

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**



**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS FORESTALES EN LA  
CUENCA DEL RÍO PAUTE MEDIANTE SENSORES REMOTOS”**

Tesis de grado previo a la obtención  
del título de Ingeniera Ambiental

**AUTORA:**

MELISSA CAROLINA RODAS BUSTAMANTE

**DIRECTORA:**

ING. PRISCILA ALEXANDRA SAMANIEGO PLACENCIA, M SC.

**TUTOR:**

ING. VÍCTOR OMAR DELGADO INGA, M SC.

**CUENCA-ECUADOR**

**2015**



## Resumen

Debido al aumento de los incendios forestales en todo el país y a la gran importancia que tiene la cobertura vegetal de la cuenca del río Paute en la regulación de los ciclos hídricos, se realizó un análisis del comportamiento de las quemadas mediante el uso de sensores remotos. Para esto, se seleccionaron ortofotos del año 2010-2012 e imágenes satelitales Landsat 8 de los años 2013 y 2014 con el fin de identificar las zonas con mayor presencia de quemadas, luego se determinaron las variables que mostraron mayor asociación con la ocurrencia de los incendios, estas fueron: (1) valor de elevación más cercano, (2) distancia a la vía más cercana, (3) distancia a los ecosistemas intervenidos y (4) elevación promedio; sin embargo, no fueron suficientes para poder generar un modelo de predicción. Las quemadas detectadas comienzan a formar conglomerados a partir de los 20 Km y los sitios con mayor densidad de quemadas no presentaron similitud en cuanto a la dominancia de la cobertura vegetal. La superficie mínima de las áreas quemadas que se identificaron en este estudio es de 0.027Km<sup>2</sup> y la superficie total quemada en el período analizado fue de 21.38 Km<sup>2</sup>. Las áreas de bosque y vegetación protectora (ABVP) más afectadas fueron: (1) la parte norte de Moya-Molón, (2) noreste de Guarongo, (3) suroeste de Sunsun-Yanasacha, (4) Yanuncay-Irquis, (5) oeste de Machángara-Tomebamba, (6) noroeste de Allcuqui y (7) norte de Dudas-Mazar.

**Palabras clave:** Quemadas, imágenes satelitales, cuenca del río Paute.



## Abstract

Due to the increase in forest fires in Ecuador and to the great importance land cover has in the regulation of the hydrological cycles in the Paute River Basin, an analysis of the behavior of burned areas using remote sensing, was performed. For the intended purpose, ortho-photos corresponding to the year 2010-2011 were selected, as well as Landsat 8 satellite imagery for the 2013-2014 time period, with the purpose of identifying the places with the greatest presence of burned patches. Afterwards, the variables that were more significantly associated to the occurrence of forest fires were determined; these variables were: (1) the closest elevation value, (2) the distance to the closest road, (3), the distance to an intervened ecosystem, and (4) the average elevation value; nevertheless, these variables weren't sufficient for generating a prediction model. The distance at which clustering is more intense is 20 Km, and the sites with the greatest burn density did not present similar characteristics regarding vegetation cover dominance. The minimum surface area of the burned patches identified was 21.38 Km<sup>2</sup>. The most affected areas of forest and protective vegetation (ABVP) were: (1) the northern portion of Moya-Molón, (2) northeast of Guarongo, (3) southwest of Sunsun-Yanasacha, (4) Yanuncay-Irquis, (5) west of Machángara-Tomebamba, (6) northeast of Allcuquiro, and (7) north of Dudas-Mazar.

**Key words:** Burned areas, satellite imagery, Paute river basin.



## Índice de Contenido

Índice de Contenido .....	0
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>Capítulo I. ANTECEDENTES</b> .....	3
<b>Capítulo II. MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1 Incendios forestales .....	5
2.2 Factores humanos que facilitan la ignición y propagación del fuego.....	7
2.3 Factores climáticos y meteorológicos que facilitan la ignición y propagación del fuego .....	10
2.4 Factores topográficos que facilitan la ignición y propagación del fuego ....	12
2.5 Consecuencias de los incendios forestales .....	13
2.6 Sistemas de Información Geográfica y Sensores remotos para la valoración de riesgo de incendios forestales .....	15
2.7 Índices espectrales (NDVI, IAQ, NBR) .....	16
2.8 Análisis de datos espaciales.....	18
<b>Capítulo III. JUSTIFICACIÓN</b> .....	21
<b>Capítulo IV. OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b> .....	22
4.1 Objetivo General.....	22
4.2 Objetivos Específicos.....	22
4.3. Hipótesis .....	22
<b>Capítulo V. METODOLOGÍA</b> .....	23
5.1 Sitio de estudio .....	23
5.2 Obtención, selección y corrección de las imágenes satelitales y fotografía área .....	25
5.3 Identificación de las zonas quemadas mediante el cálculo de índices espectrales y clasificación las coberturas del suelo .....	27
5.4 Análisis del comportamiento de los incendios forestales en la cuenca del río Paute para facilitar la planificación y gestión del territorio .....	32
5.5 Resumen de la metodología: diagrama de flujo .....	34
<b>Capítulo VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	35
6.1 Imágenes satelitales y fotografía aérea seleccionada y corregida .....	35
6.2 Zonas quemadas identificadas y coberturas de suelo clasificadas .....	37
6.3 Comportamiento de los incendios forestales en la cuenca del río Paute .	43
<b>Capítulo VII. CONCLUSIONES</b> .....	45
<b>ANEXOS</b> .....	46
Anexo 1. Zona de estudio .....	46
Anexo 2. Centroides obtenidos de las quemas.....	49
Anexo 3. Datos entregados por el Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca .....	54
Anexo 4. Mapa y tabla de Quemadas detectadas en el Parque Nacional Cajas y zonas aledañas .....	55
Anexo 5. Centroides de quemadas detectadas en el 2013 por el Ministerio de Ambiente del Ecuador en el área de estudio.....	58
<b>BIBLIOGRAFÍA Y OTRA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA CITADA</b> .....	60



## Índice de Tablas

Tabla 1. Imágenes disponibles para el análisis -----	25
Tabla 2. Número de quemas y área total quemada en cada año -----	37
Tabla 3. Porcentajes de cada tipo de cobertura de suelo en las zonas con mayor densidad kernel-----	41
Tabla 4. Resúmenes de significancia y multicolinealidad de las variables determinadas-----	43

## Índice de figuras

Ilustración 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Paute-----	24
Ilustración 2. Mosaico de las ortofotos de SIGTIERRAS de la cuenca del río Paute (2010-2012, 1:0.30).-----	27
Ilustración 3. Ortofotos de la cuenca del río Paute. 2010-2012 -----	28
Ilustración 4. Centroides de las quemas identificadas en la cuenca del río Paute por años -----	30
Ilustración 5. Diagrama de flujo de la metodología empleada -----	34
Ilustración 6. Ortofotos de la cuenca del río Paute. 2010-2012.-----	35
Ilustración 7. Imagen Landsat 8. 2013. -----	36
Ilustración 8. Imagen Landsat 8. 2014. -----	36
Ilustración 9. Mapa de dos áreas quemadas que coinciden en los años 2013 y 2014 -----	38
Ilustración 10. Mapa de la tercera área quemada que coincide en los años 2013 y 2014 -----	39
Ilustración 11. Mapa de ubicación de las zonas de mayor densidad kernel en la cuenca del río Paute -----	40
Ilustración 12. Porcentaje de cada tipo de cobertura de suelo en las doce zonas de mayor densidad kernel -----	42
Ilustración 13. Mapa de residuales estándar -----	44



Cláusula de derechos de autor

Yo, Melissa Carolina Rodas Bustamante, autora de la tesis **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS FORESTALES EN LA CUENCA DEL RÍO PAUTE”**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, julio de 2015

Melissa Carolina Rodas Bustamante

C.I: 01046362

Universidad de Cuenca



Cláusula de propiedad intelectual

Yo, Melissa Carolina Rodas Bustamante, autora de la tesis "ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS FORESTALES EN LA CUENCA DEL RÍO PAUTE", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, julio de 2015

A handwritten signature in purple ink, reading "Melissa Rodas", written over a horizontal line.

**Melissa Carolina Rodas Bustamante**

C.I: 0104636204

Universidad de Cuenca



## ***Dedicatoria***

*A Dios y a la vida*

*A mi familia*





## Agradecimiento

Me gustaría agradecer a mi directora de tesis, Ingeniera Priscila Samaniego, quien me guió y brindó su ayuda en el transcurso del desarrollo de este proyecto y al Ingeniero Omar Delgado por haberme impartido su conocimiento.

Al Programa Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica SIGTIERRAS por haberme facilitado la fotografía aérea, al Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS de la Universidad de Cuenca por la apertura y brindada, al Ministerio de Ambiente del Ecuador, al Programa de biodiversidad Parque Nacional Cajas – ETAPA EP y al Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca por la información proporcionada.

A mis amigos, en especial a Alejandro, Guillermo y Seth por su apoyo incondicional.



## INTRODUCCIÓN

El análisis de los patrones espaciales y temporales de la ocurrencia de incendios forestales es muy importante para la conservación y el manejo ambiental de las áreas naturales (Villalobos y López, 2002; Castillo et al, 2003; Pérez-Verdín et al, 2013) como es el caso de las cuencas hidrográficas. Esto debido a que, conocer el comportamiento de las quemas en una determinada zona es indispensable para la formulación de políticas y estrategias que nos ayuden a prevenir y tratar este tipo de desastres (Castillo et al, 2003; Sadaña et al, 2014).

En Ecuador, a pesar de que en los últimos años aumentaron drásticamente el número de incendios forestales y el número de hectáreas afectadas -21570 ha. en el 2012- (Ministerio del Ambiente, 2012), son escasos los estudios sobre los patrones de ocurrencia de los Incendios forestales. Específicamente en la cuenca del río Paute –en los Andes sur del país- no existen este tipo de investigaciones. Por esa razón el presente proyecto se planteó como meta principal Identificar el comportamiento de los incendios forestales en la cuenca del río Paute mediante sensores remotos y sistemas de información geográfica.

