Los resultados obtenidos se detallan en la siguiente figura.

Sustracción de nubosidad		
27 de Junio del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		
13 de Julio del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		
30 de Agosto del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		



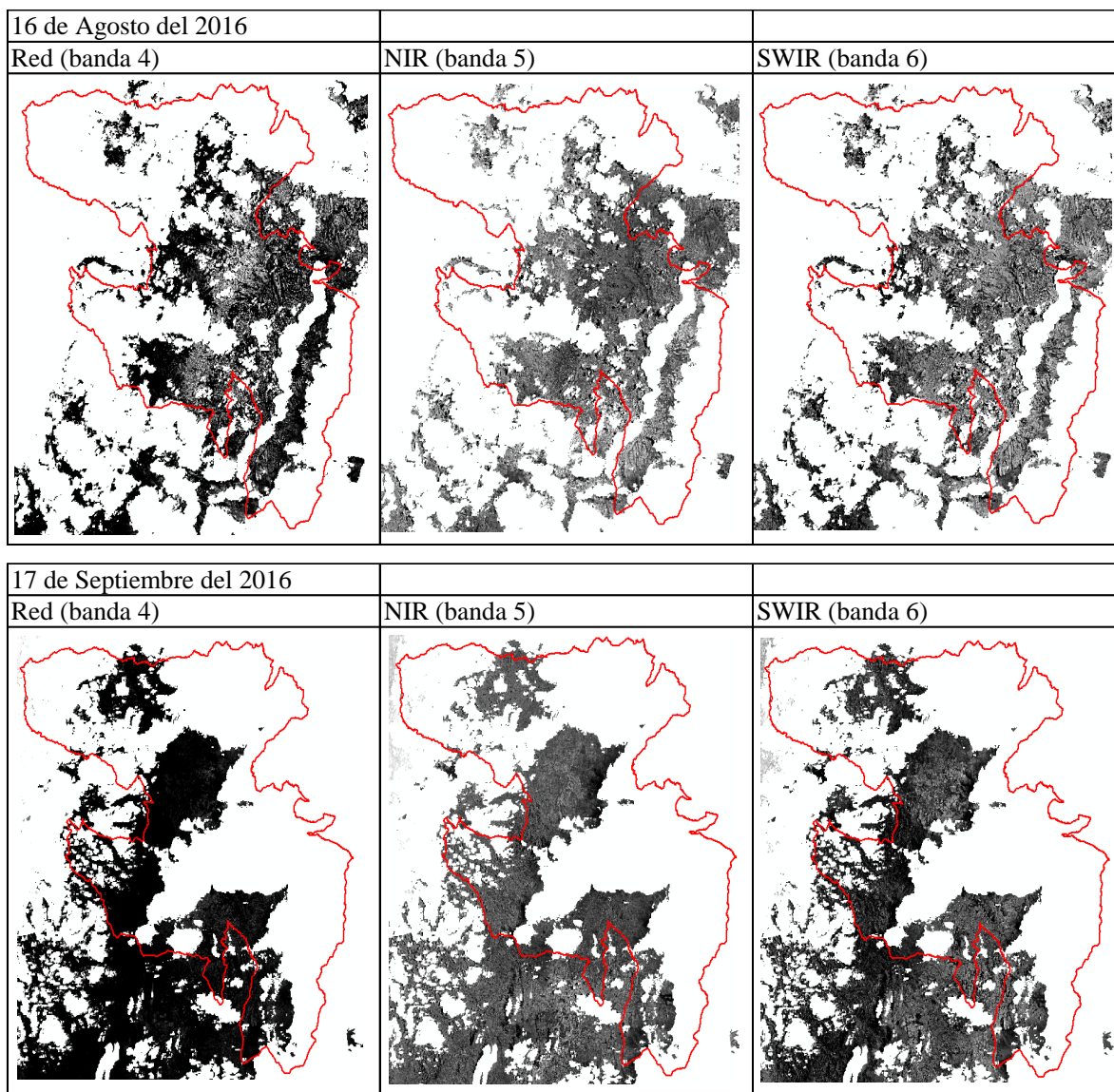


Figura 19: Resultado de la sustracción de nubosidad

4.2.2.3 Extracción de la mancha urbana

En este paso se utilizó la cobertura del “Plan de uso y ocupación del suelo” realizado en abril del 2010 por parte de la Secretaria de Gobernabilidad y Seguridad del DMQ. Esta cobertura contiene, en su campo “uso_general”, clases como: agrícola residencial, conservación natural, equipamiento, industrial, patrimonial, protección ecológica y residencial.

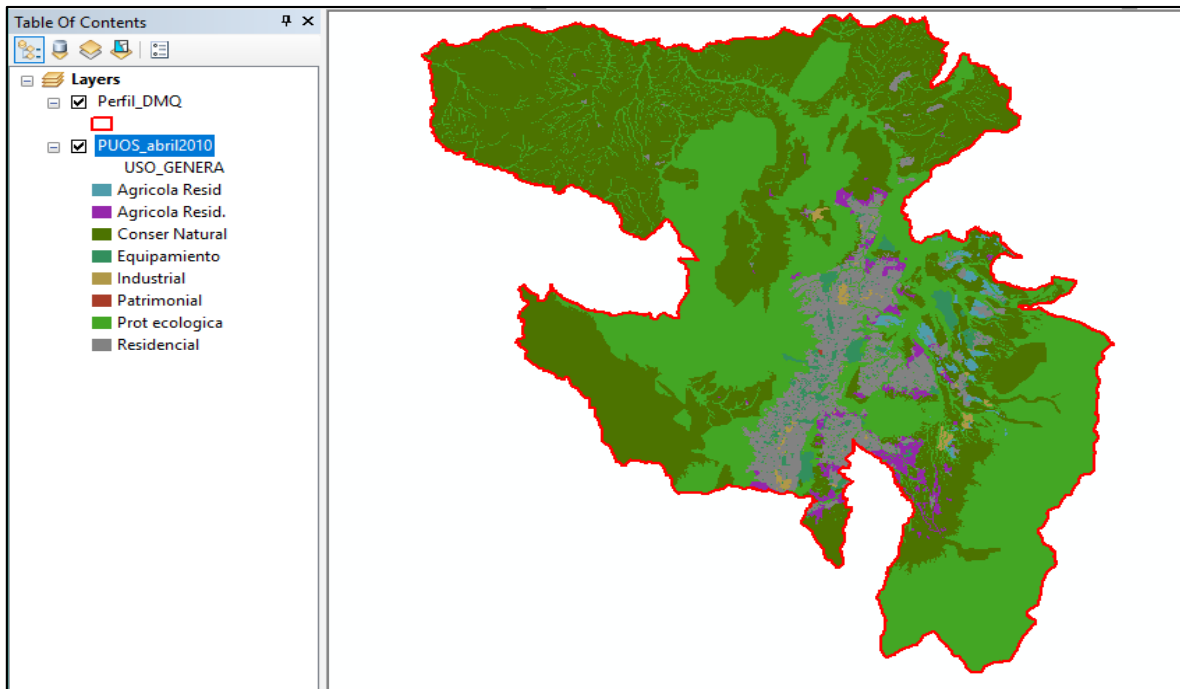


Figura 20: Cobertura de uso y ocupación del suelo (abril 2010)

Se procedió a seleccionar por atributos a las clases agrícola residencial, conservación natural y protección ecológica de la cobertura “PUOS_abril2010”. Se exportó como una cobertura nueva únicamente con las clases del área de interés mencionadas anteriormente. Finalmente se realizó una nueva máscara a los rasters sustraídos la nubosidad mediante la herramienta ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/ Extraction/ Extract by Mask.

El objetivo de la sustracción de la mancha urbana es para que, en el cálculo de los índices, solo se obtenga las áreas vegetales, agrícolas y mixtas (agrícola-residencial) y no otro tipo de uso de suelo innecesario en el cálculo. Además, se tomó en cuenta las zonas agrícola-residenciales debido a que se pueden producir incendios por quemas agrícolas y la cobertura vegetal aledaña a esas áreas se encuentra expuesta.

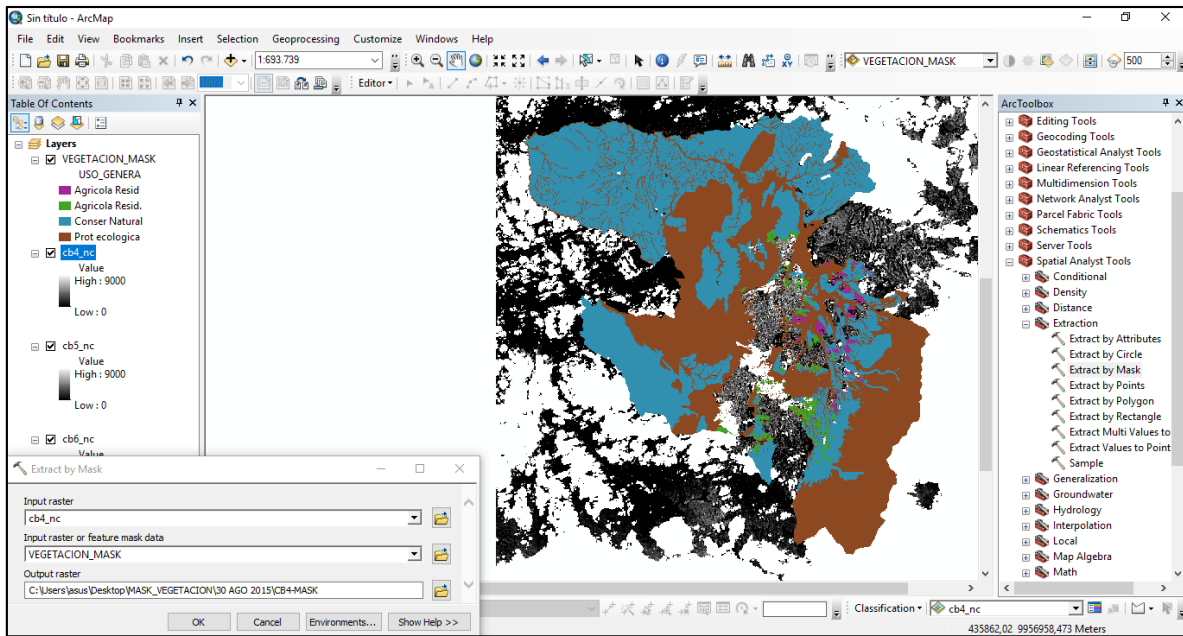
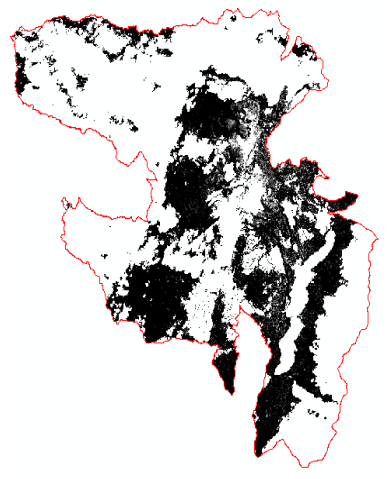
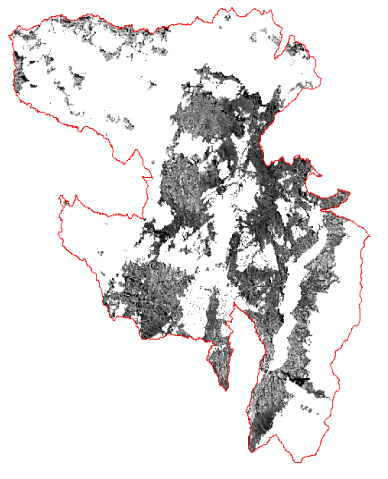
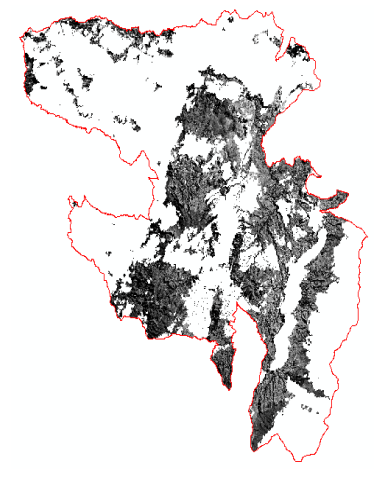
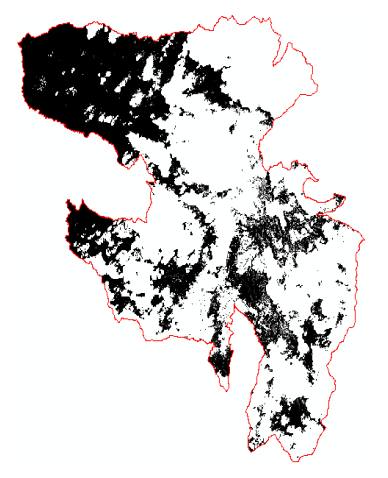
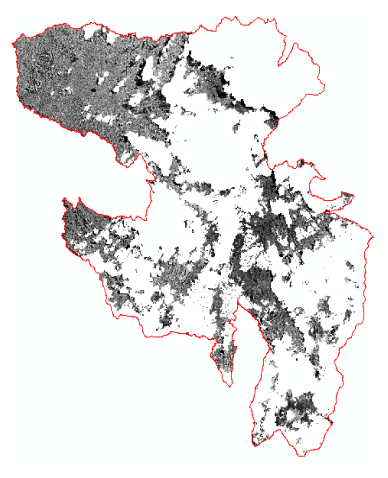
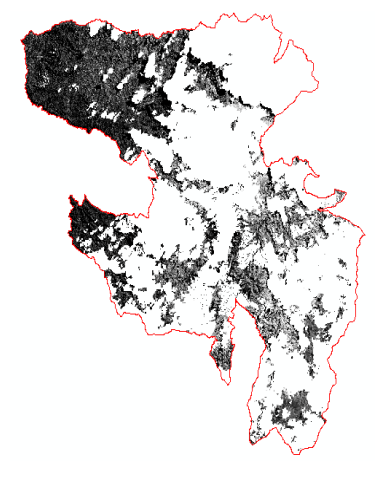
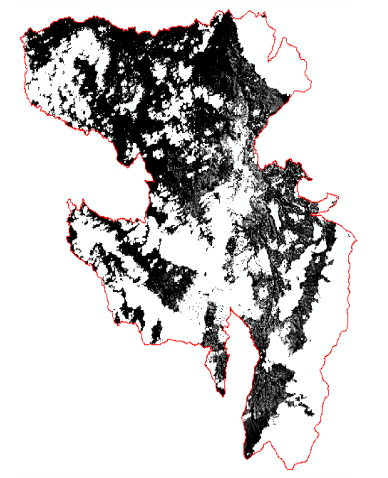
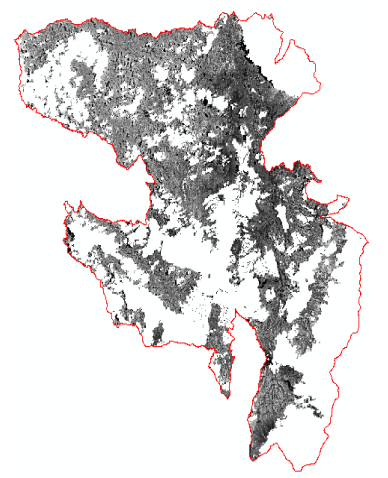
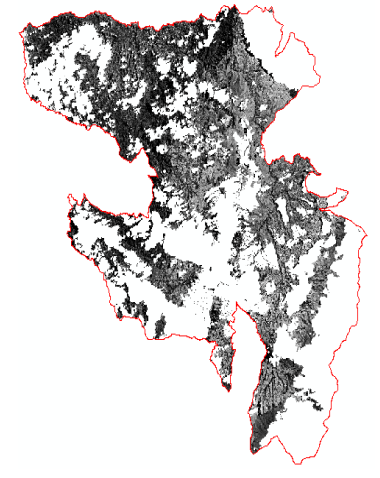
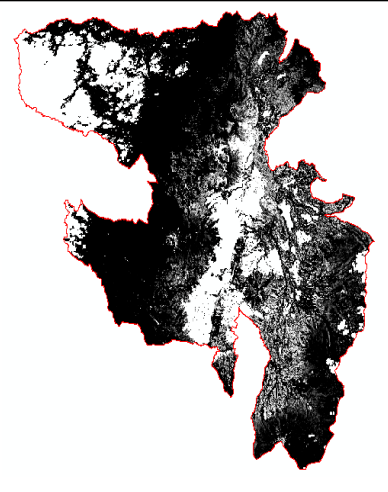
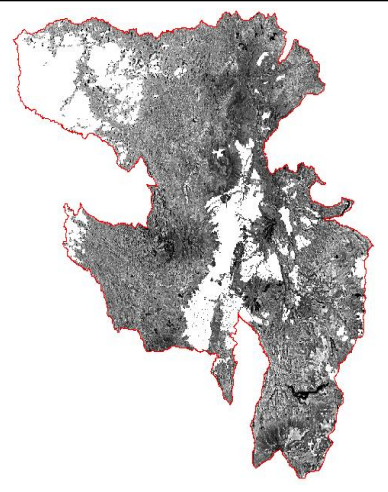
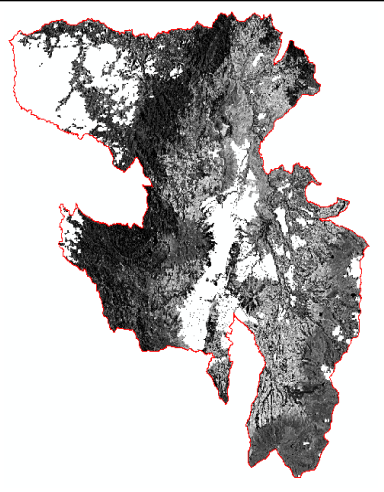
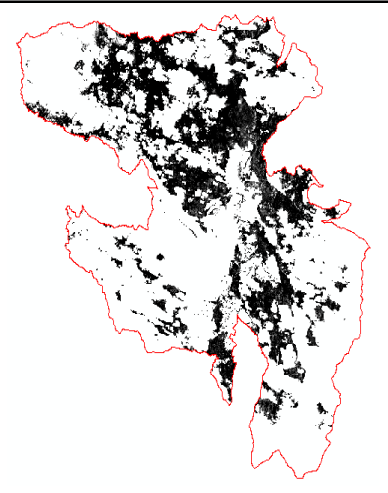
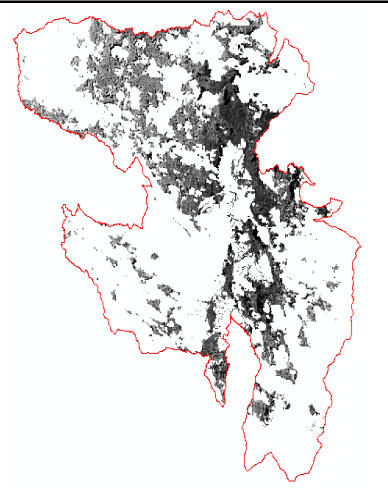
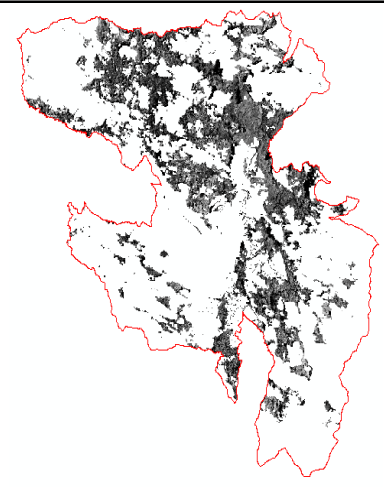
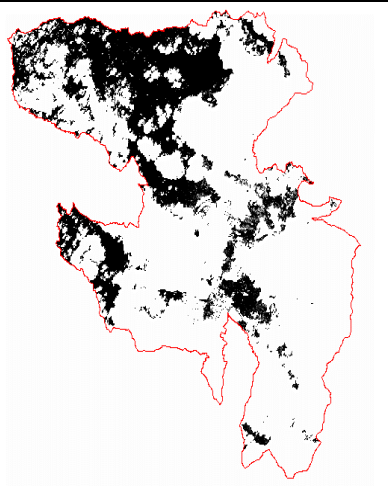
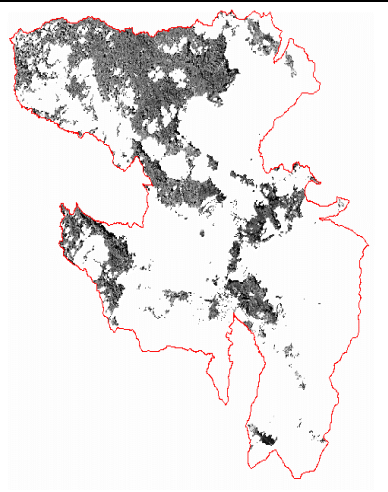
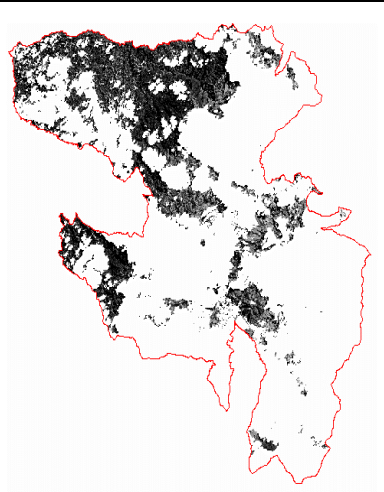