Para cumplir con ello, primero se buscaron, seleccionaron y corrigieron las imágenes satelitales y fotografía aérea más adecuadas para este estudio. Después mediante el cálculo de índices espectrales se clasificaron los tipos de cobertura vegetal e identificaron las zonas quemadas. Y finalmente en función de los patrones obtenidos se describió el comportamiento de los incendios forestales en la cuenca de estudio.

Los resultados de este proyecto muestran en donde se localizan las áreas que concentran la mayor parte de los Incendios, el área total de superficie quemada y las variables analizadas que influyen en mayor medida en la ocurrencia de las quemas.

Universidad de Cuenca



Además los análisis de este estudio permiten sugerir en que partes de la cuenca es mejor realizar las principales actividades de monitoreo y control encaminadas a prevenir los incendios forestales.



## Capítulo I. ANTECEDENTES

La cuenca del río Paute tiene gran importancia a nivel nacional, contiene áreas protegidas, capta caudales de dieciocho subcuencas y representa el 35% de la generación eléctrica del país (Fondosdeagua.org, 2008). Sin embargo existen factores que degradan y aumentan la fragilidad de la cuenca, entre los cuales se encuentran: agricultura y ganadería, actividades mineras, quemas, urbanización, entre otros; siendo las quemas un factor de alta amenaza y que ha ido aumentando en las Áreas de Bosque y Vegetación Protectora (CGPaute, 2009).

En la cuenca del río Paute las quemas de la vegetación constituyen una práctica común entre la población rural y como consecuencia se produce erosión y empobrecimiento de los suelos así como reducción de la productividad de los mismos, sin embargo no se cuenta con un registro ni estadísticas del número de incendios forestales (CGPaute, 2009). Según Cabrera (2012), en los páramos del Ecuador, los incendios forestales se dan principalmente por la quema de pajonales para el pastoreo de ganado, mientras que en los bosques montanos se dan por la tala y limpieza de potreros con fines agropecuarios y de ampliación de la frontera agropecuaria, y en los agro-ecosistemas son provocados por la ampliación de la frontera agrícola, quema de malezas y residuos de cosechas.

Según los datos estadísticos proporcionados por el Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca (con temporalidad 2003-2013), los incendios forestales en el Azuay han ocurrido en mayor número entre los meses de agosto a octubre (ver anexo 3), existiendo en general un aumento significativo en la cantidad de emergencias por incendios forestales atendidas desde el 2003 hasta el 2013. La provincia del Azuay es la mayormente afectada, dándose la mayoría de las quemas durante los meses de verano (Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca, n.d.).



Para la preservación de los servicios ecosistémicos que prestan los páramos y bosques nativos, ciertas instituciones como ETAPA y el MAE realizan esfuerzos de conservación tales como la compra de predios con alto rendimiento hídrico, el apoyo para el ingreso al programa socio bosque (Etapa.net.ec, 2015), la imposición de multas y la realización de “eco talleres” con el fin de otorgar títulos de promotores ambientales comunitarios a pobladores capacitados del sector rural (Diario El Mercurio, 2014).

En el ámbito nacional se produce una gran cantidad de aclaramiento forestal, producto de las quemadas. Según el diario El Telégrafo (2013), en el año 2012 se vieron afectadas 14000 hectáreas de bosque en el país y según datos del Ministerio del Ambiente Ecuatoriano, los incendios forestales en Ecuador son casi en su totalidad causados por la actividad humana, siendo algunos de ellos incluso intencionales (Cabrera, 2012). El nuevo Código Orgánico Integral Penal (COIP) establece una sanción de cárcel de uno a tres años para las personas que provoquen incendios forestales, y si hay muerte la sanción sube es de 13 a 16 años (Diario El Mercurio, 2014). En Ecuador el sector de uso de suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura constituyen la fuente principal de gases de efecto invernadero (INGEI, 1994, citado en Viteri y Cordero, 2010), lo cual sugiere que estos factores contribuyen al calentamiento global.



## Capítulo II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Incendios forestales

El término “incendios forestales” o en inglés “wildland fire” es utilizado para describir incendios de la vegetación natural y generalmente se refieren a incendios no planificados, que fueron provocados, incendios accidentales o aquellos iniciados por relámpagos; son incendios que se encuentran fuera de control (Whelan, 1995). En la ignición intervienen tres elementos: calor, una adecuada proporción de oxígeno y combustible (Jensen y McPherson, 2008). Estudios realizados indican que la facilidad que tiene un combustible para quemarse está determinada por la composición química del combustible y su contenido de humedad (Ghobadi y Gholizadeh et al, 2012).

Se ha comprobado también que las quemas conllevan a una mayor velocidad del viento (Cochrane 2003; Laurence 2003, 2004; Fearnside y Laurence 2004, citados en Dull et al., 2010) debido a que los incendios dejan atrás bosques abiertos, lo cual facilita la desecación de la vegetación y al existir una mayor carga de biomasa, las especies se vuelven más propensas al fuego (Davies y Unam, 1999, citado en Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2001).

Las quemas amenazan a las especies, en muchos casos especies endémicas amenazadas o en peligro de extinción, provocan pérdida de la vegetación, deterioro de la calidad del suelo, pérdida de retención de agua en los páramos y pérdidas económicas. El humo y la niebla de los incendios producen los costos más visibles para la sociedad debido a los problemas de salud (respiratorios) que estos causan (Davies y Unam, 1999, citado en Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2001).



En América Latina, se espera que las áreas boscosas amplias sean mayormente afectadas por los incendios forestales como resultado de los cambios proyectados del clima (Davies y Unam, 1999, citado en Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2001). Se sabe que las quemas provocan grandes alteraciones del ecosistema tanto a nivel ecológico como paisajístico (Jensen y McPherson, 2008).



## 2.2 Factores humanos que facilitan la ignición y propagación del fuego

**2.2.1 Densidad poblacional rural y uso de la tierra.** La densidad poblacional rural y el uso de la tierra contribuyen en gran medida a la geografía del fuego en los trópicos (Cochrane y Schulze 1999; Cochrane 2003; Field, van der Werf, y Shen 2009, citado en Dull y Nevle et al., 2010) y por lo tanto a la geografía del flujo de carbón desde la biósfera a la atmósfera (Nevle et al., 2010). La ignición puede ser causada por los humanos -para la agricultura, aprovechamiento de madera u otras actividades- (Middleton et al. 1997, citado en Dull et al., 2010) o por relámpagos, en especial cuando existen tormentas con poca precipitación (Jensen y McPherson, 2008).

El factor humano es, según datos del Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca, el responsable de la totalidad de los incendios en el Azuay y se dan debido a negligencia, desconocimiento o de forma intencional (Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca, n.d.).

**2.2.2 Quemias antropogénicas.** La mayoría de incendios en los trópicos son programados intencionalmente para el desmonte y conversión de la tierra, agricultura de tala y quema e incendios provocados y por lo tanto son incendios de uso de suelo (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2001). Las quemias antropogénicas pueden ser provocadas para realizar agricultura u otras actividades (Middleton et al. 1997, citado en Dull y Nevle et al., 2010). Existe una relación muy bien establecida entre el fuego y el uso prehistórico del suelo especialmente para la agricultura, en los biomas forestales de los neotrópicos (PipernoyPearsall1998; Bushetal.2008; Mayley Power 2008, citado en Dull y Nevle et al., 2010).

En época de sequía los incendios provocados por quemias son más frecuentes (Field, van der Werf, y Shen 2009, citado en Dull et al., 2010) y muchas quemias escapan los límites establecidos (Nevle et al., 2010). Cuando existen quemias, esta zona se vuelve más propensa a los incendios si las condiciones de sequía





permanecen (Field, van der Werf, y Shen 2009, citado en Dull y Nevle et al., 2010).

Los incendios más devastadores ocurren en bosques que han sido anteriormente quemados (Cochrane et al., 1999, citado en Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2001) debido a que las quemas repetitivas provocan una disminución de la biodiversidad en los biomas tropicales (Nasi, Dennis, Maijaard, Applegate y Moore, 2011); los incendios pueden estar seguidos de una colonización e infestación de insectos, lo cual perturba el balance ecológico (Nasi, Dennis, Maijaard, Applegate y Moore, 2011).

**2.2.3 Pastoreo.** El pastoreo de ganado puede remover combustibles finos como el pasto, lo cual puede incrementar la inflamabilidad del lugar debido a que las plantas herbáceas son reemplazadas por plantas leñosas de mayor inflamabilidad, las cuales a su vez pueden llegar a ser dominantes debido a que el ganado no se alimenta de estas; cuando la vegetación se remueve, el suelo se calienta, favoreciendo la germinación de este tipo de plantas (Jensen y Mcpherson, 2008).

Según Jensen y Mcpherson (2008) el pastoreo también conlleva a la remoción de materia orgánica y los cascos del ganado compactan el suelo, lo cual suele favorecer a las plantas leñosas. De esta manera, el pastoreo provoca una reducción inicial de la frecuencia del fuego y acomoda a las plantas leñosas, lo cual puede conllevar a un aumento en la gravedad de los incendios (Jensen y Mcpherson, 2008). Sin embargo, de acuerdo a Pezo e Ibrahim (1998), los animales provocan daño físico a las plantas leñosas, en especial a aquellas en estadio juvenil.



**2.2.4 Tala.** Al igual que el pastoreo, la tala a pesar de que remueve materia inflamable, por lo general no conduce a una reducción de la actividad del fuego, deja atrás árboles en mal estado y combustibles muertos altamente inflamables (Jensen y Mcpherson, 2008). Según Jensen y Mcpherson (2008), la tala también puede causar que los árboles en las zonas de tala tengan una edad semejante, por lo cual se fragmenta el bosque y se producen incendios de mayor intensidad y frecuencia.



## 2.3 Factores climáticos y meteorológicos que facilitan la ignición y propagación del fuego

El fuego en muchos casos se da como resultado de la combinación de diversos factores meteorológicos y geográficos (Jensen y McPherson, 2008). Según el historiador Stephen Pyne, los incendios naturales son un fenómeno climático y se espera que en el futuro los incendios forestales se den con mayor frecuencia y gravedad como resultado del aumento en los niveles de monóxido de carbono, temperatura y variaciones en la precipitación (el aumento de temperatura provoca veranos más largos y más calientes) (Jensen y McPherson, 2008).

Entre los factores climáticos que ejercen influencia están: el viento, la temperatura y la humedad; el tiempo (meteorológico) es uno de los factores más complejos (Jensen y Mcpherson, 2008). Las predicciones climáticas del reporte del Grupo de Trabajo II del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, publicado en febrero de 2001 concluyen que los incendios forestales se convertirán en un creciente problema en muchos biomas forestales (Davies y Unam, 1999, citado en Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2001).

**2.3.1 Viento.** El viento es el factor climático que tiene mayor influencia ya que transporta el aire y por lo tanto el oxígeno necesario para que se dé la combustión, también es responsable de la movilización del fuego hacia nuevas fuentes de combustible (National Park Service, n.d.). Los grandes incendios crean sus propios vientos y sistemas meteorológicos (Jensen y McPherson, 2008).

**2.3.2 Densidad, humedad y volatilidad.** La humedad se refiere a la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y que afecta al contenido de humedad del combustible (National Park Service, n.d.). Si se da un aumento de temperatura y las condiciones de humedad disminuyen, se espera que aumenten las poblaciones de plagas y la mortalidad de los árboles, lo cual podría estar relacionado con incendios de mayor frecuencia y gravedad debido a la disponibilidad de combustible fácilmente inflamable (Jensen y Mcpherson, 2008).



El clima determina la humedad de los combustibles y por lo tanto su volatilidad (Jensen y Mcpherson, 2008); el contenido de aceites volátiles también facilita la combustión (National Park Service, n.d.). Un tiempo caliente, seco y con viento durante un período de tiempo prolongado extrae la humedad de los combustibles y debido a que los combustibles de diámetro pequeño tienen una mayor superficie expuesta, estos pierden humedad más rápidamente que aquellos de diámetro mayor (Jensen y Mcpherson, 2008).

La densidad del combustible también influye en la inflamabilidad que este presenta, debido a que cuando las partículas del combustible se encuentran muy juntas, es más fácil que una partícula encienda a otra partícula cercana. Sin embargo, si las partículas se encuentran demasiado compactadas, la combustión se da con mayor dificultad debido a que no existe suficiente circulación del aire (National Park Service, n.d.).

**2.3.3 Temperatura del combustible.** En lo referente a la temperatura del combustible, esta está determinada por la temperatura del ambiente debido a que los combustibles absorben la radiación solar del entorno (National Park Service, n.d.). Mayores temperaturas pueden incrementar la duración y gravedad de las estaciones donde ocurre el fuego, conforme un tiempo más caliente vuelve a los combustibles mayormente combustibles por una mayor porción del año (Jensen y Mcpherson, 2008). La humedad y la temperatura tienen influencias mayores en zonas de gran altitud que en zonas de menor altitud (Thompson 2000, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al.,).



## 2.4 Factores topográficos que facilitan la ignición y propagación del fuego

La topografía es un factor importante de fisiografía, que está relacionada con el comportamiento del viento y por lo tanto afecta a la propensión del fuego (Amini y Shatae 2009, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al.,).

**2.4.1 Elevación o altitud.** La elevación es una variable crucial asociada al comportamiento del viento por lo que también es relevante en la propagación del fuego. La elevación tiene influencia sobre la estructura de la vegetación, la humedad de los combustibles y la humedad del aire (Thompson 2000, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al.,).

**2.4.2 Pendiente.** El fuego se moviliza más rápidamente en dirección ascendente por las pendientes que en dirección descendente (Adab et al. 2011, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al.,). En pendientes pronunciadas, la tasa de propagación del fuego podría incrementar debido a que las llamas tienen un ángulo más cercano a la superficie del suelo y los efectos del viento pueden proveer el proceso de convección del calor para el incendio producido (Zhong 2003, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al.,).

**2.4.3 Aspecto.** El aspecto se refiere a la dirección de las pendientes y también desempeña un papel esencial en la propagación del fuego. En horas tempranas del día, los aspectos del Este reciben mayor radiación ultravioleta y luz solar directa que los aspectos del Oeste, por lo que los aspectos del este son más secos (Ghobadi y Gholizadeh et al.,). Por otro lado, los aspectos del Sur tienen mayores temperaturas, menor humedad y menor contenido de humedad en los combustibles debido a que reciben calor directo del sol en mayor cantidad (Lin y Sergio 2009, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al.,).



## 2.5 Consecuencias de los incendios forestales

Los incendios forestales, en especial aquellos de gran intensidad, pueden afectar en gran medida a la calidad del suelo (National Park Service, n.d.). En los pastizales al igual que en los matorrales y bosques poco densos, el fuego usualmente tiene lugar a nivel del suelo y a través de combustibles herbáceos y como resultado, los incendios suelen ser de menor intensidad, aunque podrían esparcirse muy rápidamente (Jensen y Mcpherson, 2008). Cuando el incendio se da a nivel del suelo, la materia orgánica en el suelo es destruida (Dong 2006, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al.). El grado de afectación del suelo estará determinado por el contenido de materia orgánica, humedad y por la duración del incendio (National Park Service, n.d.).

Para objetivos de manejo de incendios, es importante conocer que un incendio no necesariamente previene o mitiga incendios futuros, muchos incendios matan a los árboles pero no los queman completamente por lo que una gran cantidad de combustible fácilmente inflamable queda en el paisaje (Jensen y Mcpherson, 2008). Según Jensen y Mcpherson (2008), la fragmentación del hábitat también es un gran problema cuando se utiliza el fuego con objetivos de manejo.

El fuego afecta la capacidad de regeneración de los bosques y los árboles más pequeños son por lo general los que sufren las mayores consecuencias (Adeb et al. 2001, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al., 2012). La pérdida de organismos clave -invertebrados, polinizadores y descomponedores- dificulta aún más la regeneración de los bosques (Boer, 1989, citado en Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2001) y a su vez el humo del fuego dificulta la actividad fotosintética de las plantas (Davies y Unam, 1999, citado en Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2001).

El establecimiento y propagación de especies no nativas dentro de un ambiente propenso al fuego crea aún mayor complejidad, el fuego en estos ecosistemas alterados podrían beneficiar a las especies no nativas en mayor medida de lo que



benefician a las especies nativas, amenazando la diversidad biológica (Jensen y Mcpherson, 2008).

Los incendios forestales pueden dañar de forma severa al medioambiente cuando estos no son controlados o cuando los ecosistemas forestales no están adaptados al fuego. Los incendios forestales exhiben una distribución espacio-temporal compleja e irregular, lo cual dificulta la predicción de su comportamiento (Vega Orozco et al., 2012).



## **2.6 Sistemas de Información Geográfica y Sensores remotos para la valoración de riesgo de incendios forestales**

Se consideran zonas de riesgo de incendios forestales los lugares propensos al fuego y desde donde el fuego se puede propagar fácilmente a otras ubicaciones (Jaiswal et al. 2002, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al.). Es necesario identificar y elaborar modelos de riesgo de incendios para poder evaluar de forma precisa los problemas que estos causan, y así tomar medidas preventivas para proteger el ambiente con la satisfactoria toma de decisiones (Ghobadi y Gholizadeh et al.).

En los países en vías de desarrollo se dificulta la implementación de Sistemas de Valoración de Peligro de Incendios Forestales (FFDRS) sofisticados, ya que estos sistemas se basan en amplia información meteorológica. Sin embargo, se pueden realizar análisis utilizando sensores remotos y sistemas de información geográfica<sup>1</sup> (GIS) (Chuvieco y Congalton 1989; Chuvieco y Salas 1996; Mariel y Marielle 1996; Jaiswal et al. 2002, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al.). Los análisis con GIS muestran la distribución espacial de la condición observada de los bosques y por lo tanto la integración de un GIS y factores ambientales pueden funcionar como una herramienta de planificación de los asuntos forestales y de uso de la tierra en un sentido más amplio (Jaiswal et al. 2001, citado en Ghobadi y Gholizadeh et al.).

---

<sup>1</sup> Sistema de información geográfica: "Conjunto de programas que permiten almacenar, recuperar, modificar y combinar cualquier tipo de variables georreferenciadas" Chuvieco (2010)





## 2.7 Índices espectrales (NDVI, IAQ, NBR)

**2.7.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI.** El Índice de vegetación de diferencia normalizada–NDVI- es otro factor a ser considerado. Este índice se emplea para estimar parámetros de cobertura vegetal y utiliza las bandas del rojo e infrarrojo cercano (Chuvieco, 2010); por lo general, si mucha más radiación es reflejada en longitudes de onda de infrarrojo cercano, se puede suponer que la vegetación en ese píxel<sup>2</sup> es probablemente densa y podría tratarse de un bosque (Ghobadi y Gholizadeh et al.,). Ciertos trabajos han mostrado que el NDVI está directamente relacionado a la capacidad fotosintética y por lo tanto la absorción de energía de los doseles de las plantas (Ghobadi y Gholizadeh et al.,).

**2.7.2 Índice de áreas quemadas IAQ.** Entre los estudios realizados para identificar las áreas donde han ocurrido los incendios se puede destacar el de Martín y Chuvieco (2001) donde se presenta el índice de área quemada (IAQ) como una alternativa; este índice se basa en la cuantificación de la distancia espectral entre los valores de la imagen en las bandas<sup>3</sup> del rojo e infrarrojo cercano y el punto de convergencia. En dicho estudio se llevaron a cabo pruebas con imágenes satelitales de alta y baja resolución<sup>4</sup> espacial para evaluar la capacidad de discriminación de áreas quemadas mediante la aplicación de este índice, el cual se calcula empleando la siguiente fórmula:  $IAQ = 1 / [(p_{cr} - p_r)^2 + (p_{cir} - p_{ir})^2]$ , donde  $p_{cr}$  y  $p_{cir}$  son los valores de convergencia para las bandas del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente y se definieron, respectivamente, como 0,1 y 0,06. También se comparó en este estudio la capacidad del IAQ para discriminar zonas quemadas, frente a otros índices empleados tradicionalmente -NDVI, SAVI y GEMI- y se concluyó que el IAQ es el que mejor discrimina estas zonas (Martín y Chuvieco, 2001).