Figura 21: Máscara con la nueva cobertura PUOS_abril2010

Extracción de la mancha urbana		
27 de Junio del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		
13 de Julio del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		
30 de Agosto del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		

15 de Septiembre del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		
17 de Octubre del 2015		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		
15 de Julio del 2016		
Red (banda 4)	NIR (banda 5)	SWIR (banda 6)
		

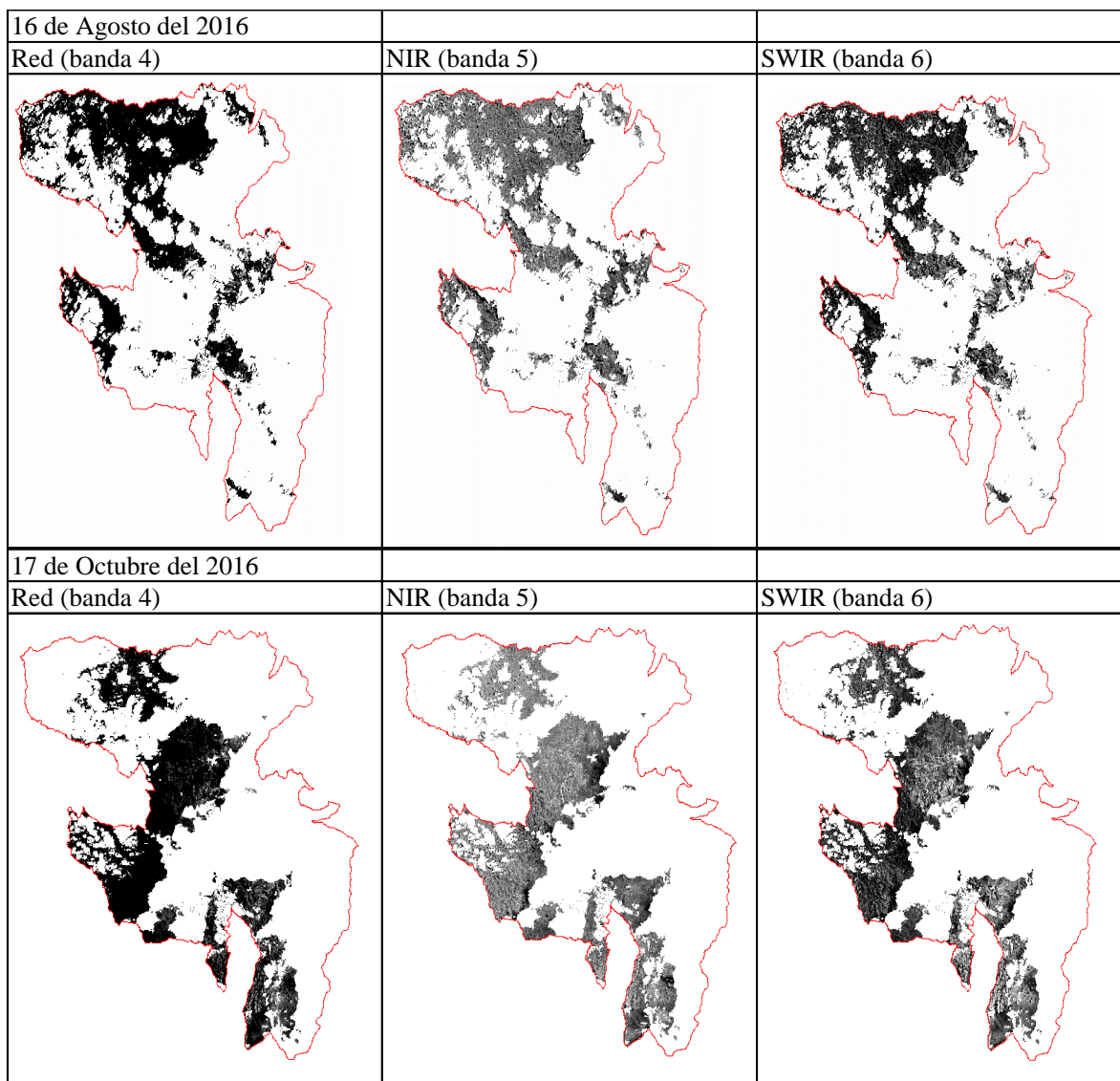


Figura 22: Resultados de la extracción de la mancha urbana

4.3 CÁLCULO DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES Y DETERMINACIÓN DE ZONAS DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES

4.3.1 Cálculo del índice NDVI

Una vez obtenidos los productos en formato raster sin nubosidad y sin áreas urbanas, se procedió a realizar el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada mediante la herramienta ArcToolBox/Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator.

Fórmula: (NIR: Banda 5 - RED: Banda 4/ NIR: Banda 5 + RED: Banda 4)

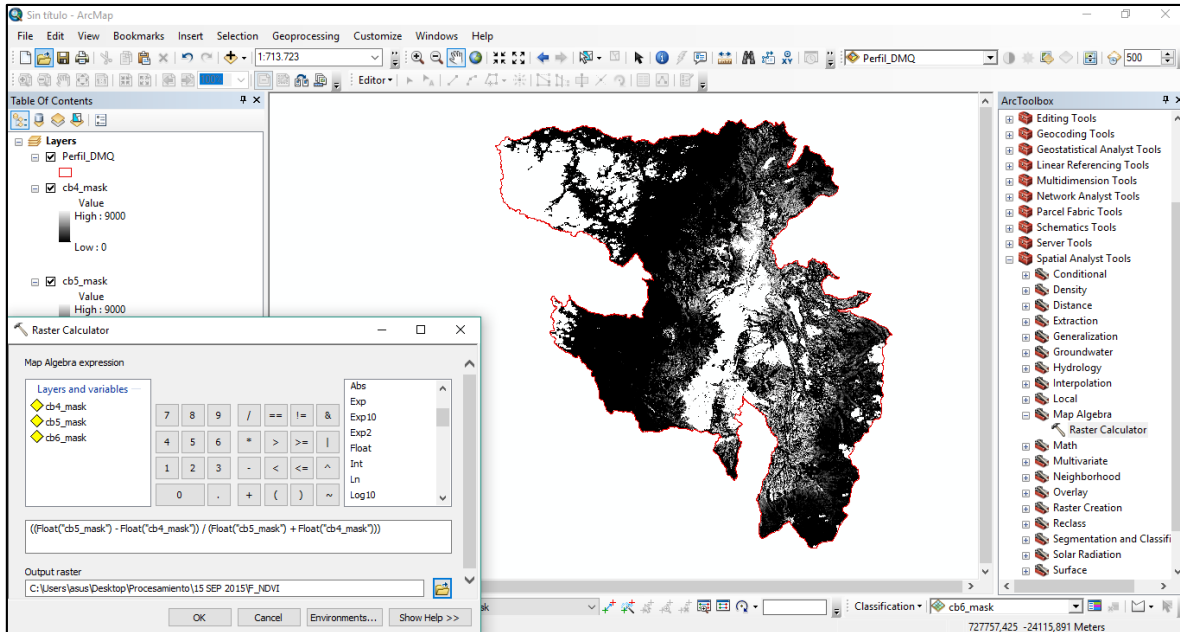
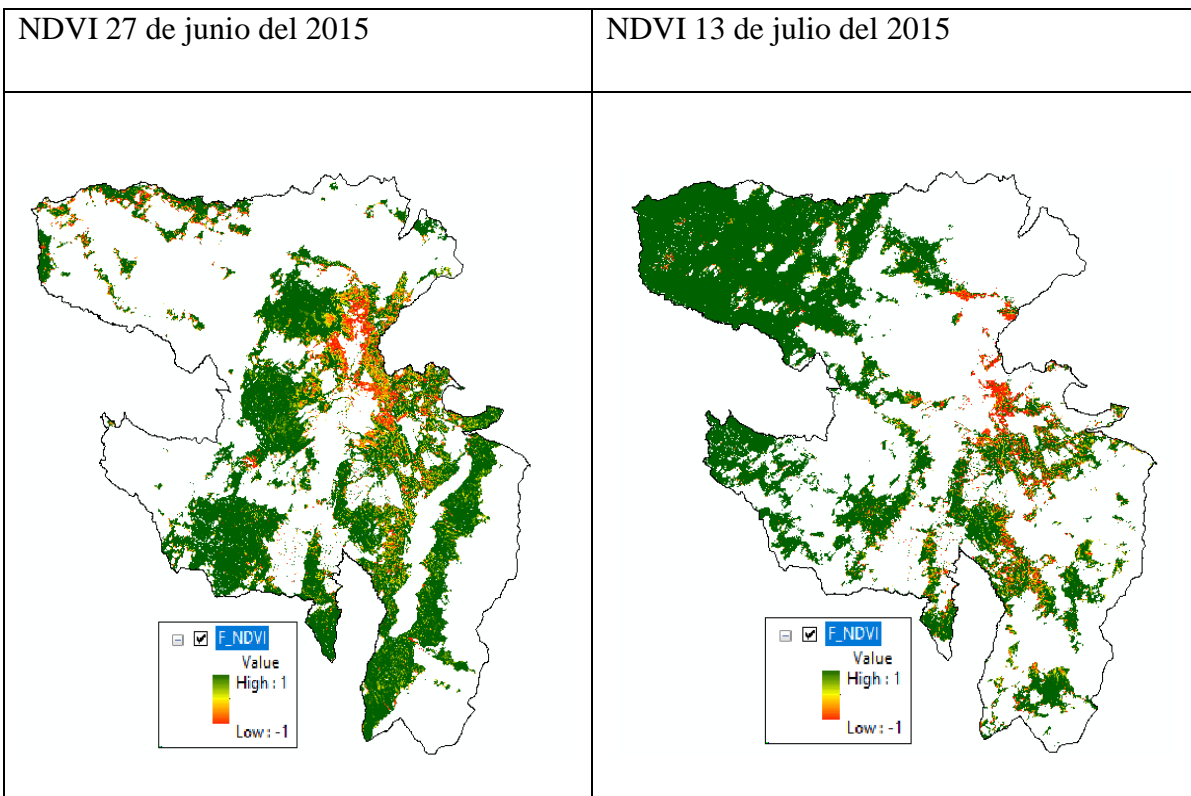
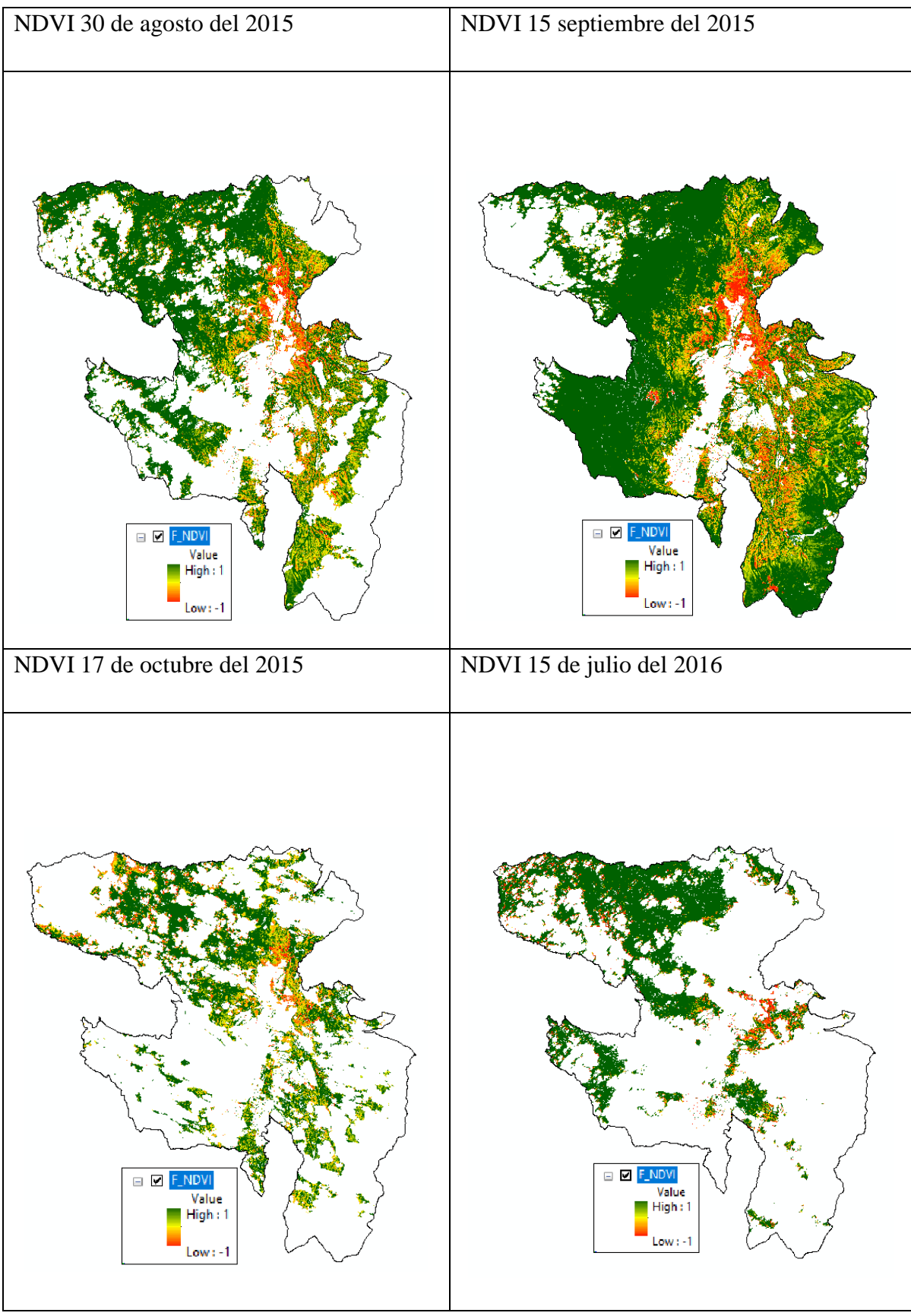


Figura 23: Cálculo del NDVI





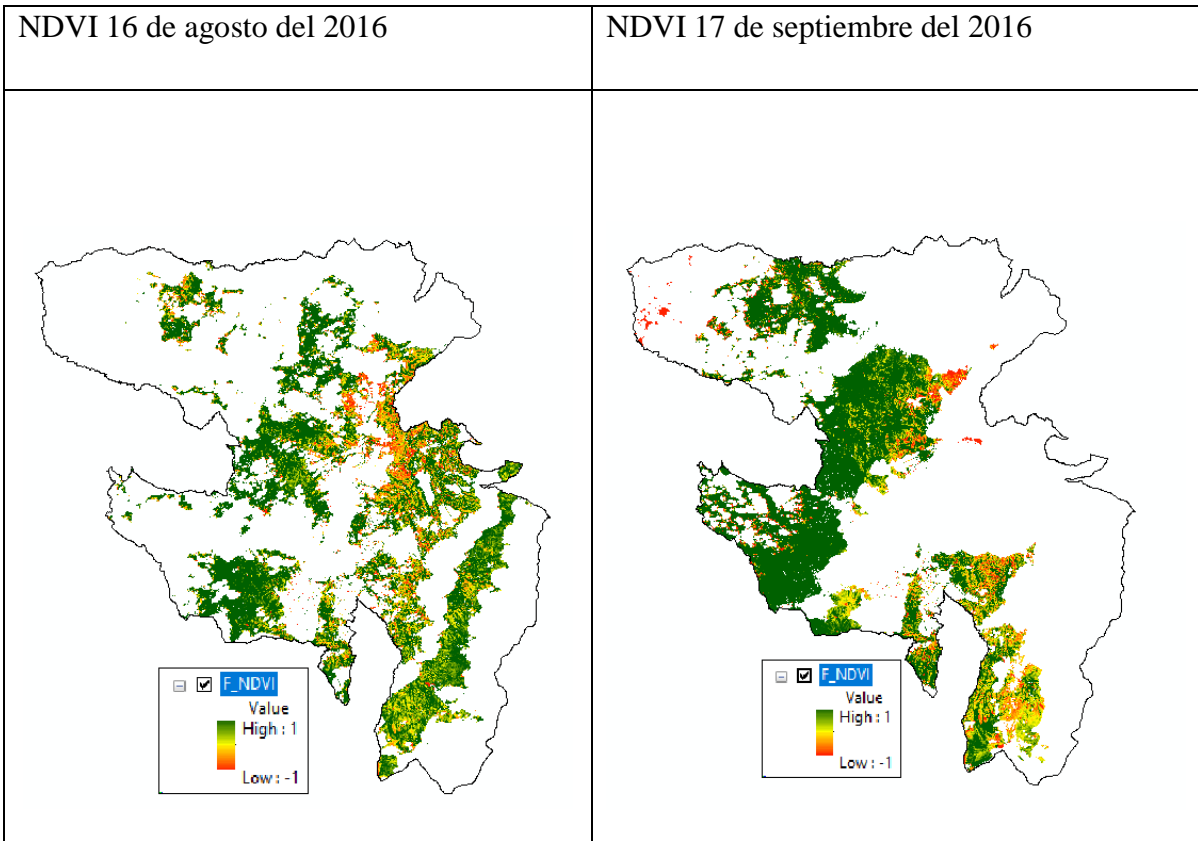


Figura 24: Resultados del cálculo del NDVI

4.3.2 Cálculo del índice NDMI

Para el cálculo del índice de humedad se realizó el proceso detallado a continuación mediante la herramienta ArcToolBox/Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator.