<sup>2</sup> Píxel: “Es el elemento pictórico más pequeño de las imágenes que es susceptible de ser procesado” Chuvieco (2010)

<sup>3</sup> Banda espectral: “Se refiere este término a una selección de longitudes de onda con comportamientos electro-magnéticos similares” Chuvieco (2010)

<sup>4</sup> Resolución: “La resolución es la medida de la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de la imagen. Refiere al tamaño de la mínima unidad de información en el terreno (espacial), al número de bandas disponibles (espectral), a los niveles de codificación (radiométrica) o a la frecuencia de cobertura (temporal)” Chuvieco (2010)



**2.7.3 Índice normalizado de quemas NBR.** Otro estudio realizado por Saldivia y Rodríguez-Verdú (2007), analiza la variación en la respuesta espectral que presentan las áreas quemadas de distintas regiones de sudamérica, utilizando imágenes MODIS, sobre perímetros de áreas quemadas identificados anteriormente mediante un análisis visual de imágenes con mayor resolución espacial. En el estudio se utilizan dos índices de áreas quemadas: NBR e IAQ, al igual que variables de vegetación y clima y se encuentra que las variables de vegetación explican de mejor manera las variaciones de los índices en zonas de quema. El histograma obtenido utilizando el NBR se ajusta a una curva normal debido al diseño de este índice mientras que para el IAQ es necesario aplicar una transformación que normalice la variable. Se encontró también que los índices tienen el mismo comportamiento y la separabilidad entre grupos del IAQ mejoró considerablemente una vez aplicada la normalización y se obtuvieron resultados muy similares en todos los tests de ANOVA realizados. En Chuvieco (2010) también se menciona a este índice como *Normalized Difference Infrared Index* (NDII) y este autor también afirma que es un índice eficaz para la cartografía de áreas quemadas ya que utiliza el infrarrojo de onda corta (SWIR) que produce una señal quemada nítida y existe menor alteración de factores externos (por ejemplo, la atmósfera).



## 2.8 Análisis de datos espaciales

El Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE) está conformado por el grupo de herramientas estadístico-gráficas que describen y visualizan las distribuciones espaciales (Chasco, 2003). Entre los estudios realizados se encuentra el de Genton et al., (2006), quienes analizan la estructura espacio-temporal de incendios forestales al noreste de Florida y demuestran a través del uso de patrones de punto que los incendios ocurren en conglomerados<sup>5</sup>. En otros estudios como en el caso del estudio realizado por Vega Orozco et al., (2012) se realizan análisis de conglomerados para detectar el patrón de distribución espacio-temporal de incendios forestales y se identifican *hot spots* / puntos calientes a través de un modelo de permutación espacio-temporal utilizando estadística SCAN (STSSP) y un Sistema de Información Geográfica (GIS).

Al realizar el análisis bibliográfico se encontró que el análisis de *hot spots* es más ampliamente utilizado para el análisis de crímenes, accidentes automovilísticos y en econometría espacial. Sin embargo, al tratarse de datos de incidentes se puede aplicar también para analizar sitios de quema. Otras técnicas para estimar puntos calientes son el análisis de autocorrelación espacial y el análisis de densidad Kernel (Manepalli et al., 2011).

Camarero (2006) define a la autocorrelación espacial como una medida del grado de similitud para una variable cuantitativa o categórica  $z$  entre puntos vecinos en el espacio. Si la autocorrelación es positiva indica que existe similitud en los valores de  $z$  en puntos vecinos y si es negativa indica que los valores de  $z$  en puntos vecinos no son similares (Camarero, 2006). Para el análisis de autocorrelación espacial se suele utilizar el índice de Moran, sin embargo, los patrones de distribución en ciertas ocasiones varían en función de la escala (Rodríguez et al., 2010).

---

<sup>5</sup> Conglomerado: “Se habla de cluster o conglomerado cuando los píxeles o elementos de una imagen tienden a formar grupos con similares condiciones espectrales...” Chuvieco (2010)



Ávila-Flores et al., (2010) realizan un análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango (México), mediante el empleo del índice de Moran y se encuentra una alta correlación espacial entre las superficies con registro de incendio.

Koutsias et al., (2010) realizan un análisis geo-estadístico a nivel provincial en el sur de Europa para modelar la ocurrencia de incendios forestales, utilizando indicadores socio-económicos y demográficos, junto con estadísticas de cobertura vegetal y de agricultura para explicar los patrones de ocurrencia de incendios forestales a largo plazo.

En Ecuador, el Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) realizó un modelamiento espacial para la predicción, detección, extinción y evaluación de incendios forestales para el Distrito Metropolitano de Quito (Suárez y Aguilar, 2013). Para la predicción de los incendios se realizó una modelación de las siguientes variables: áreas artificiales y cultivadas, cobertura vegetal, índice de combustibilidad, orientación y pendiente, focos de incendio, humedad relativa, precipitación y temperatura; estas fueron organizadas como: bióticas, físicas, meteorológicas y antrópicas y se generó un modelo de predicción y probabilidad de incendios forestales mediante la técnica de Autómatas Celulares. Para la evaluación de los incendios se identificaron las áreas de concentración de focos de incendio y se establecieron los sitios de concentración. Se obtuvo un raster normalizado que fue reclasificado para determinar zonas de concentración en una escala espacio-temporal. Se tomó en cuenta el análisis espacial de densidad y la frecuencia de los focos de incendio (Suárez y Aguilar, 2013). Entre los hallazgos de Suárez y Aguilar (2013) se encontró que agosto y septiembre son los meses que presentan mayor número de incendios, las áreas con mayor concentración de incendios corresponden a relieves de montaña y la mayoría de las quemadas se encuentran en parroquias rurales.



En otro estudio de la Escuela Politécnica del Ejército se genera y se valida un modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales aplicando Lógica Difusa en el Distrito Metropolitano de Quito (Columba y Quisilema, 2013). La metodología es desarrollada con el uso de variables meteorológicas y otras variables, como: pendiente, distancia a la red hídrica, distancia a las vías de comunicación y combustibilidad de la cobertura vegetal. Se obtuvieron varios modelos con el uso de un SIG para determinar cuál se ajusta mejor a la realidad. Se utilizó la herramienta *Raster Calculator* de ArcGIS 9.3 para elaborar los raster de las variables, se obtuvieron los valores de máximo y mínimo generados por defecto y se realizó una normalización. Se obtuvieron tres modelos similares, los cuales se validaron utilizando la desviación estándar. Se encontró que cuando la desviación estándar tiende a uno y el ajuste tiende a cero, se tiene el modelo óptimo de aplicación de la Lógica Difusa y que la ocurrencia de las quemadas en la zona analizada está en función de la inflamabilidad del combustible, la distancia a las vías, la distancia a la red hídrica, pendiente, precipitación, humedad relativa y temperatura (Columba y Quisilema, 2013).



### Capítulo III. JUSTIFICACIÓN

La cuenca del río Paute tiene una población aproximada de 900.000 habitantes (Fondosdeagua.org, 2008) y es una zona con un gran potencial hidroeléctrico. Esta cuenca contribuye a la generación del 35% de energía eléctrica del Ecuador (FONAPA, 2014), razón por la cual su preservación es de gran importancia ya que de las condiciones en la que se encuentren los ecosistemas forestales depende la capacidad de regulación del ciclo hídrico (Viteri & Cordero, 2010).

Algunas empresas como ETAPA, CM-PN Cajas, SGA; CGA; el ex - CG-Paute, Elecaastro, Hidropaute, Consorcio del Jubones, Consejo de la Cuenca del Machángara, y otras instituciones como el Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca han ejecutado proyectos para la preservación de esta cuenca, implementando acciones de prevención -tales como la formación de Guardabosques *adhonorem* y Bomberos Forestales- y coordinación local de acciones operativas. Sin embargo, estas acciones no han conducido a una gestión eficiente para reducir el riesgo de incendios forestales (Cabrera, 2012).

La identificación de las áreas quemadas y el estudio de las características de estas zonas podría facilitar la gestión de los incendios para prevenirlos y llevar a cabo programas orientados a evitar mayores daños al ambiente, asegurar el abastecimiento de agua para el futuro, mejorar la salud de las personas y reducir las pérdidas económicas causadas por estos eventos. “Los incendios forestales afectan a la conservación de los bosques, causan daños económicos y ecológicos y provocan sufrimiento a las personas” (Ghobadi y Gholizadeh et al, 2012).



## Capítulo IV. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### 4.1 Objetivo General

Identificar el comportamiento de los incendios forestales en la cuenca del río Paute, mediante sensores remotos y sistemas de información geográfica

### 4.2 Objetivos Específicos

- I. Obtener, seleccionar y corregir las imágenes satelitales y fotografía aérea que mejor se adapten al estudio.
- II. Identificar las zonas quemadas mediante el cálculo de índices espectrales y clasificar las coberturas de suelo.
- III. Analizar el comportamiento de los incendios forestales en la cuenca del río Paute para facilitar la planificación y gestión del territorio.

### 4.3. Hipótesis

Los sitios con mayor densidad de quemas guardan determinada proximidad, presentan una dominancia común de cobertura vegetal y las variables topográficas están fuertemente asociadas a la ocurrencia de las mismas.



## Capítulo V. METODOLOGÍA

### 5.1 Sitio de estudio

La región de estudio del presente trabajo de investigación corresponde a la cuenca del río Paute. La superficie de la cuenca es de 6439.13 km<sup>2</sup>, lo cual constituye el 2.51% del territorio nacional (CGPaute, 2009) y es una zona estratégica debido al gran potencial de generación hidroeléctrica que posee (2389.1MW) (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2009). La cuenca del río Paute tiene una población aproximada de 900.000 habitantes (Fondosdeagua.org, 2008).