Fórmula: (NIR: Banda 5 - SWIR: Banda 6 / NIR: Banda 5 + SWIR: Banda 6)

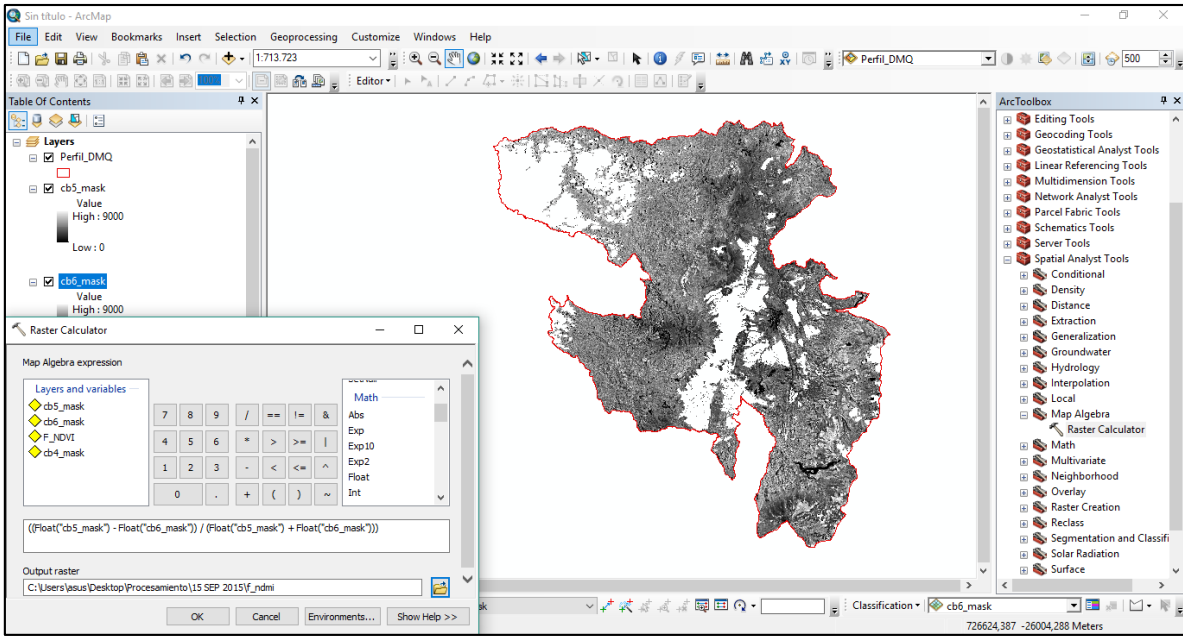
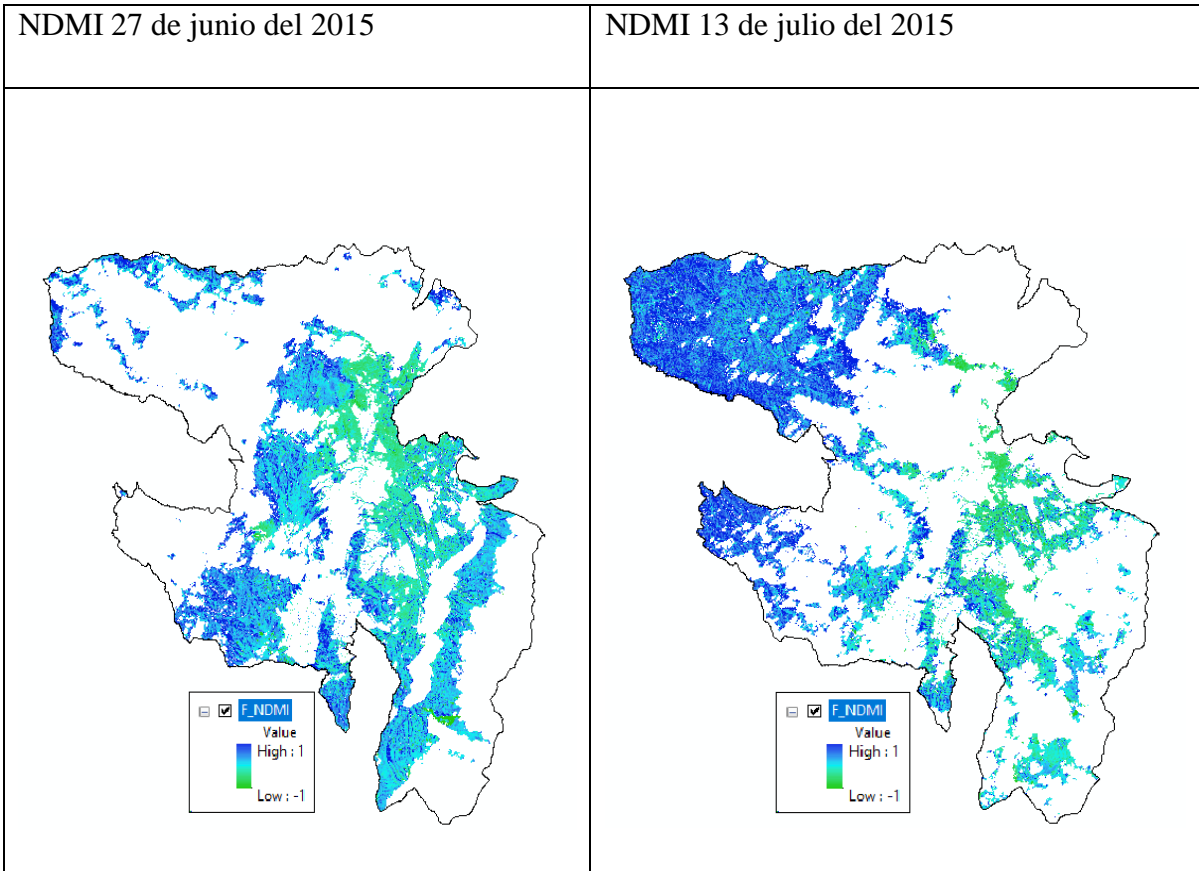
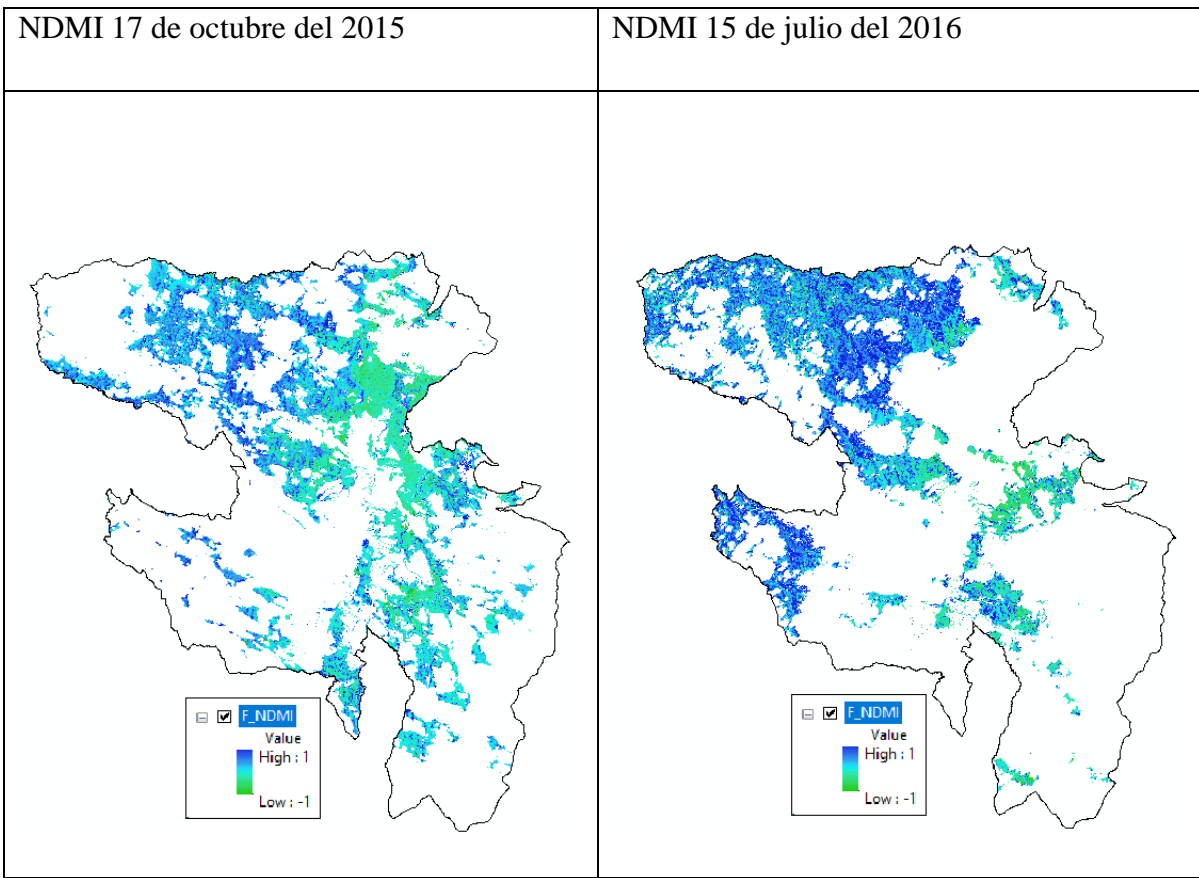
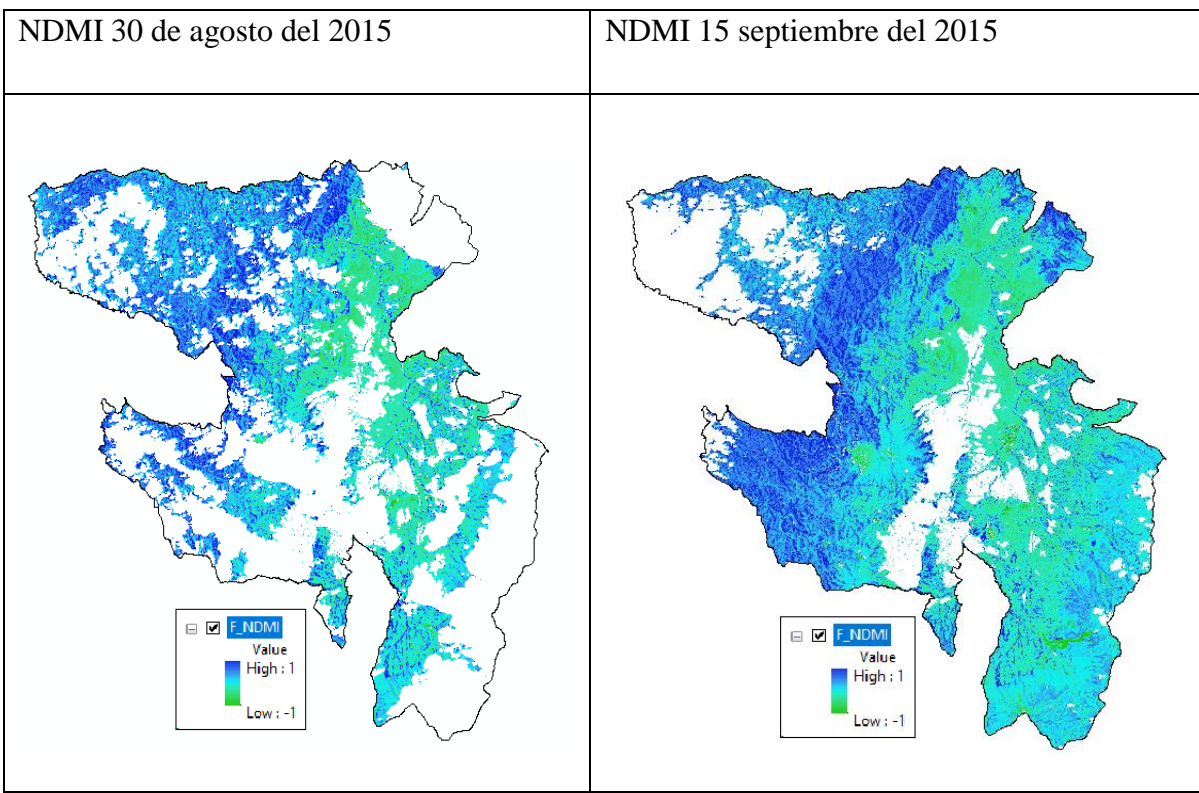


Figura 25: Cálculo del NDMI





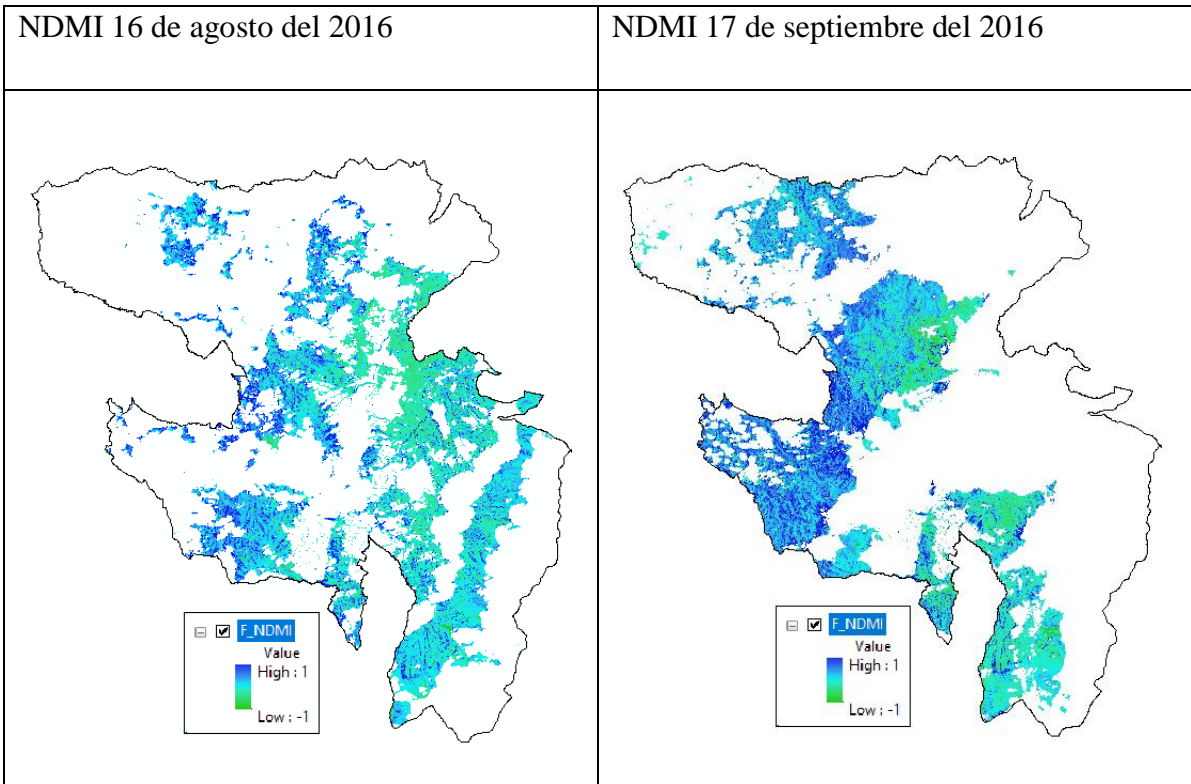


Figura 26: Resultados del cálculo del NDMI

4.3.3 Cálculo del índice RGRE (Normalización del NDVI)

En el presente estudio se consideró el cálculo del índice RGRE o también conocido como la normalización del NDVI. Éste índice se deriva de los valores negativos, positivos y índice de la fecha obtenidos del mismo como lo explica la siguiente fórmula.

Fórmula: $RGRE = (NDVI_0 - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})$

Para este cálculo se consideró como valor mínimo 0,20 y como valor máximo 1, debido a que en estos rangos están representados los diferentes tipos de cobertura vegetal. La herramienta utilizada fue ArcToolBox/Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator.

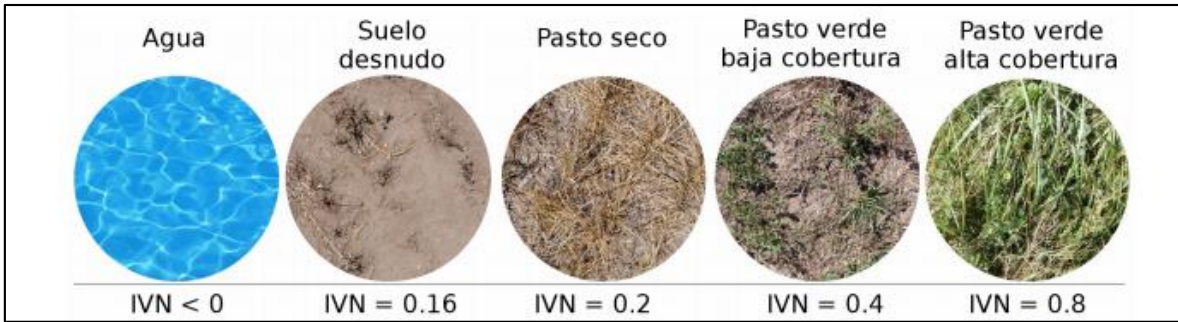


Figura 27: Valores de índice verde de distintos tipos de cobertura vegetal

Fuente: (Durante, 2016)

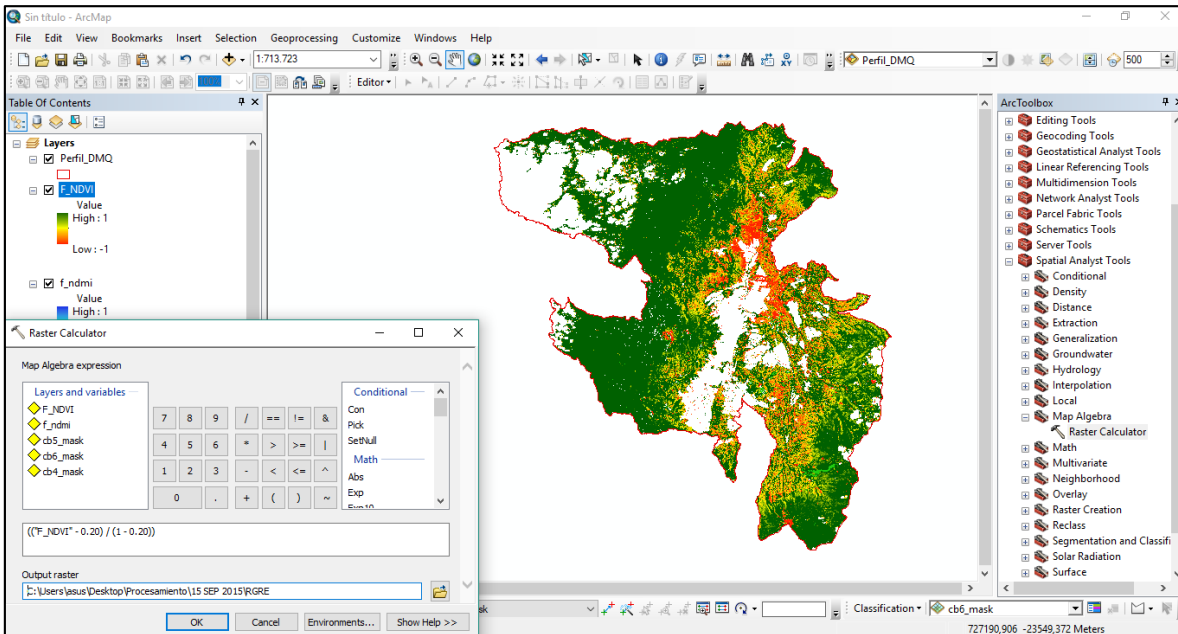
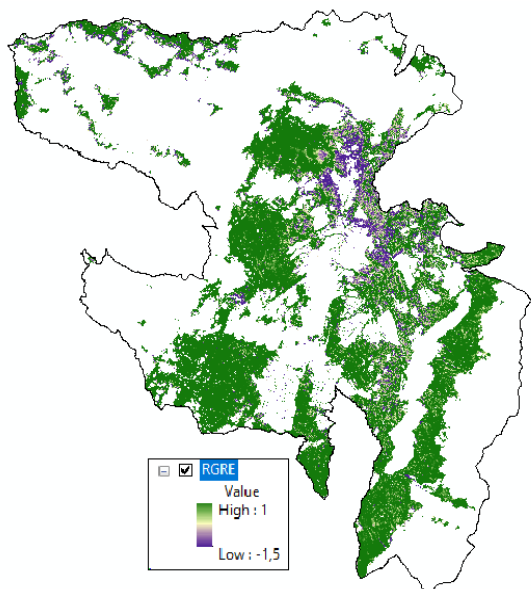
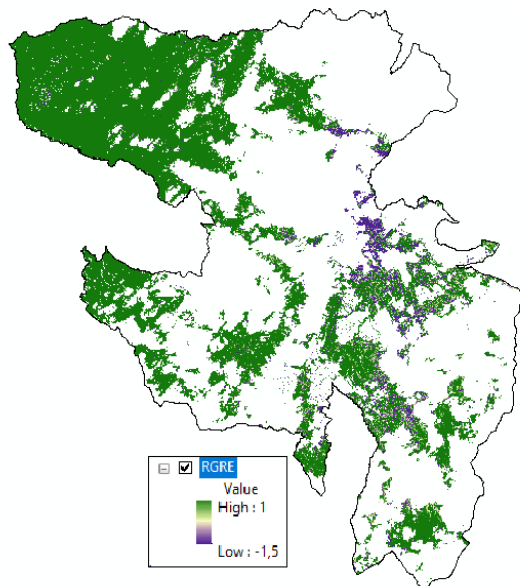


Figura 28: Cálculo del RGRE

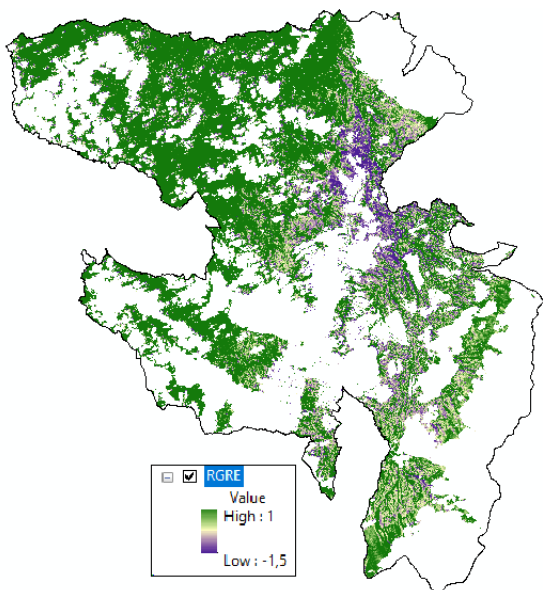
RGRE 27 de junio del 2015



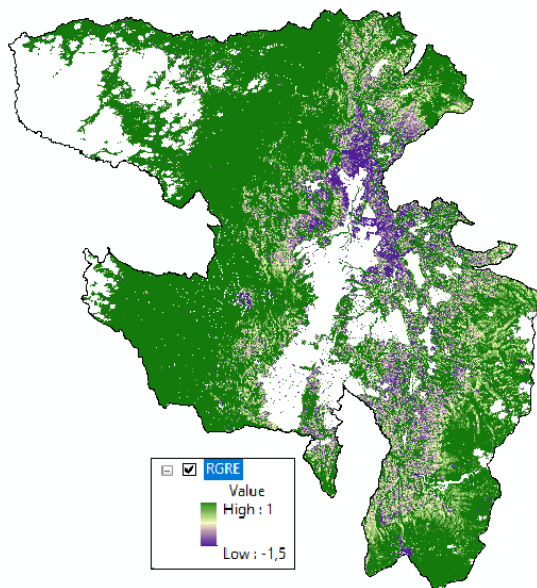
RGRE 13 de julio del 2015



RGRE 30 de agosto del 2015



RGRE 15 septiembre del 2015



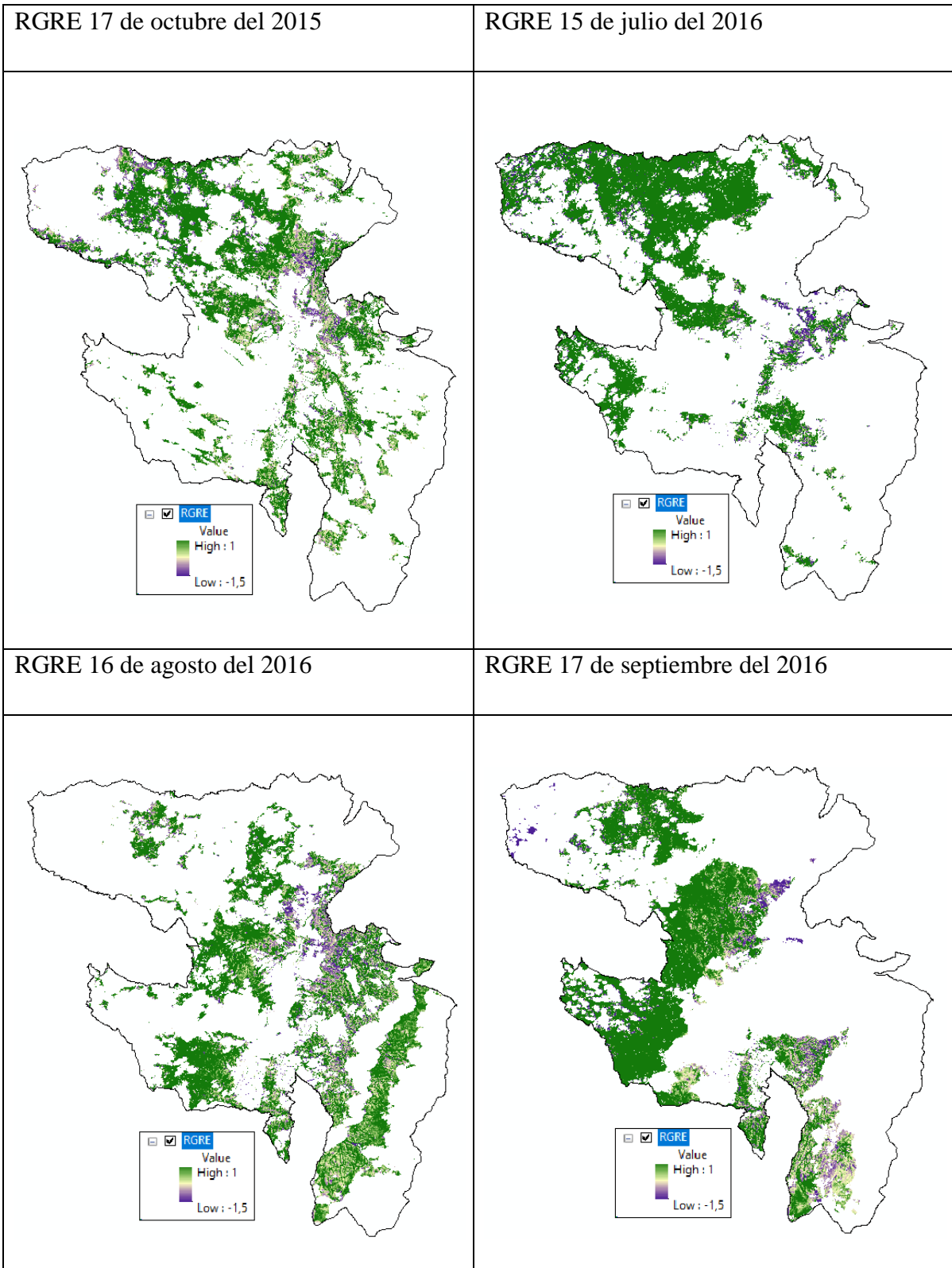


Figura 29: Resultados del cálculo del RGRE

4.3.4 Normalización del índice NDMI

Para la normalización del índice de humedad se utilizó la fórmula de la normalización y se realizó el siguiente cálculo mediante la herramienta ArcToolBox/Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator.

Fórmula:
$$\frac{X_o - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

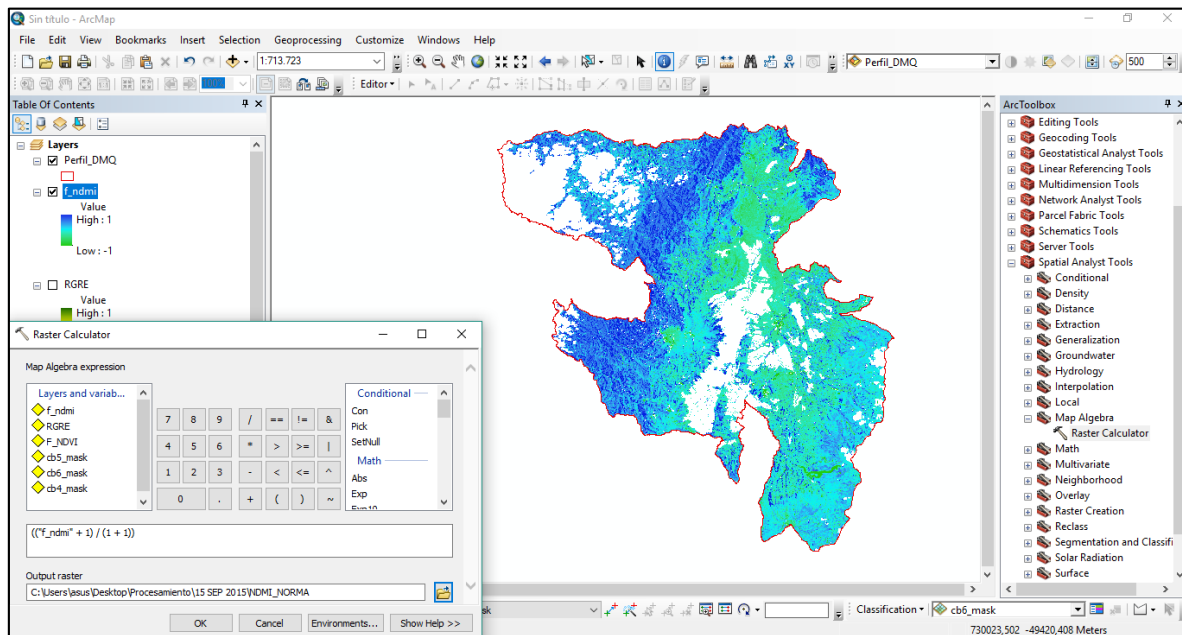
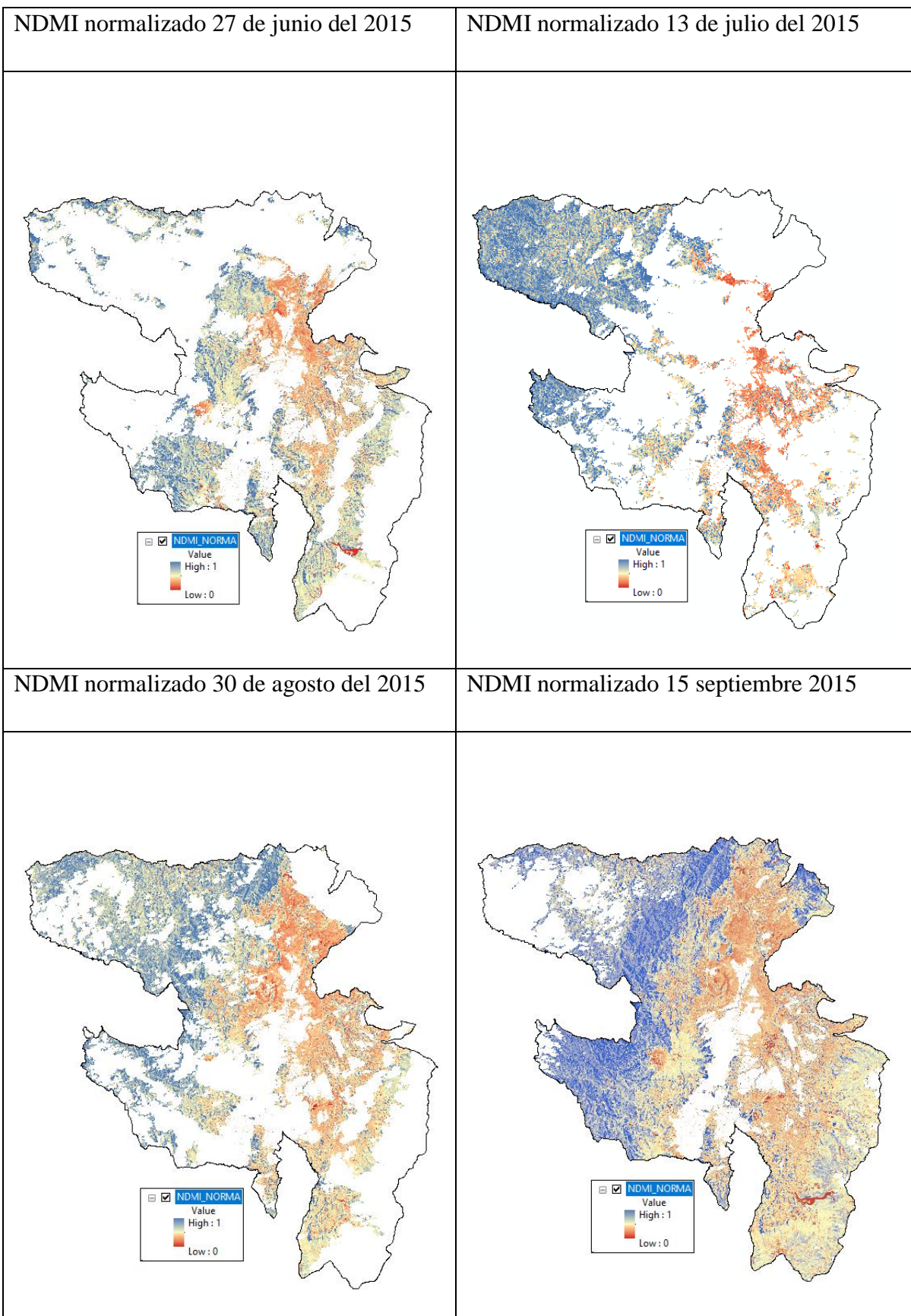


Figura 30: Normalización del NDMI



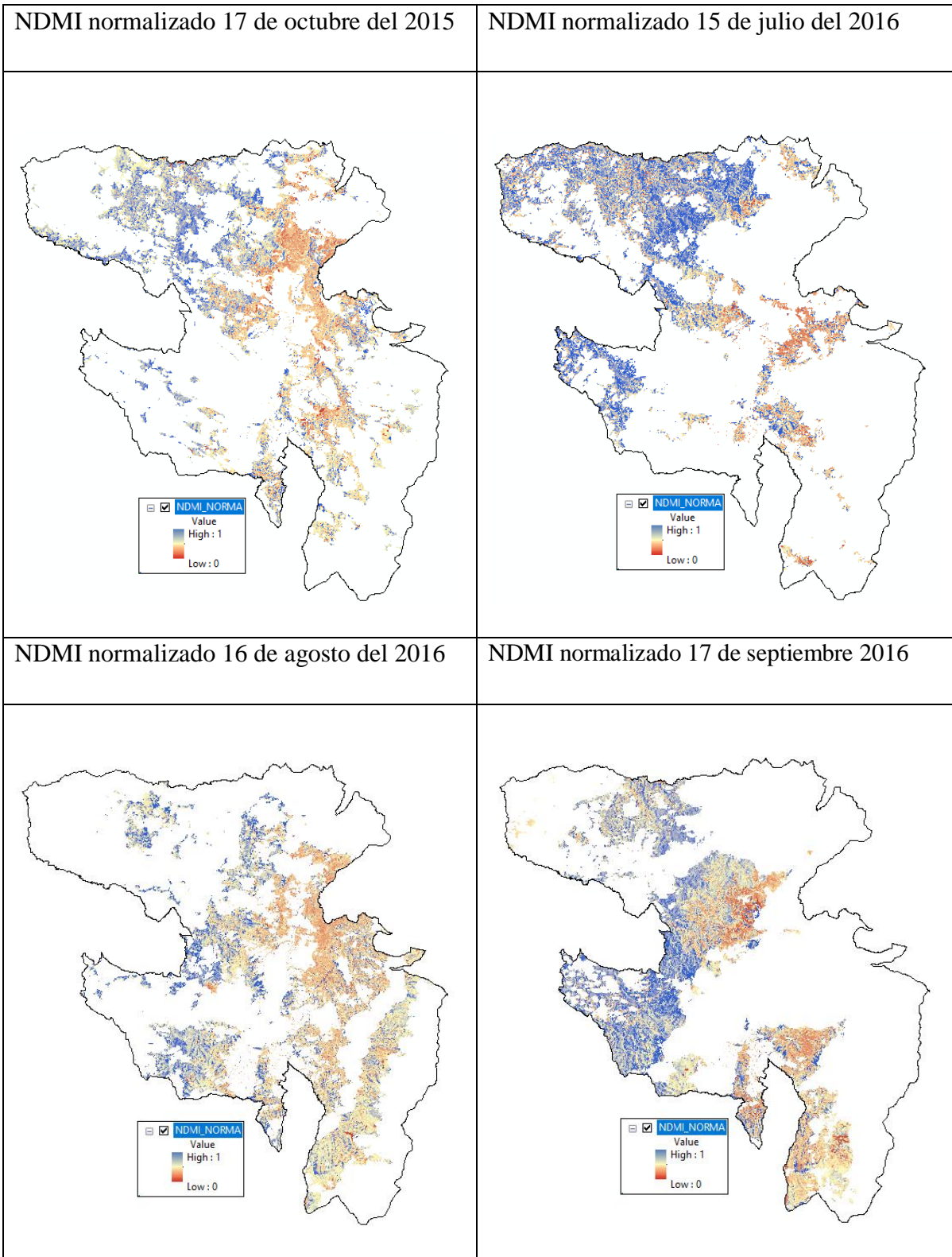


Figura 31: Resultados de la normalización del NDMI

4.3.5 Ponderación de los índices normalizados (RGRE y NDMI)

En este paso se procedió a ponderar los dos índices de la normalización resultante asignando un valor de 0,5 a cada uno, ya que se considera al estado de la vegetación y a la humedad existente en ella como dos factores de igual importancia. El cálculo de la ponderación se realizó mediante la herramienta ArcToolBox/Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator.