La precipitación media anual varía desde los 3400 mm cerca de la salida del flujo hasta los 750 mm en el centro de la cuenca. La precipitación es mayor de enero a abril y de octubre a diciembre (Ward et al, 2011). Los tipos de ecosistemas que se encuentran en esta cuenca son (Galeas, 2013): páramo de almohadillas, páramo arbustivo, arbustal siempreverde y herbazal del páramo, bosque siempreverde montano alto de la Cordillera oriental de los Andes, bosque siempreverde montano bajo de la cordillera occidental de los Andes, bosque siempreverde montano bajo del sur de la cordillera oriental de los Andes, bosque siempreverde montano de la Cordillera Occidental de los Andes, bosque siempreverde montano del Sur de la cordillera oriental de los Andes (bosque de neblina montano del sector sur de la cordillera oriental), bosque siempreverde piemontano del Sur de la cordillera oriental de los Andes, herbazal del Páramo y herbazal inundable del Páramo. Los tipos de suelo más comunes en la cuenca del río Paute son los andosoles y los histosoles (Crespo et al., 2014).





Forman parte de esta cuenca las provincias de Azuay, Cañar, Chimborazo y Morona Santiago (CELEC EP, 2012), como se muestra en la ilustración 1.

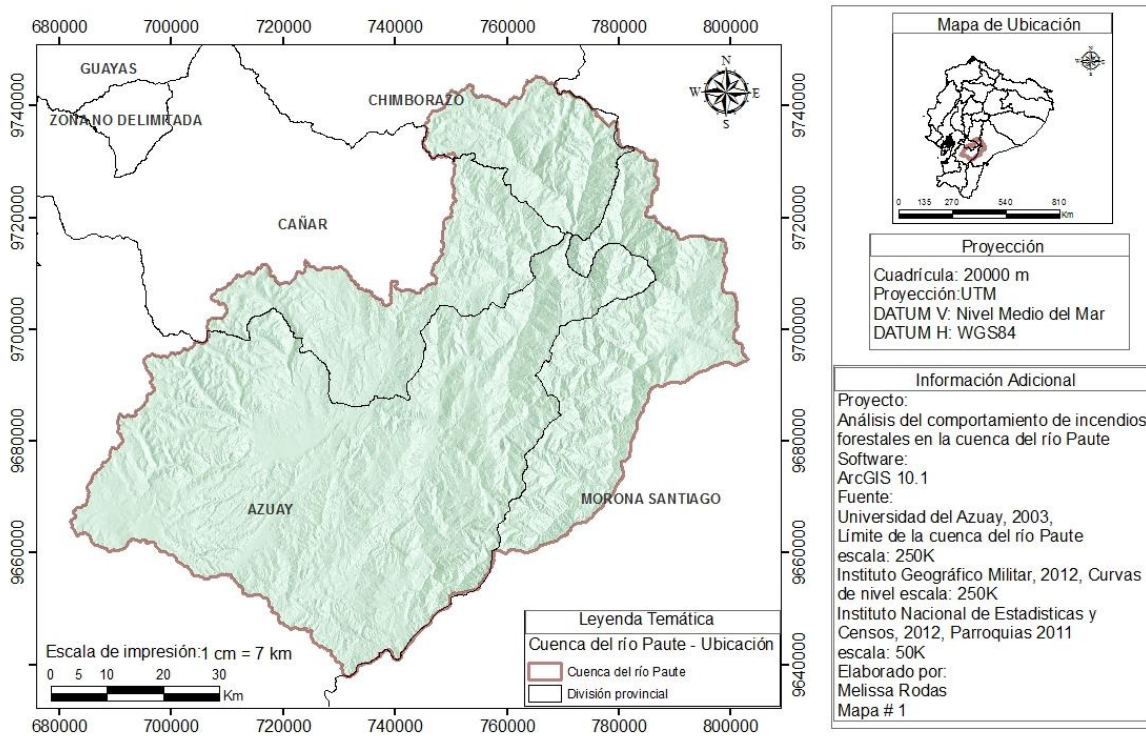


Ilustración 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Paute



## 5.2 Obtención, selección y corrección de las imágenes satelitales y fotografía aérea

Se realizó la búsqueda de imágenes satelitales y de fotografía aérea que cubran la mayor parte de la superficie de la Cuenca del Río Paute. En la tabla 1 se presenta los recursos de imágenes que fueron revisadas previo al análisis de esta investigación.

*Tabla 1. Imágenes disponibles para el análisis*

Tipo de Imagen	Año del recurso analizado					especificaciones
	2010	2011	2012	2013	2014	
Lansat 8				X	X	Path 10 y row 62
RapidEye	X					
Fotografía aérea	X	X	X			

Las imágenes Landsat 8 de los años 2013 y 2014, correspondientes al path: 10 y row: 62 fueron descargadas del U.S. Geological Survey. La imagen Rapideye fue proporcionada por el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS), mientras que la fotografía aérea fue proporcionada por el Programa Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS).

Se utilizaron dos imágenes Landsat 8 y la fotografía aérea. No se pudo conseguir una imagen del 2012 apropiada para el estudio debido a que las imágenes del 2012 son imágenes Landsat 7 que se encuentran bandeadas debido a fallas en el corrector de la línea de escaneo del sensor (SLC) desde el año 2003.

En cuanto a las ortofotos, estas no requieren corrección mientras que las imágenes satelitales se corrigieron a valores de reflectividad<sup>6</sup> a través de la transformación de los niveles digitales a valores de reflectividad en el techo de la

<sup>6</sup> Reflectividad: "Porcentaje de radiación incidente que es reflejada por una superficie bidimensional" Chuvieco (2010)



atmósfera. Para ello se aplicó la fórmula de cálculo de la reflectividad en el techo de la atmósfera (Landsat.usgs.gov, 2015:

$$p\lambda = \frac{M\rho Q_{cal} + A\rho}{\sin(\theta_{SE})}$$

Donde:

$P\lambda$  = Reflectividad planetaria en el techo de la atmósfera

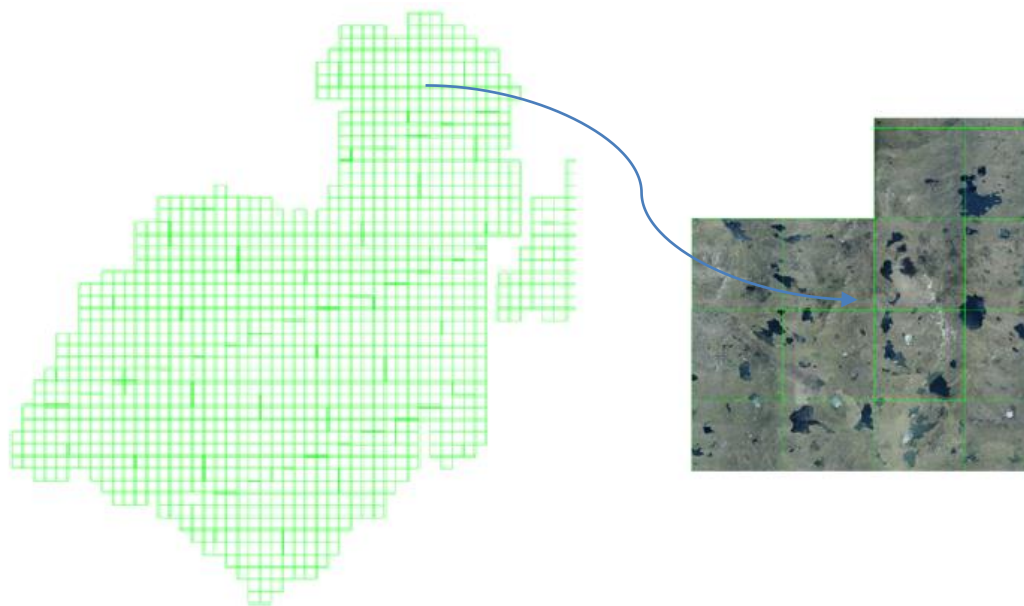
$M\rho$  = Factor multiplicativo de cambio de escala específico para cada banda, obtenido de los metadatos (REFLECTANCE\_MULT\_BY\_X, donde x es el número de banda)

$A\rho$  = Factor aditivo de cambio de escala específico para cada banda, obtenido de los metadatos (REFLECTANCE\_ADD\_BY\_X, donde x es el número de banda)

$Q_{cal}$  (DN) = Niveles digitales del producto estándar cuantificados y calibrados

### 5.3 Identificación de las zonas quemadas mediante el cálculo de índices espectrales y clasificación las coberturas del suelo

Primero se trabajó con las ortofotos, se creó un mosaico que consiste en la agrupación ordenada de las fotografías aéreas disponibles que cubren la Cuenca del Río Paute (ilustración 2).

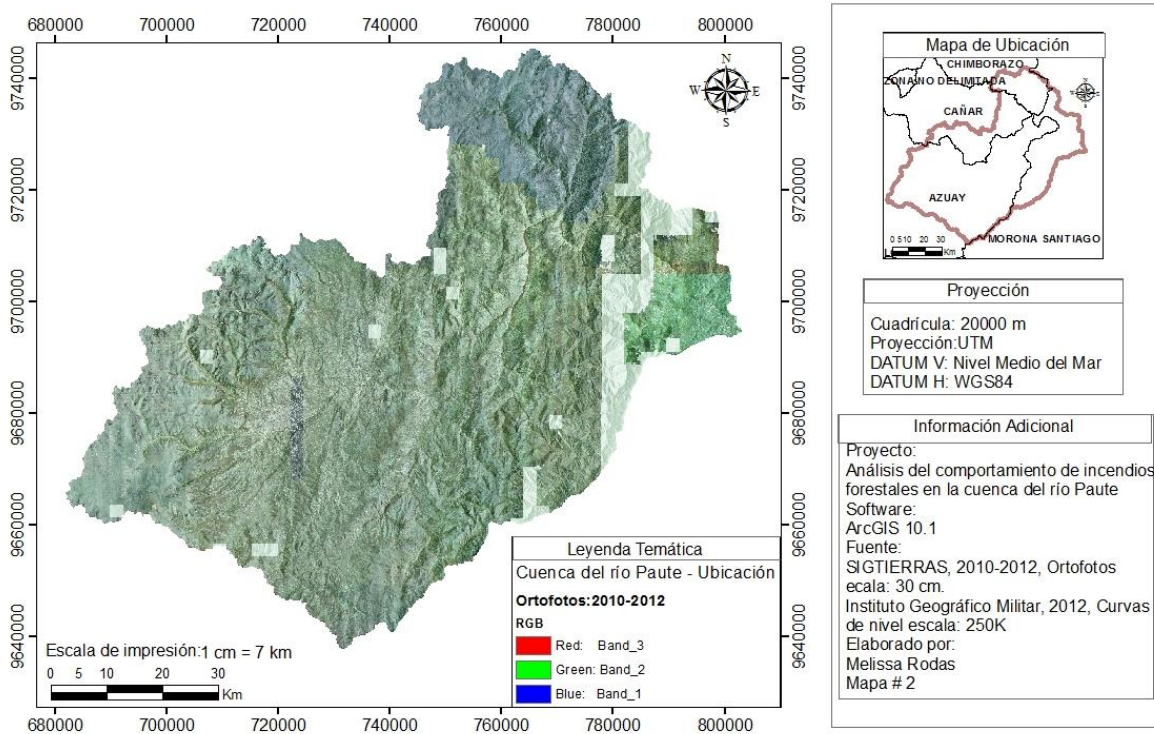


*Ilustración 2. Mosaico de las ortofotos de SIGTIERRAS de la cuenca del río Paute (2010-2012, 1:0.30).*