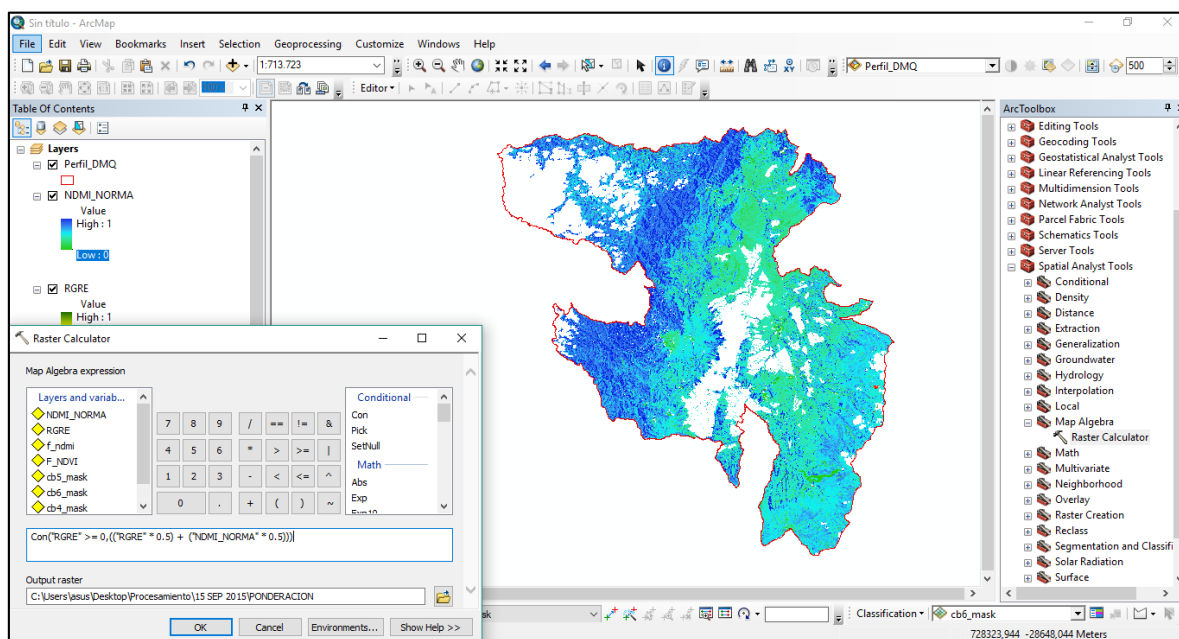
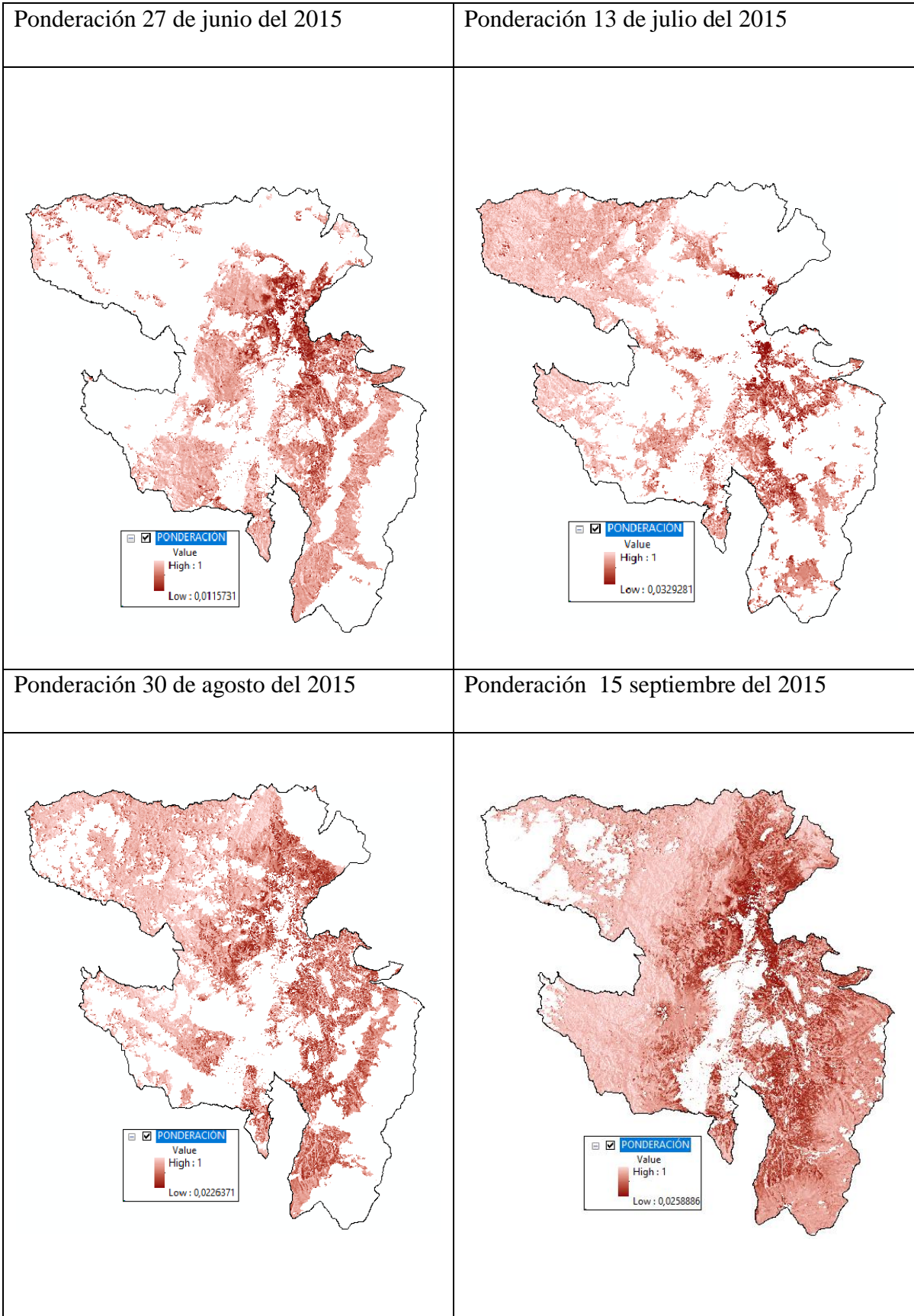


Figura 32: Cálculo de la ponderación de índices normalizados (RGRE y NDMI)



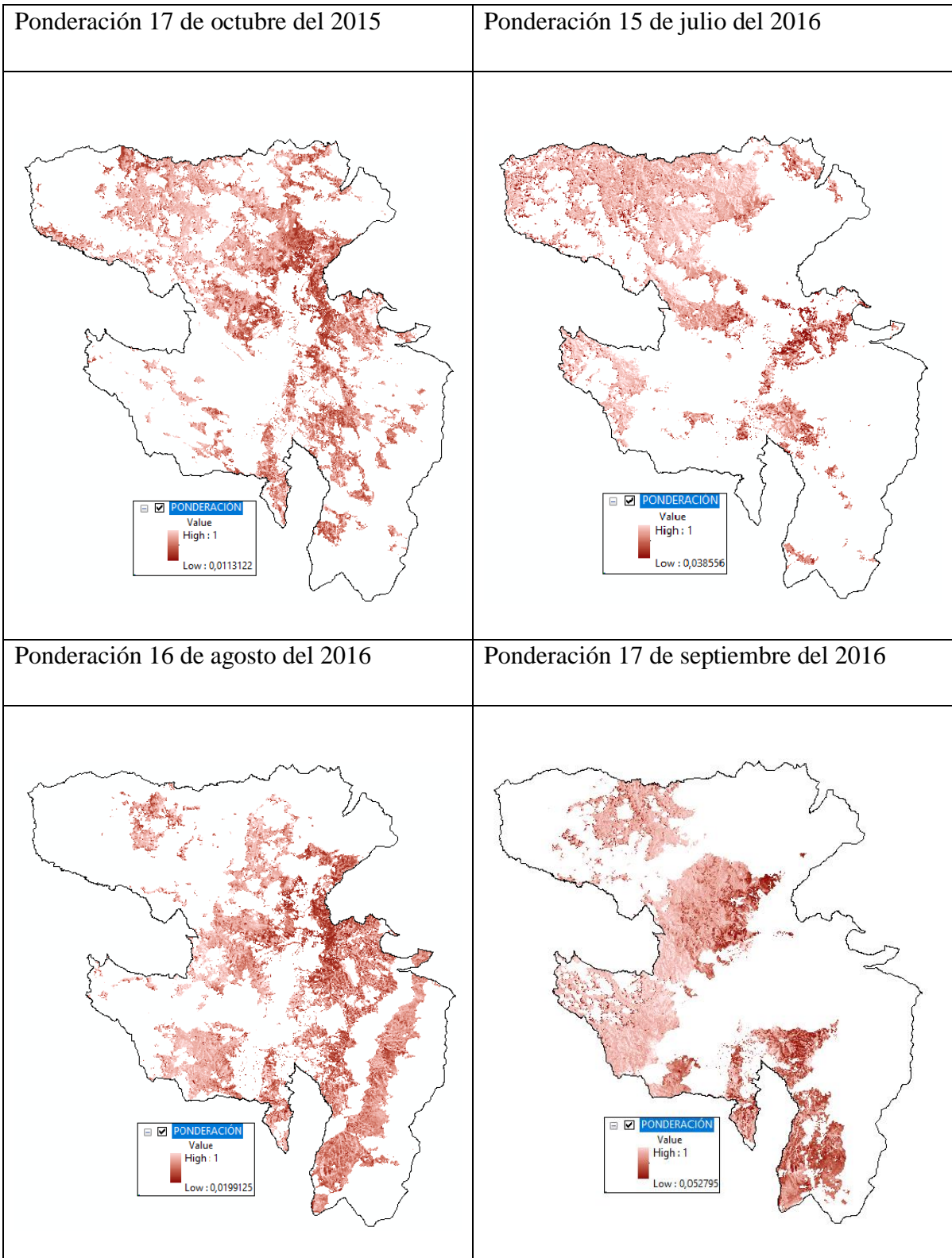


Figura 33: Resultados de la ponderación de índices normalizados

4.3.6 Reclasificación de la imagen ponderada

En el paso anterior se muestra el resultado de la ponderación, donde los valores del pixel tienen un rango que varía según la imagen. Mientras los valores se acercan a 1 la peligrosidad será menor debido a que se presentan condiciones de vegetación con alta humedad; por el contrario, cuando los valores se acercan a 0 las condiciones de humedad son bajas en la vegetación por lo tanto son más propensas a incendiarse.

Se requiere realizar una clasificación de la imagen que muestre con mayor claridad las áreas de peligro para establecer los rangos mediante la aplicación de la herramienta ArcToolBox/Spatial Analyst Tools//Reclass/Reclassify.

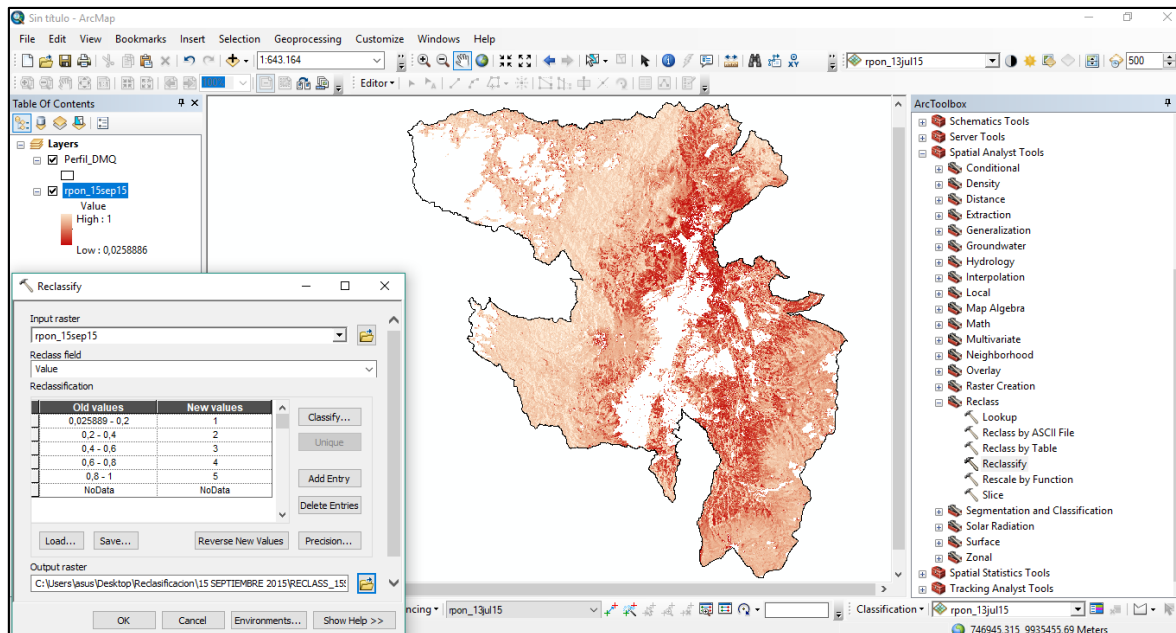
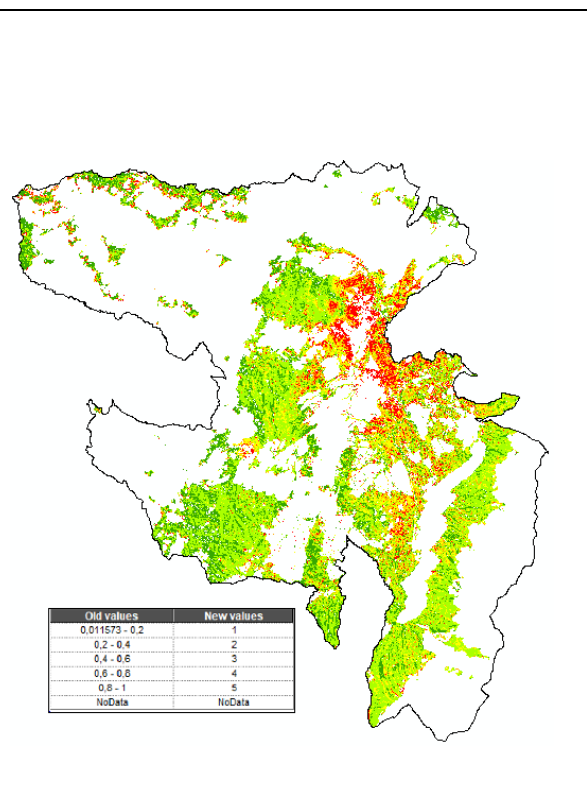
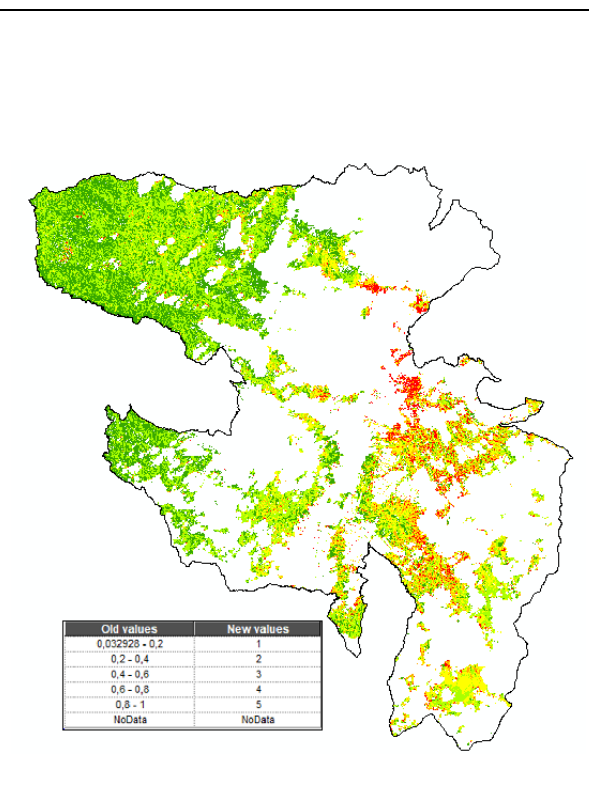


Figura 34: Reclasificación de la imagen ponderada

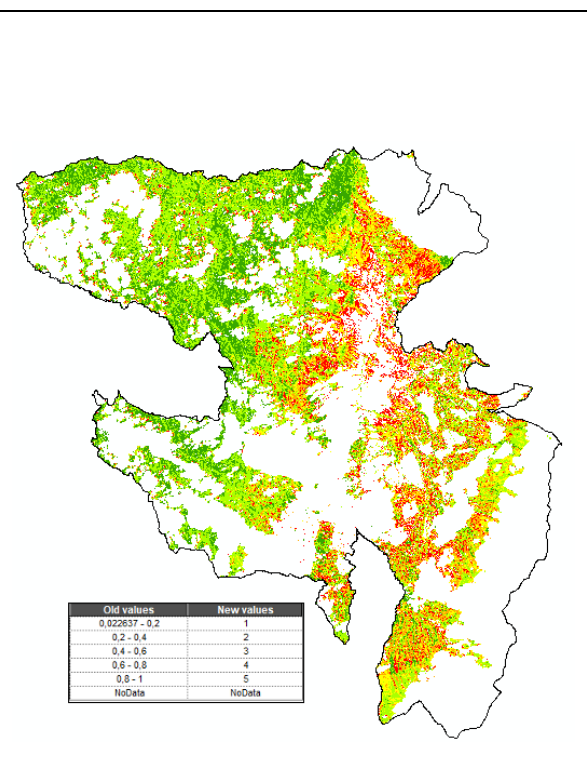
Reclasificación 27 de junio del 2015



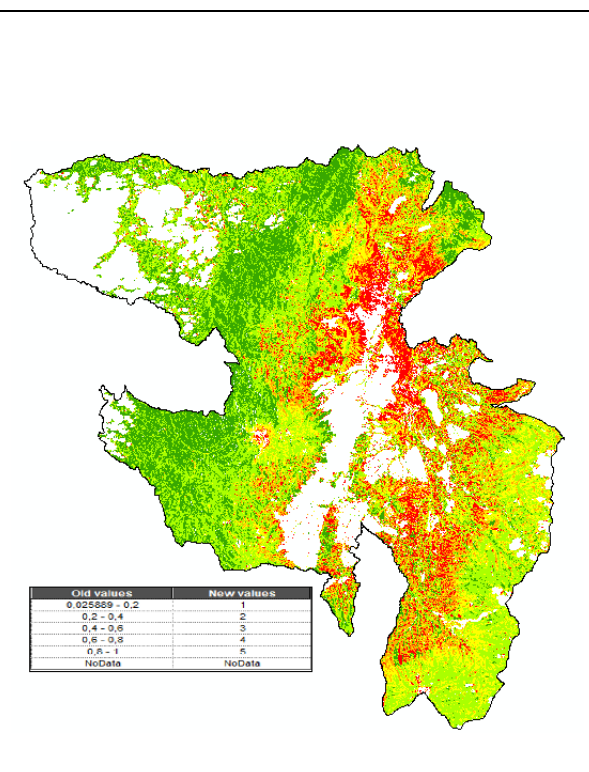
Reclasificación 13 de julio del 2015



Reclasificación 30 de agosto del 2015



Reclasificación 15 septiembre del 2015



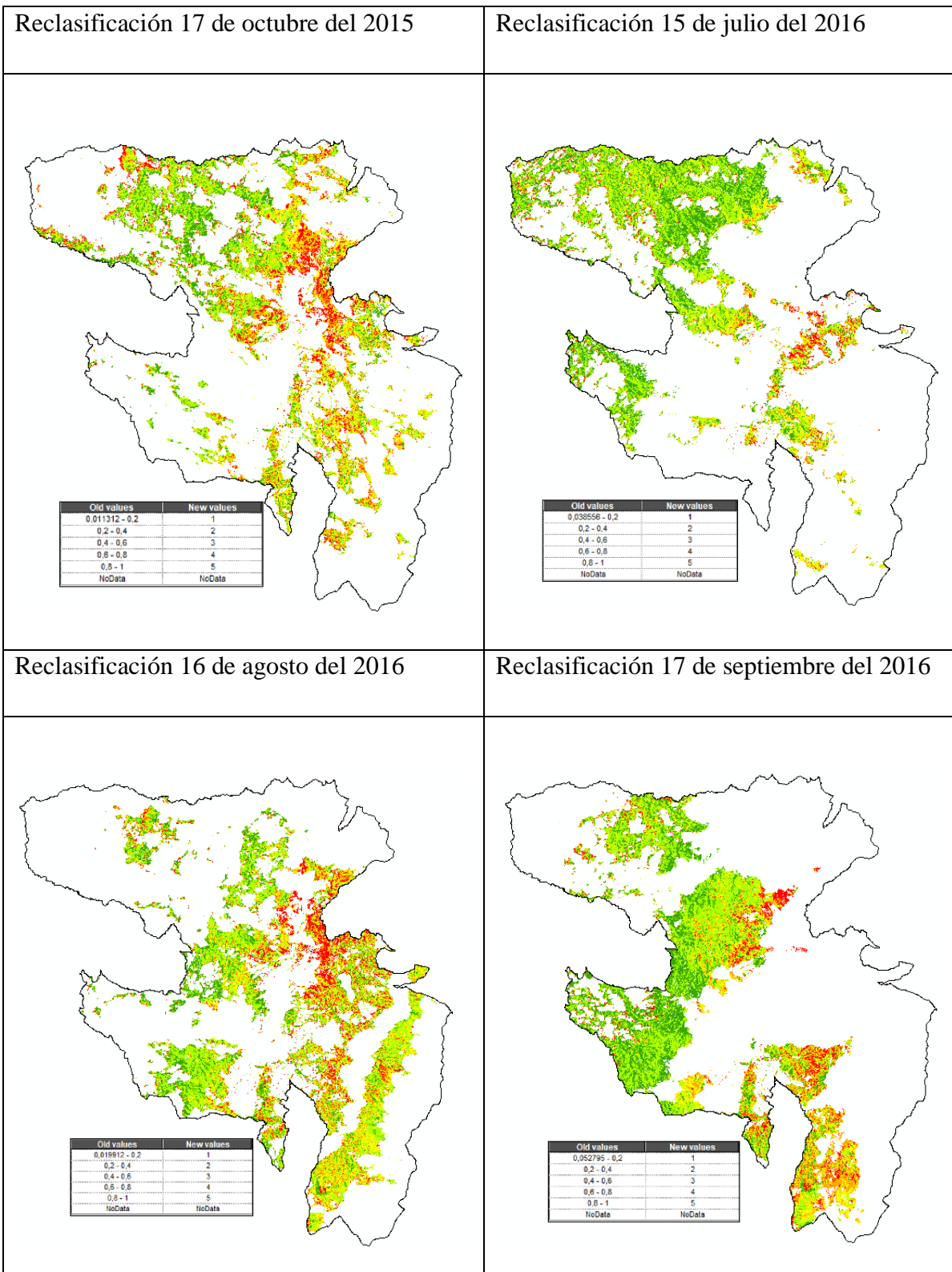


Figura 35: Resultados de la reclasificación de la imagen ponderada

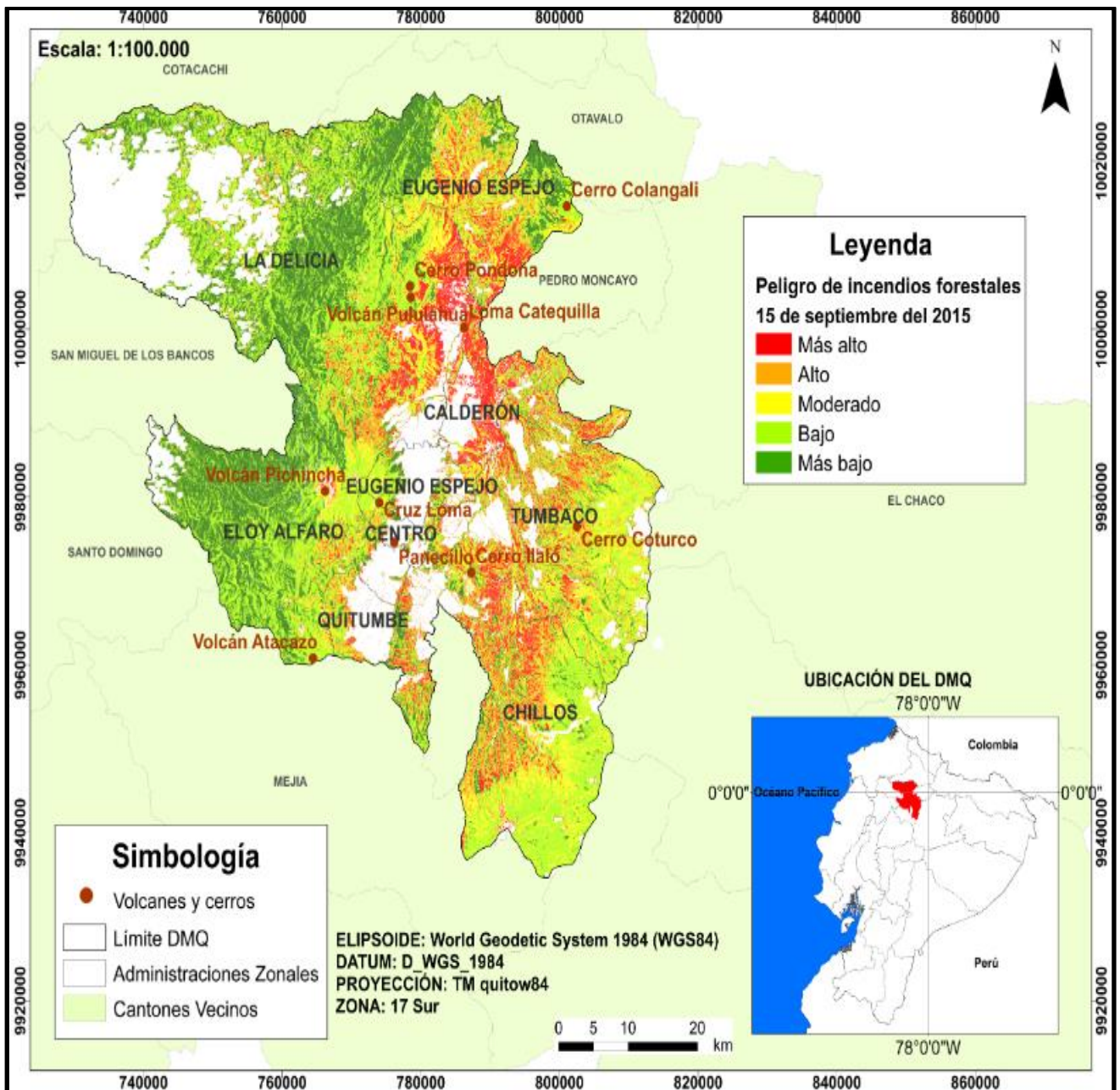


Figura 36: Peligro de Incendios forestales/15 de septiembre del 2015

4.4 CÁLCULO DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL PELIGRO DE INCENDIOS Y EL ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONNE

En este paso es necesario tomar en cuenta los resultados obtenidos del procesamiento de los datos de tipo vector y raster, es decir se tiene las imágenes reclasificadas con el peligro

de incendio y los resultados del cálculo del índice de aridez de Martonne. Con los dos resultados mencionados se realizó una máscara al índice de aridez de Martonne mediante la herramienta de ArcToolBox/ Spatial Analyst Tools/ Extraction/ Extract by Mask, con los 5 meses correspondientes al 2015, y 3 meses correspondientes al 2016 para obtener resultados con formas similares y aplicar la herramienta que permite determinación de la correlación de los rasters ubicada en ArcToolBox/ Spatial Analyst Tools/ Multivariate/Band Collection Statistics.

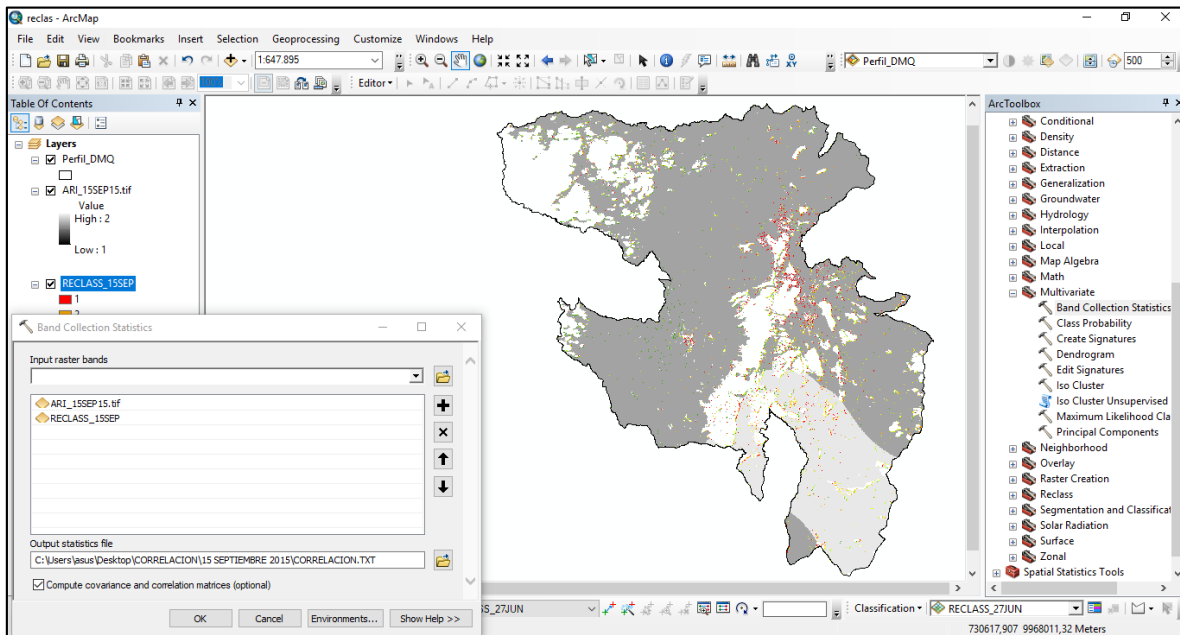


Figura 37: Correlación entre el peligro de incendio y el índice de aridez de Martonne

Como resultado de este proceso se crea una tabla de datos, la cual se procedió a abrir en el programa en el programa Bloc de notas para poder visualizar los resultados y de la correlación obtenida.

Tabla 5: Resultados de la correlación

Correlación 27 de junio del 2015	Correlación 13 de julio del 2015
<pre> correlacion: Bloc de notas Archivo Edición Formato Ver Ayuda # STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS # Layer MIN MAX MEAN STD # ----- # 1 1,0000 2,0000 1,2173 0,4124 # 2 1,0000 5,0000 3,5885 1,1831 # ----- # COVARIANCE MATRIX # Layer 1 2 # ----- # 1 0,35780 0,00605 # 2 0,00605 0,29442 # ----- # CORRELATION MATRIX # Layer 1 2 # ----- # 1 1,00000 0,38970 # 2 0,38970 1,00000 # ----- </pre>	<pre> c13jul: Bloc de notas Archivo Edición Formato Ver Ayuda # STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS # Layer MIN MAX MEAN STD # ----- # 1 1,0000 2,0000 1,1657 0,3718 # 2 0,0000 5,0000 3,8567 1,0925 # ----- # COVARIANCE MATRIX # Layer 1 2 # ----- # 1 0,02783 0,02062 # 2 0,02062 0,24039 # ----- # CORRELATION MATRIX # Layer 1 2 # ----- # 1 1,00000 0,25218 # 2 0,25218 1,00000 # ----- </pre>
<pre> correccion: Bloc de notas Archivo Edición Formato Ver Ayuda # STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS # Layer MIN MAX MEAN STD # ----- # 1 1,0000 2,0000 1,1318 0,3382 # 2 1,0000 5,0000 3,4866 1,2992 # ----- # COVARIANCE MATRIX # Layer 1 2 # ----- # 1 0,03012 0,02223 # 2 0,02223 0,44448 # ----- # CORRELATION MATRIX # Layer 1 2 # ----- # 1 1,00000 0,19213 # 2 0,19213 1,00000 # ----- </pre>	<pre> correlacion: Bloc de notas Archivo Edición Formato Ver Ayuda # STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS # Layer MIN MAX MEAN STD # ----- # 1 1,0000 2,0000 1,1845 0,3879 # 2 1,0000 5,0000 3,4940 1,2746 # ----- # COVARIANCE MATRIX # Layer 1 2 # ----- # 1 0,06140 0,03275 # 2 0,03275 0,66286 # ----- # CORRELATION MATRIX # Layer 1 2 # ----- # 1 1,00000 0,16233 # 2 0,16233 1,00000 # ----- </pre>

Correlación 17 de octubre del 2015

```

correlacion: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

#          STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS
# Layer    MIN      MAX      MEAN     STD
# -----
# 1         1,0000   2,0000   1,1620   0,3684
# 2         1,0000   5,0000   3,2335   1,3130
# -----
#          COVARIANCE MATRIX
# Layer    1         2
# -----
# 1         0,22236  0,00448
# 2         0,00448  0,28442
# -----
#          CORRELATION MATRIX
# Layer    1         2
# -----
# 1         1,00000  0,36180
# 2         0,36180  1,00000
# -----
    
```

Correlación 15 de julio del 2016

```

correlacion: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

#          STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS
# Layer    MIN      MAX      MEAN     STD
# -----
# 1         0,0259   1,0000   0,7451   0,2016
# 2         2,1068   7,0634   3,8386   1,0423
# -----
#          COVARIANCE MATRIX
# Layer    1         2
# -----
# 1         0,10659  0,00094
# 2         0,00094  0,45321
# -----
#          CORRELATION MATRIX
# Layer    1         2
# -----
# 1         1,00000  0,10960
# 2         0,10960  1,00000
# -----
    
```

Correlación 16 de agosto del 2016

```

correccion: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

#          STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS
# Layer    MIN      MAX      MEAN     STD
# -----
# 1         1,0000   2,0000   1,1318   0,3382
# 2         1,0000   5,0000   3,4866   1,2992
# -----
#          COVARIANCE MATRIX
# Layer    1         2
# -----
# 1         0,03012  0,02223
# 2         0,02223  0,44448
# -----
#          CORRELATION MATRIX
# Layer    1         2
# -----
# 1         1,00000  0,19213
# 2         0,19213  1,00000
# -----
    
```

Correlación 17 de septiembre del 2016

```

c17sep: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

#          STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS
# Layer    MIN      MAX      MEAN     STD
# -----
# 1         1,0000   2,0000   1,0003   0,0167
# 2         0,0528   1,0000   0,7866   0,1832
# -----
#          COVARIANCE MATRIX
# Layer    1         2
# -----
# 1         0,07305  0,02308
# 2         0,02308  0,05503
# -----
#          CORRELATION MATRIX
# Layer    1         2
# -----
# 1         1,00000  0,36871
# 2         0,36871  1,00000
# -----
    
```

CAPITULO V

5.1 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1.1 Análisis de la correlación entre el índice de aridez y el peligro de incendios forestales

La correlación entre los productos obtenidos de la determinación del peligro de incendios y el cálculo del índice de aridez de Martonne arrojaron resultados bajos. La mayor correlación fue de 0,38 correspondiente a la imagen del 27 de junio del 2015 y la menor correlación fue de 0,10 correspondiente a la imagen del 16 de agosto del 2016.

Al presentar vacíos de información especialmente en los datos mensuales de las variables de precipitación y temperatura de los años 2015 y 2016, los valores de la correlación pueden variar y llegar a ser bajos.

Otro factor que se debe considerar es la cantidad de estaciones meteorológicas con datos completos disponibles para el DMQ. Para este estudio se consideraron 9 estaciones ubicadas en el DMQ; al tener estos vacíos de información especialmente en la zona norte, se necesitó completar el proceso con estaciones externas, es decir estaciones de otros cantones he incluso de otras provincias consideradas distantes y con diferencias en su comportamiento climático en comparación al DMQ (estaciones de Esmeraldas y El Coca).

En el cálculo del índice de aridez de Martonne, influyeron los datos de precipitación y temperatura de las estaciones externas mencionadas anteriormente, por lo que, como resultado arrojaron la presencia de áreas áridas e hiperáridas según los valores establecidos para la interpretación de este índice. Estos resultados se deben a las condiciones de sequía de los meses incluidos para este estudio, es decir, los resultados pueden variar si se realiza el cálculo en meses con presencia de precipitaciones y humedad.

Para la determinación del peligro de incendios se procedió a extraer la nubosidad por lo tanto existieron varias imágenes, sobre todo las correspondientes a las fechas del 2016 que presentaron alta presencia de nubosidad especialmente los meses de julio y agosto; factor que afectó los resultados de las correlaciones siendo éstas últimas bastante bajas (0,10 y 0,19 respectivamente).

5.1.2 Análisis de resultados

En la identificación del peligro de incendios forestales relacionado con variables de vegetación y sequedad, se determinó que la presencia de la vegetación no es la única condición que puede generar un incendio debido a que los factores de sequía influyen fuertemente para que se produzca este fenómeno. Existen áreas con gran cobertura vegetal que se encuentran identificadas como baja peligrosidad a incendiarse debido a que sus condiciones de humedad son altas, sin embargo, se puede producir incendios causados por otros factores como quemas agrícolas.

Se consideran a las áreas con mayor peligro de incendios a las zonas con fuertes pendientes de los cerros y volcanes presentes en el DMQ, entre los principales son: Ilaló, Casitagua, Catequilla, Cruz Loma y Atacazo; además de considerar a las áreas pertenecientes a las laderas del Pichincha, estribaciones orientales, zonas del centro-norte y zonas del límite sur oriental del DMQ. Estas zonas tienen una fuerte presencia de vegetación que es propensa a secarse, además de tener una influencia antrópica con zonas de expansión urbana y zonas agrícolas.

Los periodos con mayor peligro de incendios forestales son los meses de julio, agosto y septiembre, debido a que la ausencia o presencia mínima de precipitaciones y el aumento de la temperatura, altera las condiciones de la vegetación. Según los resultados obtenidos, las áreas con mayor vegetación seca son predominantes en el año 2015 en comparación al 2016, consecuentemente existieron mayores afectaciones y daños por la cantidad de incendios producidos en el año 2015. Al comparar los resultados de las imágenes del 27 de junio al 15 de septiembre del 2015 se puede evidenciar como las áreas con vegetación seca presentan un considerable aumento influyendo con la aparición de incendios forestales.

Los procesos realizados para la determinación del peligro de incendios presentan mejores resultados en las imágenes del 30 de agosto y 15 de septiembre debido a una mínima presencia de nubosidad y la facilidad de discriminación de áreas vegetales.

5.1.3 Identificación de áreas de peligros de incendios forestales

Los procesamientos resultantes de las imágenes de los años 2015 (junio, julio, agosto, septiembre y octubre) y 2016 (julio, agosto y septiembre); considerados como los meses en los que se presenciaron la mayor cantidad de incendios forestales, muestran los cambios en la cobertura vegetal y la presencia de humedad los cuales se pueden ver reflejados en los índices espectrales calculados (NDVI y NDMI).

Al realizar el cálculo de los índices espectrales y hacer una comparación de los resultados se pueden considerar las áreas con mayor peligro a las laderas de volcanes y cerros del DMQ; así como también la zona suroriental en donde se presencia mayores áreas resacas. Las zonas en las que se mostró como áreas de bajo peligro son la parte noroccidental en la cual, a pesar de que existe una gran cobertura de vegetación, el estado de la misma se encuentra húmeda sin generar un mayor peligro. Sin embargo, se debe considerar la generación de incendios forestales causados por otros factores como quemas agrícolas o quemas de residuos de rastrojo.

El peligro de incendios forestales presenta una mayor variación entre el año 2015 y 2016, es decir el año 2015 se consideró como uno de los años con mayor presencia de incendios tanto como en magnitud y cantidad. Por el contrario, en el 2016 por el hecho de que el material combustible se redujo, los pastizales y vegetación propensa a incendiarse tuvo una presencia mínima.

5.2 RECOMENDACIONES

Para la obtención de resultados con una mayor precisión es necesario incluir estaciones meteorológicas que completen la cobertura de los datos de precipitación y temperatura en zonas del noroccidente, nororiente y norte centro del DMQ, con el fin de conseguir datos más confiables al momento de realizar los procesamientos y el cálculo de fórmulas como el índice de aridez de Martonne.

En la determinación del peligro de incendios forestales se consideró únicamente dos variables meteorológicas (precipitación y temperatura) y variables físicas (estado de la

vegetación). Para complementar este estudio se puede hacer uso de otras variables e incluir datos de radiación, velocidad del viento y la topografía del terreno a analizar.

Se recomienda utilizar información actualizada y pertinente a los años de estudio, especialmente la información que se va a incluir en el procesamiento de imágenes satelitales. En referencia a la cobertura del plan de uso y ocupación del suelo, en el caso de este estudio, se utilizó la última actualización disponible realizada en abril del año 2010.

Uno de los mayores limitantes de este estudio fue la presencia de nubosidad en una gran parte de las imágenes, por lo que se recomienda escoger un periodo de estudio que pueda facilitar el procesamiento de las imágenes que no se vea condicionado por la cobertura de nubosidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Almarox, J. (Junio de 2003). Climatología aplicada al medio ambiente y agricultura. Madrid.
- Almorox, J. (Mayo de 2010). Climatología aplicada al medio ambiente y agricultura .
- Andrade, L., & Ríos, C. (Enero de 2014). Variabilidad climática y caudales mínimos en los Andes Ecuatorianos.
- Ayala C, F. (1998). Riesgos naturales. España .
- Bird, L., & Molinelli, J. (2001). Calentamiento global y sus consecuencias .
- Birot, Y. (2009). Convivir con los incendios forestales: Lo que nos revela la ciencia. *European Forest Institute*. España: European forest institute.
- Blanco, J., García, D., Castellnou, M., Molina, D., Grillo, F., & Pous, E. (2008). Manual de incendios forestales.
- Bomberos de Navarra . (Febrero de 2017). El fuego o combustión .
- Bonilla, R. (2001). Guía técnica en prevención y control de incendios forestales. Guatemala .
- Burgan, R. (1995). Use of remotely sensed data for fire danger estimation .
- Campbell , J. (2007). Introduction to remote sensin.
- Campo Velásquez, J. M. (Febrero de 2012). Efectos de incendios experimentales repetidos en la agregación del suelo y su evolución temporal. Valencia.
- Carrega , P. (1991). A meteorological index of forest fire hazard in Mediterranean France.
- Carroll, M., Blatner, K., & Cohn, P. (2008). Memorias del segundo simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los programas de protección contra incendios forestales: Una visión global. Córdoba, España.
- CENAPRED. (2007). Incendios forestales. México.
- Cheney, N. (1991). Models used for fire danger ratings in Australia. Canberra.
- Chéret, V., & Denux, J. (2007). Mapping wildfire danger at regional scale with an index model integrating coarse spatial resolution remote sensing data.
- Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de Teledetección espacial*.
- Chuvieco, E. (2010). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde espacio . España.
- Chuvieco, E., & Martín, M. (2004). Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales. Madrid, España.