La realización de este mosaico permitió la visualización de las ortofotos solamente al realizar varias ampliaciones de la imagen, razón por la cual fue necesario bajar la resolución de las mismas e integrarlas en una sola imagen con formato raster. Se obtuvo una imagen con resolución de 30 m y otra con resolución de 5 m.



Luego de formado el mosaico se cortó el área de la cuenca utilizando un archivo shape (Ilustración 3).



*Ilustración 3. Ortofotos de la cuenca del río Paute. 2010-2012*

Las áreas quemadas que resultaron del análisis mediante interpretación visual de las ortofotos fueron digitalizadas mediante la delimitación manual de polígonos. Se comparó después que las zonas identificadas a 5 m sean visibles en las imágenes a 30 m. Los polígonos de las quemadas que no fueron visibles a 30 m fueron eliminados para así poder comparar los resultados de las ortofotos con los de las imágenes Landsat de los años 2013 y 2014 (resolución de 30 m).

Después se utilizó la combinación de bandas 7, 5, 4 con el fin de visualizar las áreas quemadas. Con la combinación 7 (infrarrojo de onda corta), 5 (infrarrojo) y 4 (rojo) se puede visualizar las áreas quemadas en color rojo, estas fueron delimitadas mediante polígonos, al igual que lo realizado con las ortofotos. Luego, debido a que esta combinación muestra también zonas urbanas, zonas con vegetación seca y sitios rocosos, se procedió al cálculo de índices espectrales



para lograr una mejor discriminación; para ello, se procedió a aplicar el cálculo del NDVI y NBR.

La fórmula para el cálculo del NDVI utiliza las bandas del infrarrojo (IR) y del rojo (R), que en las imágenes LANDSAT 8 corresponden a las bandas 5 y 4, respectivamente. La fórmula aplicada es la siguiente:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

La fórmula para el cálculo del NBR utiliza las bandas del Infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR) que en la LANDSAT 8 corresponde a las bandas 5 y 7, respectivamente. La fórmula aplicada es la siguiente:

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

Debido a que el índice NBR mostró los mejores resultados en cuanto a la discriminación de las áreas quemadas se escogió este índice para el análisis de las mismas. Luego, para aumentar la confiabilidad del análisis y cerciorarnos de que se traten efectivamente de zonas quemadas se calculó el dNBR que consiste en la resta del NBR posterior y NBR anterior, para esto se utilizó el NBR de la imagen del 2014 como NBR posterior y el NBR de la imagen de la imagen del 2013 como NBR anterior. Esta resta permitió discriminar entre áreas verdaderamente quemadas y áreas que tienen un valor de NBR similar al de las quemadas pero corresponden a otros tipos de cobertura de suelo.

Una vez delimitadas de forma manual las áreas quemadas y luego de determinar las zonas que con certeza no fueron quemadas (mediante el cálculo del dNBR), se realizó un muestreo de los píxeles de estas quemadas y se calcularon las



desviaciones estándar. Esto nos sirvió para establecer un rango que permita la delimitación óptima de las zonas quemadas.

Como método de validación de las áreas quemadas se utilizaron centroides de quemas del Azuay (septiembre del 2013) entregados por el Ministerio de Ambiente del Ecuador (ver anexo 5), donde se encontraron cuatro quemas dentro de la cuenca del río Paute, también se utilizaron polígonos de quemas del Parque Nacional Cajas delimitados por ETAPA donde se ubicaron 23 quemas mayores a los 0.027Km<sup>2</sup> correspondientes al período 2009-2011 (ver anexo 4).

Luego se realizó un cálculo de áreas y centroides de todas las quemas para obtener un mapa de puntos que sirvió para calcular los sitios con mayor densidad de quemas (ilustración 4).

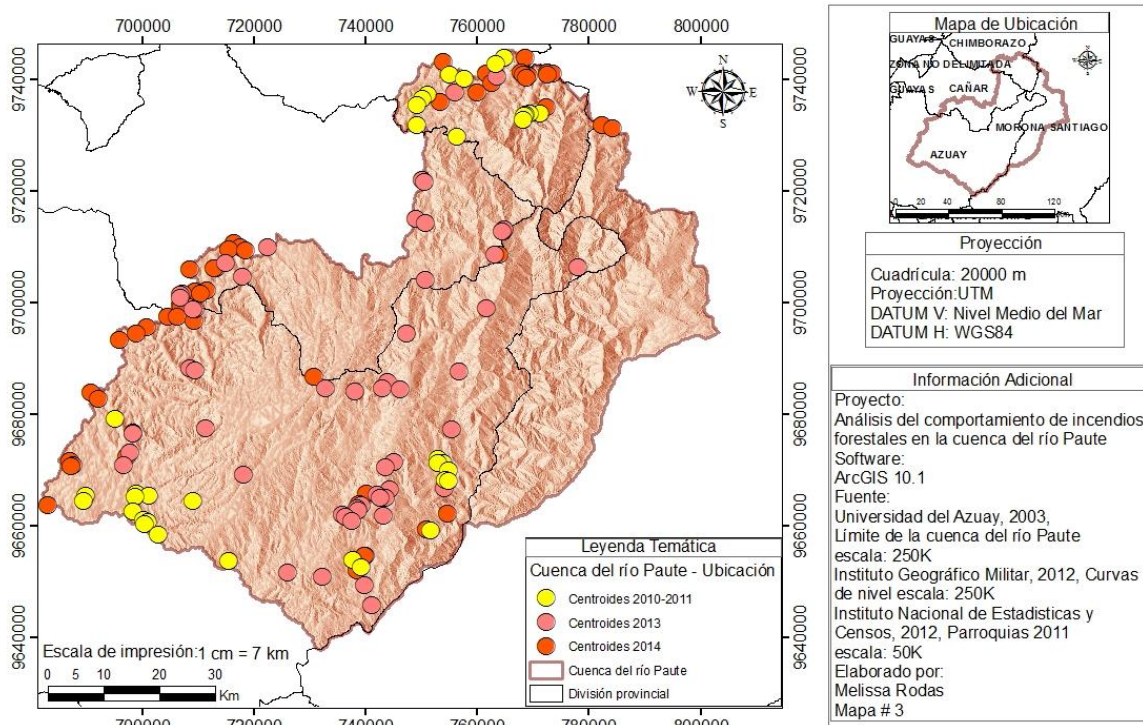


Ilustración 4. Centroides de las quemas identificadas en la cuenca del río Paute por años



Se calcularon las zonas con mayor densidad de quemados, utilizando la herramienta *Density Kernel* de ArcGIS 10.1. Se cortaron las zonas con mayor densidad de incendios y en cada una de ellas se realizó una clasificación supervisada de máxima probabilidad para determinar la composición de la cobertura vegetal y se comparó los resultados entre los diferentes sitios seleccionados. Se pasaron los resultados de la clasificación a polígonos para integrarlos en una tabla de atributos y calcular porcentajes de cobertura en cada zona.





#### **5.4 Análisis del comportamiento de los incendios forestales en la cuenca del río Paute para facilitar la planificación y gestión del territorio**

Para estudiar el comportamiento de los incendios forestales en la cuenca del Paute, primero mediante la herramienta integrate de ArcGIS se agruparon las quemadas en 30 grupos (valor mínimo requerido para el análisis de puntos calientes) y esta herramienta nos permitió definir el número de quemadas en cada grupo. Para obtener los treinta grupos se probaron diferentes valores de tolerancia y resultó el valor más idóneo el valor de 3614 m. Este valor sirvió para estimar las distancias máxima, mínima y promedio en la cual cada evento de quema tiene por lo menos un vecino; de esta manera se determinó una distancia pico que corresponde a la distancia en la que los eventos forman conglomerados. Con el valor de la distancia Pico se determinó la ubicación de los puntos calientes o hot spots (lugares con alta intensidad de quemadas).

Los resultados de los análisis de puntos calientes me permitieron determinar los diferentes índices de Moran por distancias (distancia a la que los puntos de las quemadas están agrupados de forma significativa). El índice de Moran sirve para conocer si las quemadas están agrupadas o dispersas mediante un análisis de autocorrelación espacial, el mismo que se basa en el coeficiente de Moran (Moreno y Vayá, 2001). En este índice estadístico, los valores varían entre +1 y -1, donde +1 indica una correlación positiva perfecta o perfecta concentración, -1 indica una correlación negativa perfecta o perfecta dispersión y el 0 indica un patrón espacial totalmente aleatorio (Rodríguez et al., 2010).



Para conocer la razón por la cual las quemas de esta magnitud se encuentran en determinadas zonas se probaron diferentes variables que podrían explicar la ocurrencia de las quemas (se crearon cuadrículas de 141 m x 141 m para la integración de estas variables).

Estas variables fueron:

1. Elevación promedio (altitud msnm)
2. Distancia promedio al valor de elevación más cercano
3. Aspecto promedio (orientación de la topografía)
4. Valor del aspecto más cercano
5. Pendiente promedio
6. Valor de la pendiente promedio más cercana
7. Valor promedio de precipitación
8. Número de centros poblados
9. Distancia al centro poblado más cercano
10. Distancia a la vía más cercana
11. Distancia a los ecosistemas intervenidos (clasificación MAE 2013).

Se utilizó la herramienta de regresión exploratoria, esta herramienta verifica que las variables ingresadas cumplan con los requisitos de la regresión de mínimos cuadrados ordinaria para ingresar únicamente aquellas que sean válidas para el modelo en la regresión geográficamente ponderada. La regresión exploratoria prueba los valores ajustados de  $R^2$ , los coeficientes del valor-p, el valor de inflación de la varianza, los valores-p de Jarque-Bera y los valores-p de autocorrelación.



### 5.5 Resumen de la metodología: diagrama de flujo

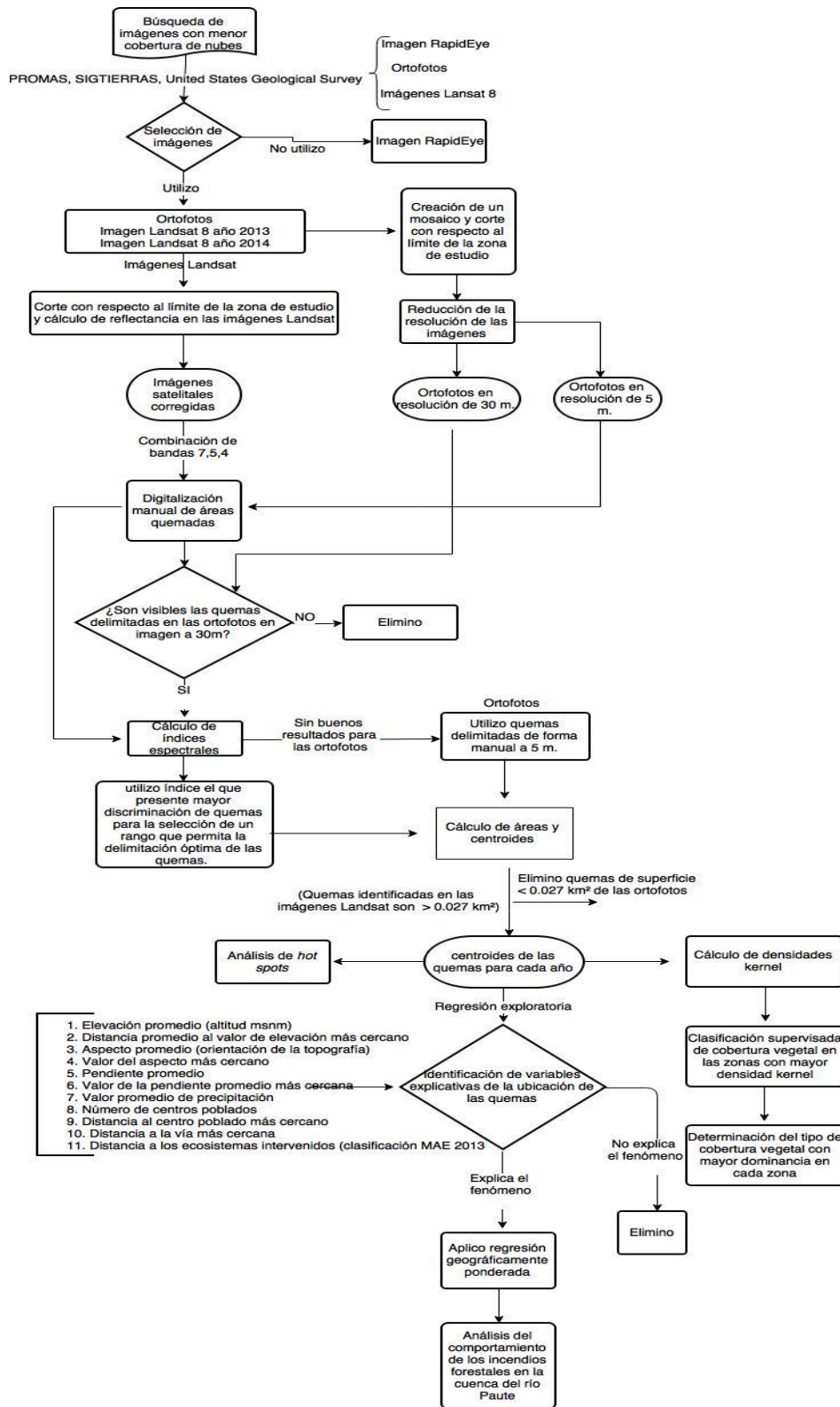


Ilustración 5. Diagrama de flujo de la metodología empleada



## Capítulo VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Imágenes satelitales y fotografía aérea seleccionada y corregida

Las imágenes seleccionadas fueron: Las imágenes Landsat 8 de los años 2013 (28 de noviembre) y 2014 (30 de octubre), correspondientes al path: 10 y row: 62 y la fotografía aérea con temporalidad 2010-2012. Se obtuvo como resultado la fotografía aérea en resolución de 30m y 5m, cortada y combinada en una sola imagen con formato raster (ilustración 6) y las imágenes Landsat corregidas para el estudio (ilustraciones 7 y 8).

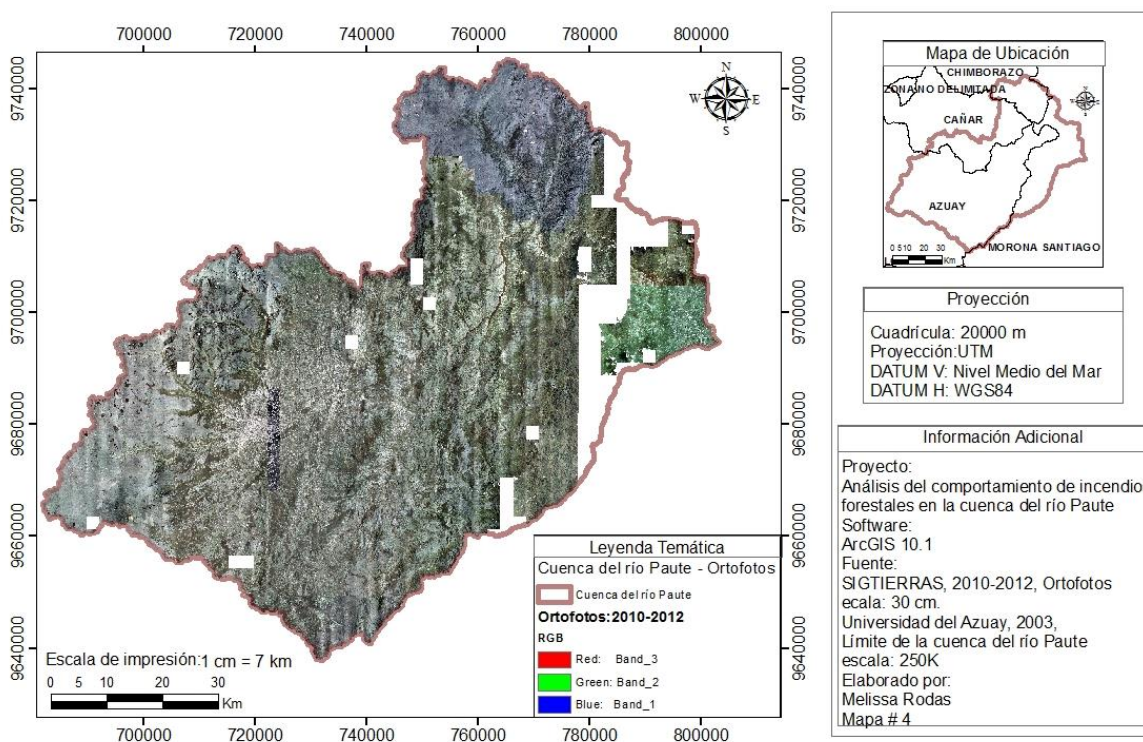


Ilustración 6. Ortofotos de la cuenca del río Paute. 2010-2012.

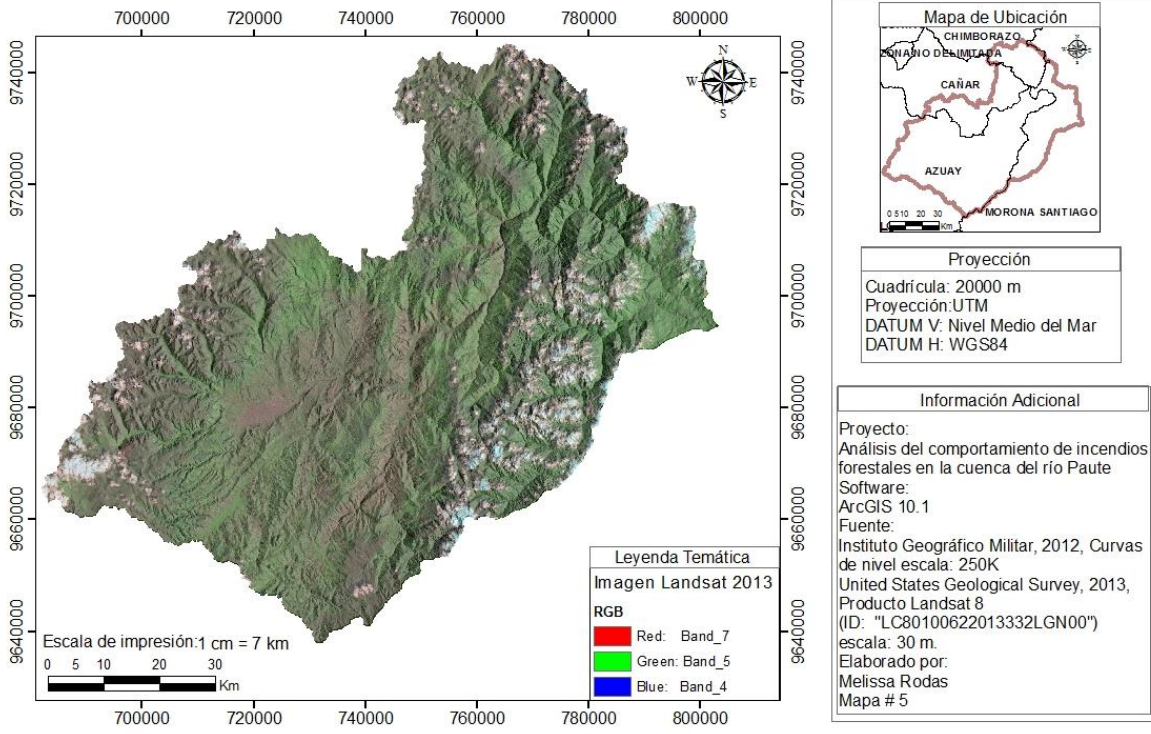


Ilustración 7. Imagen Landsat 8. 2013.