- Cloutis, E. (2015). Manual de Sensores Remotos: sensores remotos hiperespectrales para bosques. USA.
- COE-M. (2015). Informe de situación: plan de prevención y respuesta para incendios forestales del DMQ. Quito.
- COE-M. (2016). Informe de situación del plan de prevención y respuesta para incendios forestales del DMQ . Quito.
- Comisión nacional de actividades espaciales. (2015). Productos Satelitales: Detección de cambios. Argentina.
- CONAE. (2016). Índices espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 . USA.
- CONAF. (Diciembre de 2011). Manual con medidas para la prevención de incendios forestales.
- CONAFOR. (Diciembre de 2015). Fuego y biodiversidad .
- Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito. (2016). Informe de situación: Plan de prevención y respuesta a incendios forestales.
- Cuerpo de Bomberos del DMQ. (2015). Informe de gestión 2015. Quito.
- Cuerpo de Bomberos del DMQ. (2016). Informe de gestión 2016. Quito.
- Davies, S., & Unam, L. (1999). Smoke-haze from the 1997 Indonesia forest fires: effects on pollution levels, local climate, atmospheric CO₂ concentrations, and tree photosynthesis. *Forest ecology and management*, 137-144.
- Denham, M. (2009). Predicción de la evolución de los incendios forestales guiada dinámicamente por los datos. Barcelona.
- Diaz, A. (2004). Manejo de cuencas y gestión del riesgo a desastres naturales, en el área de la mancomunidad de los municipios del centro de Atlántida Honduras. Costa Rica.
- Durante, M. (Enero de 2016). Guía para la interpretación de los informes del estado de la vegetación de la provincia de Entre Ríos. Uruguay.
- Estacio, J., & Narváez, N. (10 de Enero de 2012). Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito: Conocimiento he intervención pública del riesgo. *Revista Letras Verdes*.
- FAO. (1986). Wildand fire management terminology. . Roma.
- FAO. (2001). Global forest fire assesment 1990-2000. Food and agriculture organization of the United Nations, forest resources. Rome.

- FAO. (2001). The global forest resources assessment 2000. Roma.
- Fellmann, J., & Getis, A. (1999). Human Geography: Landscape of human activities.
- Fernández, A., Picolotti, R., Pellerano, M., & Epele, F. (2006). Manual del combatiente de incendios forestales. *Plan Nacional de manejo del fuego*. Argentina.
- FLACSO. (2011). Perspectivas del ambiente y cambio climático en el medio urbano . *ECCO Distrito Metropolitano de Quito*. Quito.
- Goldammer, J. P. (1995). Biomass burning and the atmosphere in: forests and global climate change: forests and the global carbon cycle conference.
- Goncalves , M., & Lourenco , L. (1990). Meteorological index of forest fires risk in the portuguese mainland territory.
- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales LANDSAT 7 EM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja. Ecuador.
- Hermann, G., Funiss, M., & Brookes, M. (2000). Forests roads synthess of scientific information . *Departament of agriculture forest service* .
- Instituto Forestal. (Diciembre de 2016). Cartografía de riesgo de incendios forestales. Chile.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi . (2013). Descripción y corrección de productos Landsat 8 . Bogotá, Colombia .
- Julio Alvear, G. (Abril de 2004). Gestión de Protección contra los Incendios Forestales en América del Sur. Córdoba.
- La República. (12 de Julio de 2017). *Ecuador lanza campaña contra incendios forestales por la llegada del verano* . Obtenido de <https://www.larepublica.ec/blog/sociedad/2017/07/12/ecuador-lanza-campana-contra-los-incendios-forestales-por-llegada-del-verano/>
- Lawson, B. (1977). Fire weather index - the basis for fire danger rating in British Columbia. Columbia.
- Lentile, L., Holden, Z., Smith, A., Falkowski, M., & Hudak, A. (2006). Remote sensing techniques to asses active fire characteristics and post fire effects. Moscow.
- Lira, J. (2011). La percepción remota. México.
- Martínez Vega , J., & Martín , P. (2010). Teledetección y medio ambiente . *Red Nacional de Teledetección A,biental* .

- Martínez, J. (2001). Análisis de la distribución espacial de la ocurrencia de incendios forestales en España.
- Mavrakis, A., & Papavasileou, H. (2013). NDVI and E. Martonne indices in an environmentally stressed area . Greece.
- MECN. (2009). Ecosistemas del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). *Publicaciones del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales*. Quito, Ecuador.
- Mejía , M. (Julio de 2011). Guía: prevención y control de incendios forestales, para el Instituto Nacional de Educación Diversificada, de Cuilapa, Santa Rosa. Guatemala.
- Mercado, G., Troyo, E., & Aguirre, A. (Marzo de 2010). Calibración y aplicación del índice de aridez de Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zonas áridas.
- Ministerio de Ambiente de Panamá. (Diciembre de 2015). Metodología de investigación de causas que provocan lo incendios forestales . *Proyecto manejo integrado del fuego* . Panamá.
- Ministerio del Ambiente. (2017). Prevención y control de incendios una prioridad nacional. Obtenido de <http://www.ambiente.gob.ec/prevencion-y-control-de-incendios-una-prioridad-nacional/>
- Moreno, B., Castro, D., & Bretón , M. (2007). La mejora del mapa diario de riesgo de incendio forestal en Cataluña. Sevilla.
- Moscovich, F., Ivandic, F., & Besold, L. (19 de Septiembre de 2015). Manual de combate de incendios forestales y manejo de fuego.
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito . (Diciembre de 2011). Plan de Desarrollo 2012 - 2022. Quito.
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2005). Plan de gestión integral de la Biodiversidad. Quito.
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2006). Plan general de desarrollo territorial del DMQ. Quito, Ecuador: Dirección Metropolitana de ordenamiento territorial.
- Nasi, R., Dennis, R., Meijaard, E., Applegate, G., & Moore, P. (2001). Los incendios forestales y la diversidad biológica. Bogor, Indonesia: FAO.
- Navarro, A. (2003). Conceptos de causas de incendios forestales.

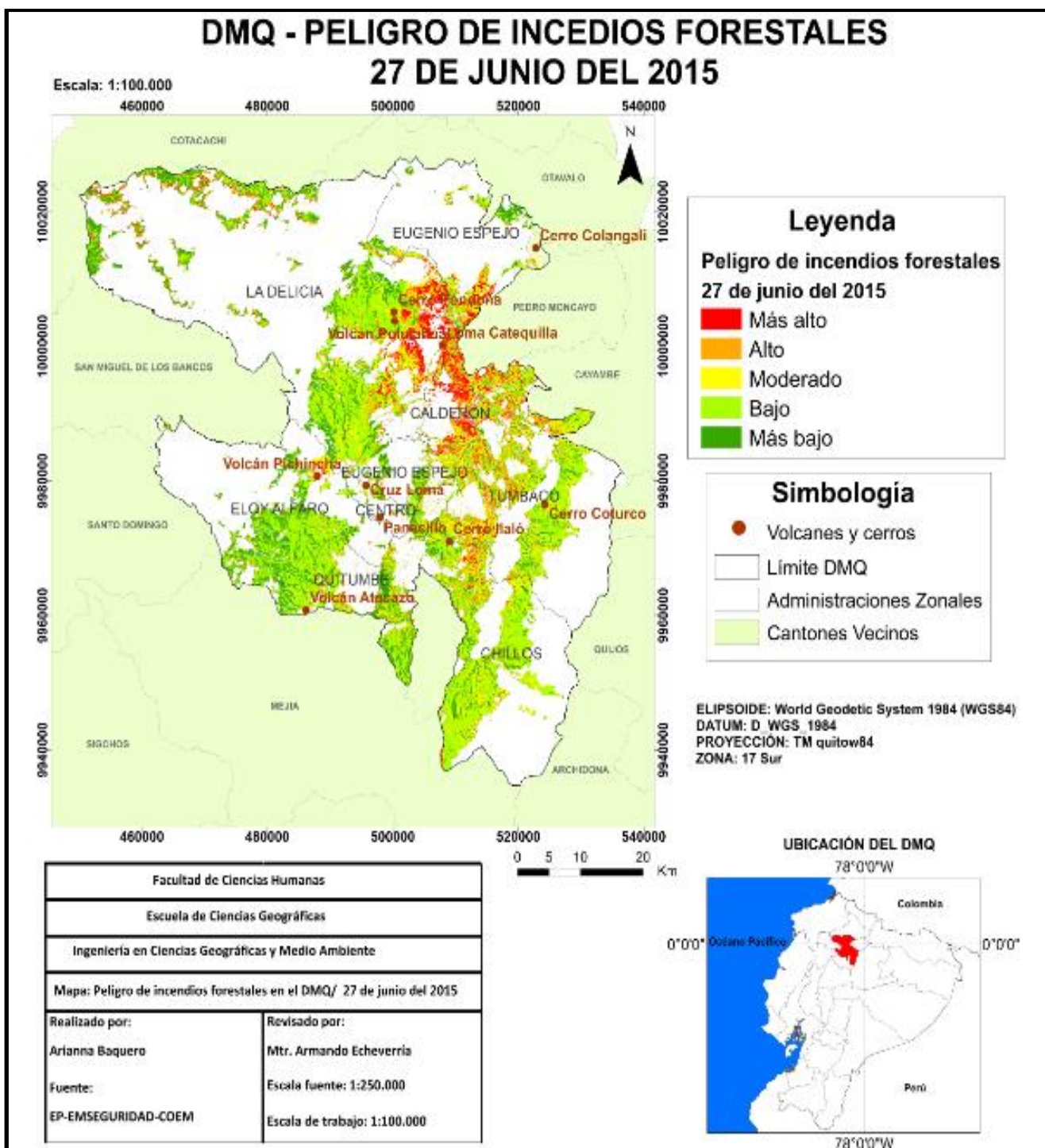
- Newnham, G., Verbesselt, J., Grant, I., & Anderson, S. (8 de Julio de 2010). A modified relative greenness approach for estimating the degree of curing in grasslands. Australia.
- ONU. (8 de Abril de 2016). Terminología principal relativa a la reducción del riesgo de desastres.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2003). El estado de los bosques del mundo.
- Pacheco, C., Balarezo, D., Revelo, N., & Ulloa, R. (2011). Áreas de protección ecológica del DMQ: Propuesta preliminar de conceptualización del programa de áreas de protección ecológica del DMQ. Quito, Ecuador: Secretaria de ambiente DMQ, Coservación internacional y EcoFondo.
- Pamieri, S., Inghilesi, R., Siani, A., & Martellacci, C. (1992). Un indice meteorologico di rischio per incendi boschivi.
- Pausas, J., & Bradstock, R. (2007). Fire persistence traits of plants along a productivity and disturbance gradient in mediterranean shrublands of south-east Australia. *Global ecology and biogeography*.
- Pérez, G., Márquez, M., Cortés, A., & Salmerón, M. (Febrero de 2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y bosques*. Durango.
- Plana, E., Font, M., & Serra, M. (Septiembre de 2016). Los incendios forestales, guía para comunicadores y periodistas. *Proyecto eFIRECOM Efficient fire risk communication for resilient societies*.
- Purkey, D., Baca, J., Estacio, J., Forni, L., Flores, F., Depsky, N., . . . Tehelen, K. (Febrero de 2014). Distrito Metropolitano de Quito: Resultados del análisis de vulnerabilidad climática para los sectores prioritarios.
- Quintero, S., & Gerardo, J. (2010). ¿Qué es la Geografía? Caracas, Venezuela.
- Rodriguez, M., Piñeiro, C., & De Llanos, P. (2013). Mapa de riesgos: identificación y gestión de riesgos. Coruña, España.
- Rothermel, R. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires.
- Ruiz Herrera, M., García Martínez, E., & Aguiar López, J. (2001). Proyecto de medio ambiente de la cruz roja Española en Elche. España.

- Saglam, B., Bilgili, E., & Durmaz, B. (Junio de 2008). Spatio temporal analisis of forest fire risk and danger using LANDSAT imagery.
- Salmerón , M. (Noviembre de 2012). Análisis espacial de los incendios y la recuperación de la nueva masa forestal en bosques de clima templado-frío. Durango.
- Schindele, W., Thoma, W., & Panzer, K. (1989). Investigation of the steps needed to rehabilitate the areas of east Kalimantan seriously affected by fire. Indonesia.
- Secretaría de Ambiente. (Septiembre de 2013). Fortalecer la gestión integral forestal en el DMQ, en el marco de las políticas y lineamientos estratégicos para la conservación y el desarrollo sostenible que se lidera desde la secretaría de ambiente.
- Secretaria de Ambiente. (2015). Conocimiento de la vulnerabilidad y posibles medidas de adaptación al cambio climático en el DMQ.
- Secretaría de Ambiente. (Julio de 2015). Conocimiento de la vulnerabilidad y posibles medidas de adaptación al cambio climático en el DMQ.
- Secretaría de ambiente del Distrito Metropolitano de Quito. (2011). Agenda ambiental de Quito 2011-2016.
- Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito. (2014). Indicadores de Ciudad Sostenible .
- Secretaria de Ambiente DMQ. (2011). Sistema de información Geográfica unificada de Gestión de Riesgos . Secretaria de Seguridad y Gobernabilidad .
- Secretaría de Gestión de Riesgos . (Octubre de 2017). Incendios Forestales .
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (21 de Octubre de 2015). Nueve amenazas que afectan al Ecuador .
- Secretaría de Gestión de Riesgos . (Agosto de 2017). Propuesta metodológica: Susceptibilidad a incendios forestales .
- Secretaría General de Seguridad. (2016). Atlas de amenazas naturales y exposición a infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito. *Tercera edición*. Quito.
- SNGRD. (2017). Terminología sobre la gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes. Bogotá.
- Strahler, A. (1979). Geografía Física.
- Torres Rojo, J., Magaña Torres, O., & Ramirez Fuentes, G. (2005). Índice de peligro de incendios forestales de largo plazo. Toluca, México.

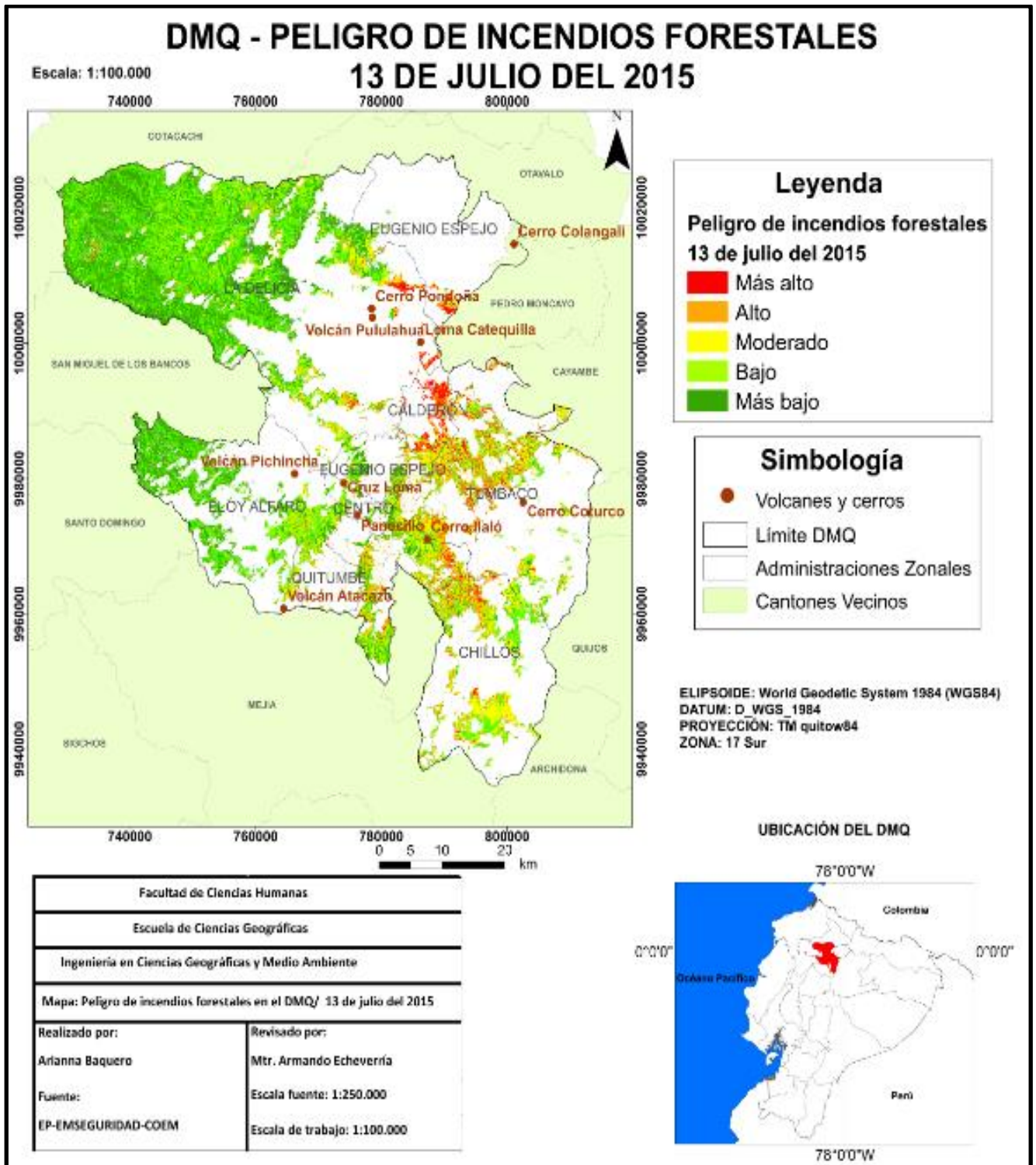
- Urquiza, M., Fernandez, A., & Pino, A. (Julio de 2010). El fuego: Uso e impacto en la esfera forestal.
- USDA. (Abril de 2008). Segundo Simposio Internacional sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global. Córdoba.
- USGS. (Diciembre de 2017). Landsat surface reflectance-derived spectral indices.
- Valdivieso, J. (Febrero de 2005). Propuesta para la gestión del suelo no urbanizable del DMQ. *Programa de saneamiento ambiental para el DMQ*.
- Vélez, R. (2000). La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. Madrid.
- Vila, A., Sedano, M., & Lopez, A. (Septiembre de 2014). Correlación lineal y análisis de regresión.
- Vlassova, L., Páez, F., Rodríguez, M., Montorio, R., & García, M. (2014). Analysis of the relationship between land surface temperature and wildfire severity in a series of Landsat images.
- Wagner, V. (1987). Development and structure of the Canadian forest fire weather index system. Ottawa.
- Woods, P. (1989). Effects of logging, drought and fire on structure and composition of tropical forests in Sabah, Malasia. 290-298.
- Yates, D., Purkey, D., Flores, F., Forni, L., Estacio, J., Depsky, N., . . . Tehelen, K. (Noviembre de 2013). Análisis integrado de amenazas relacionadas al cambio climático, aspectos naturales y socioeconómicos.
- Yépez, A., & Araúz, E. (2013). Incidencia de los riesgos naturales y antrópicos que ocasionan los incendios forestales, en el DMQ.
- Zárate, L. (Septiembre de 2017). Definición y clasificación de los incendios forestales: descripción del fenómeno.

ANEXOS

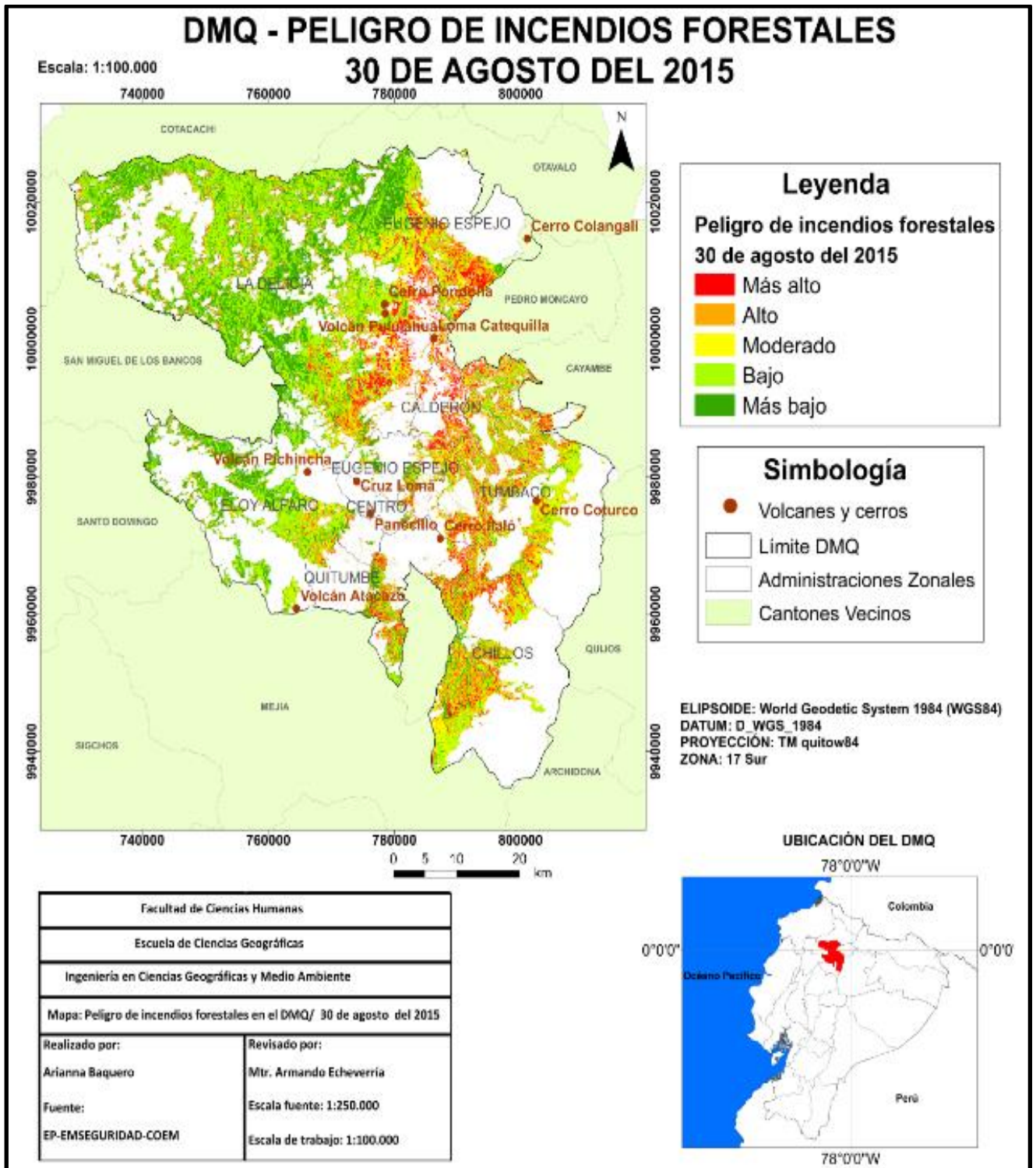
Mapa 4: DMQ-Peligro de Incendios forestales 27 de junio del 2015



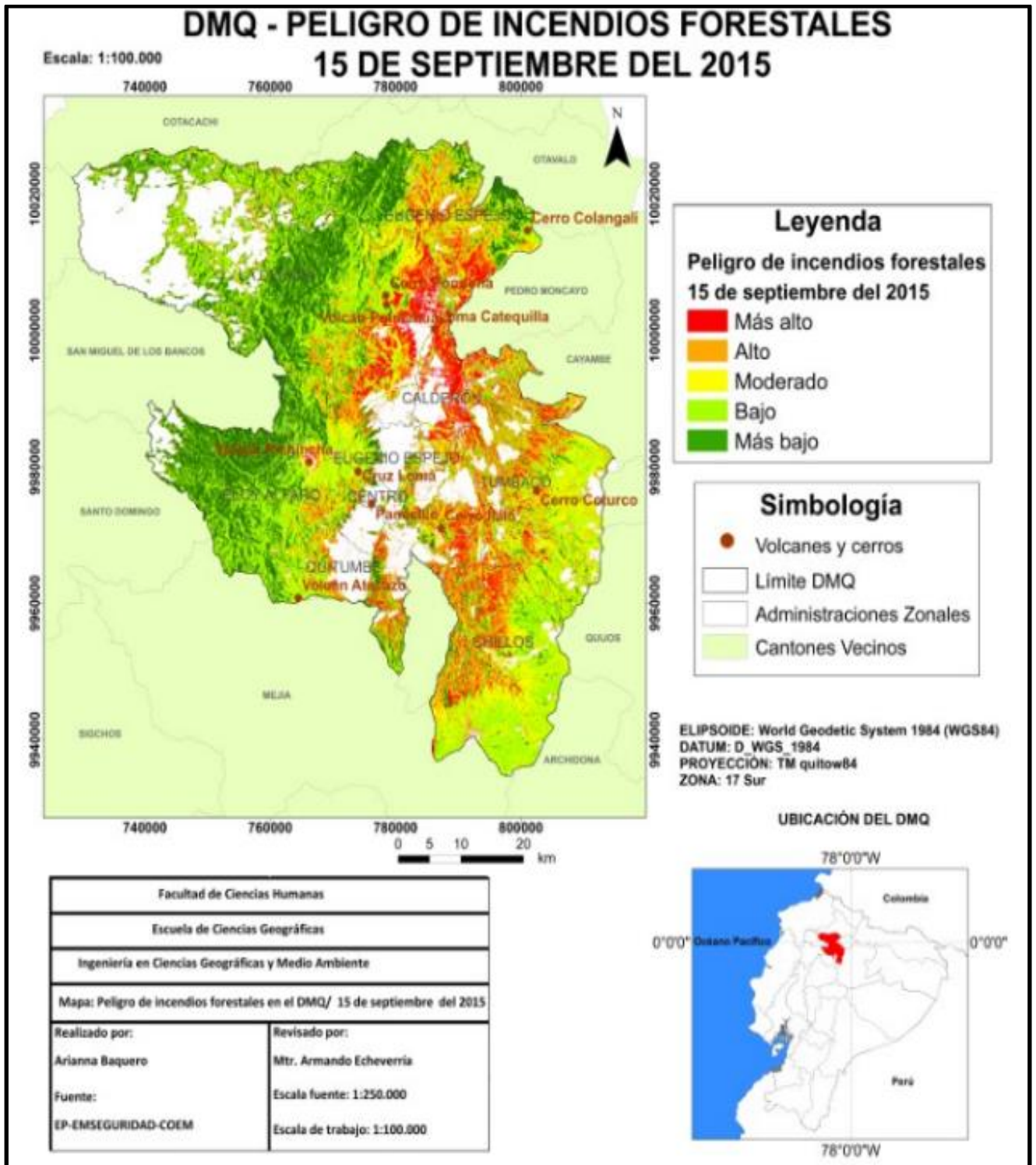
Mapa 5: DMQ-Peligro de Incendios forestales 13 de julio del 2015



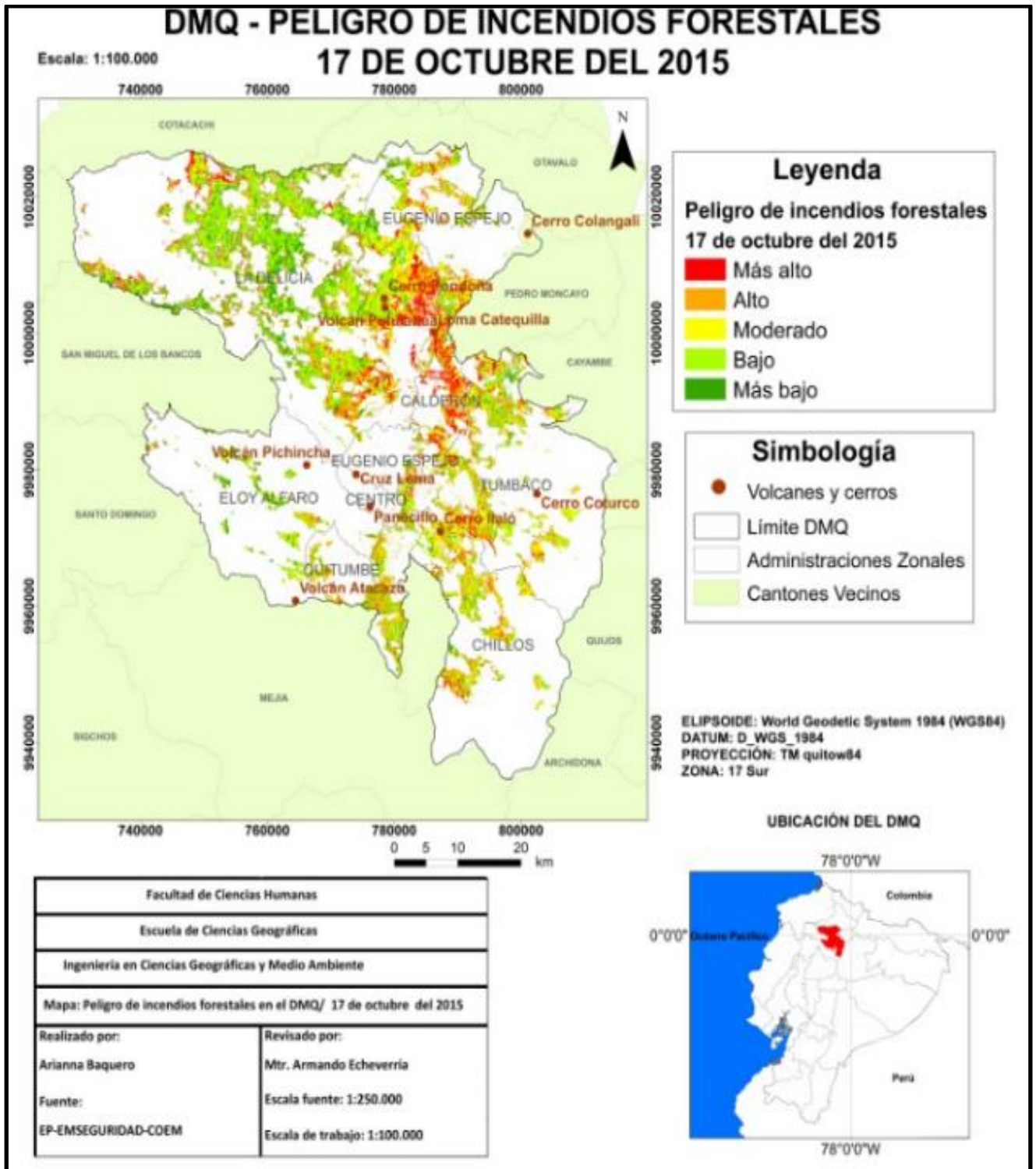
Mapa 6: DMQ-Peligro de Incendios forestales 30 de agosto del 2015



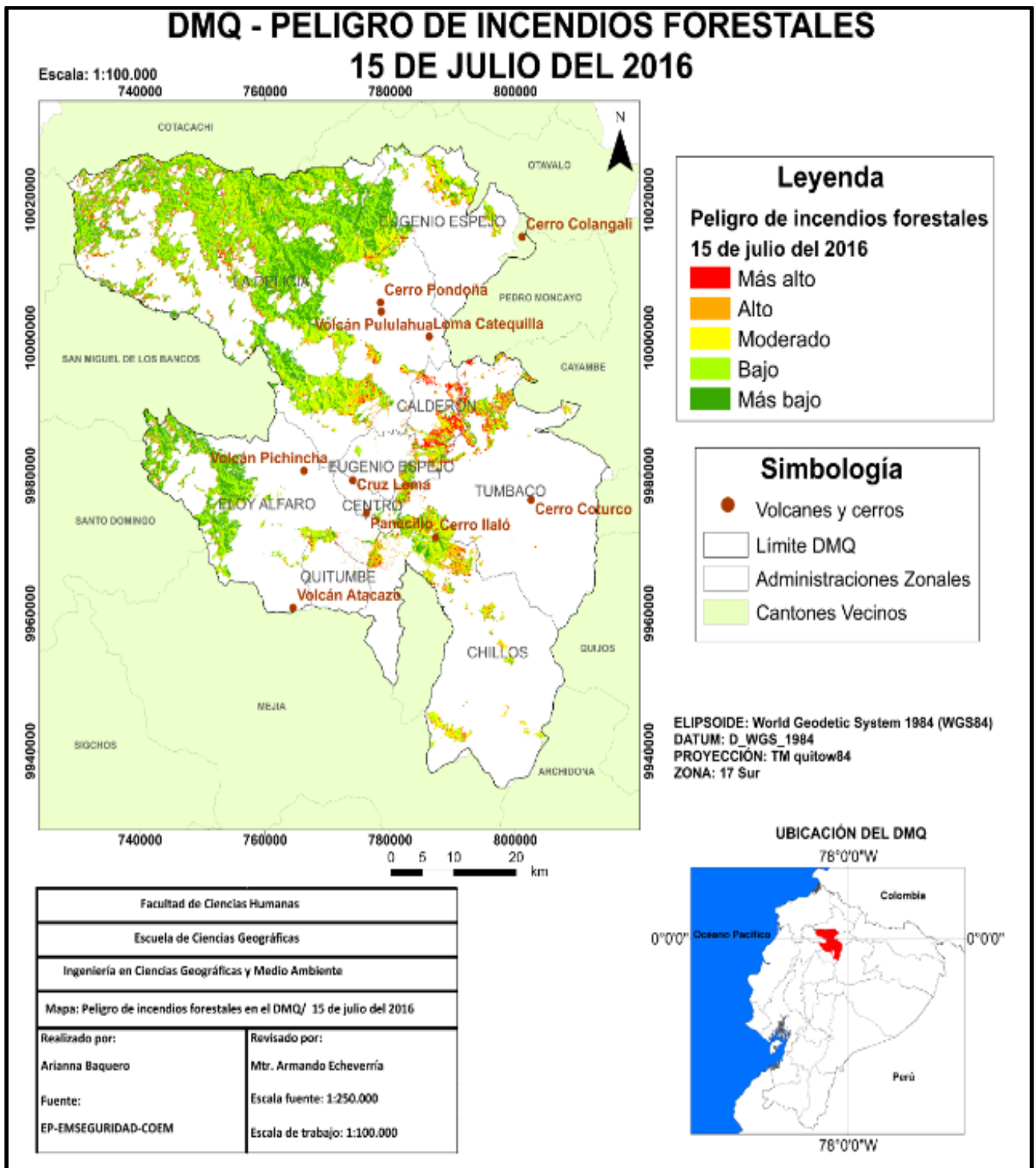
Mapa 7: DMQ-Peligro de Incendios forestales 15 de septiembre del 2015



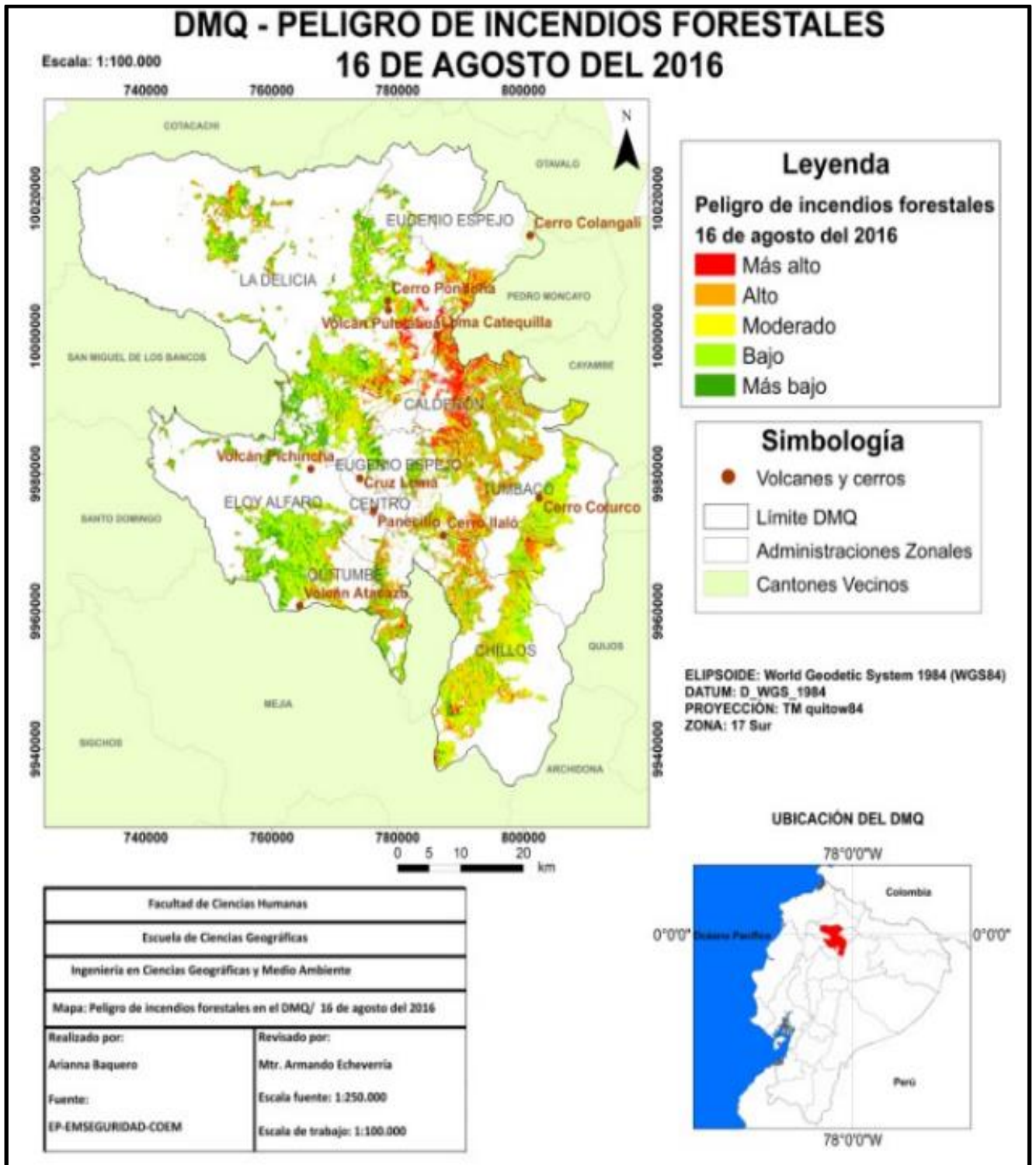
Mapa 8: DMQ-Peligro de Incendios forestales 17 de octubre del 2015



Mapa 9: DMQ-Peligro de Incendios forestales 15 de julio del 2016



Mapa 10: DMQ-Peligro de Incendios forestales 16 de agosto del 2016



Mapa 11: DMQ-Peligro de Incendios forestales 17 septiembre del 2016