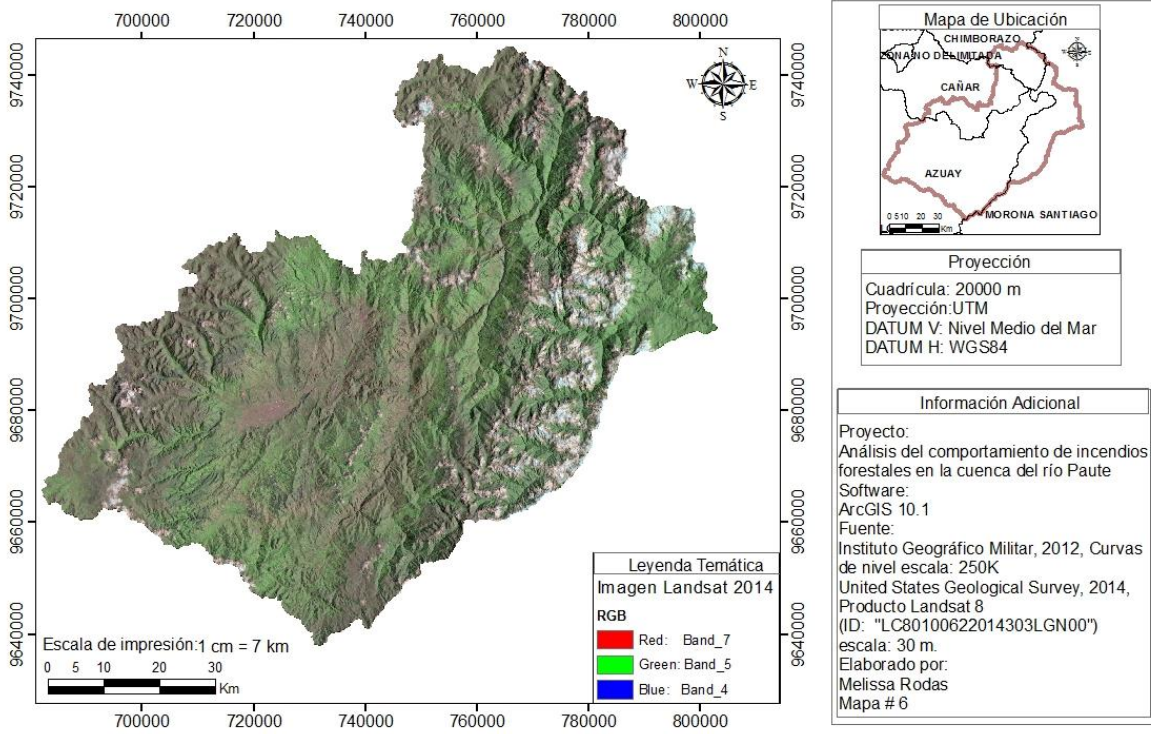


Ilustración 8. Imagen Landsat 8. 2014.



## 6.2 Zonas quemadas identificadas y coberturas de suelo clasificadas

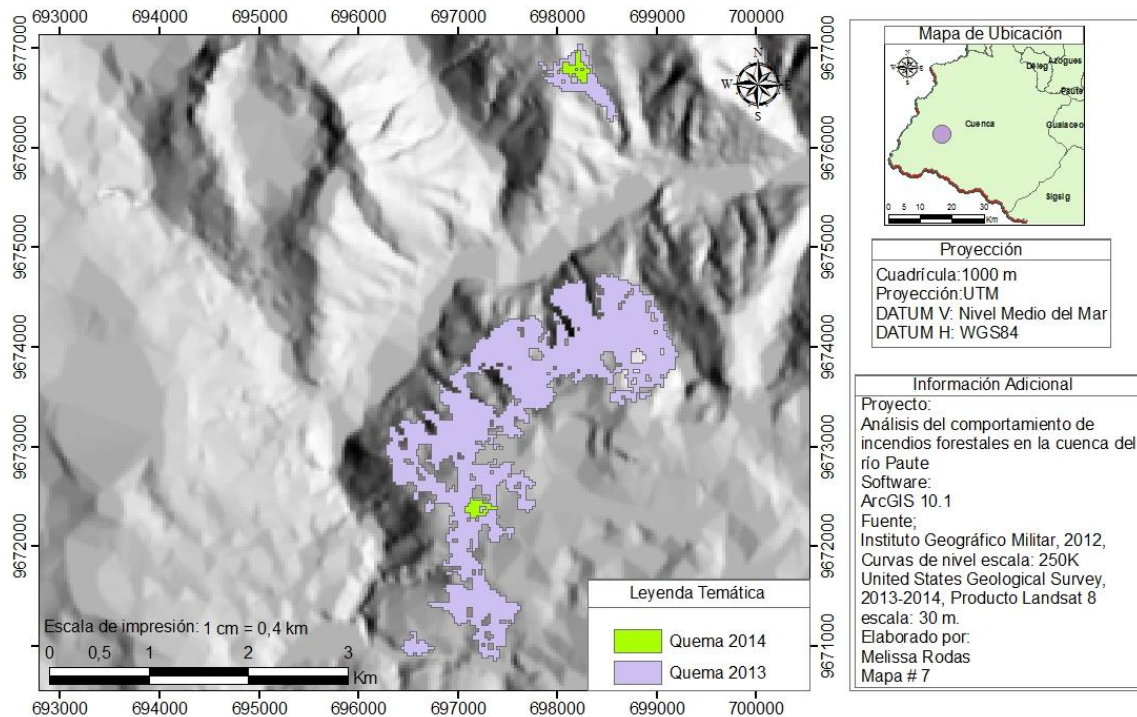
En la cuenca del río Paute el número de 36 quemas identificadas en las ortofotos (2010-2011) aumentó a 53 en el año 2013 y a 52 en el año 2014; sin embargo la superficie total quemada disminuyó de 9.37 Km<sup>2</sup> a 4.8Km<sup>2</sup>. El área total quemada entre el 2010 y 2014 (sin considerar el año 2012) se estimó en 21.38Km<sup>2</sup> (tabla2).

*Tabla 2. Número de quemas y área total quemada en cada año*

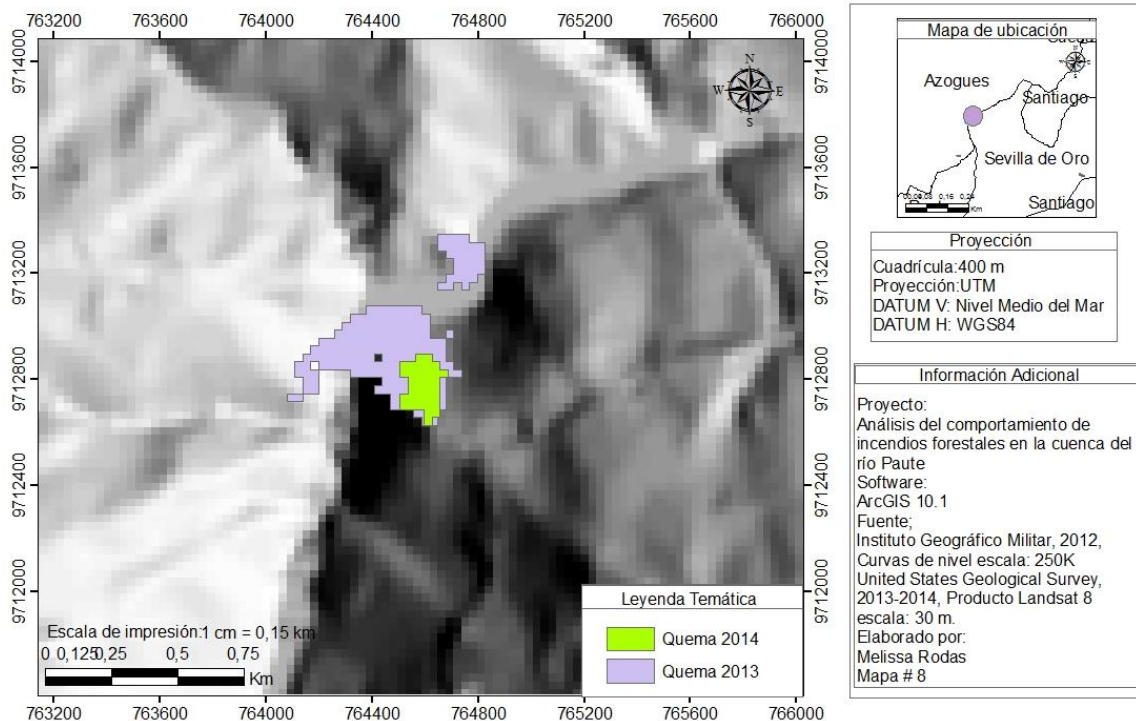
<b>Periodo analizado</b>	<b>Número de áreas quemadas</b>	<b>Área total quemada (km2)</b>
2010-2011	36	9.37
2013	53	7.21
2014	52	4.8
<b>Total</b>	<b>141</b>	<b>21.38</b>



Se encontraron tres sitios de reincidencia. Tres zonas que fueron afectadas en el año 2013 volvieron a quemarse en el año 2014 pero con un área afectada mucho menor. Las áreas que coinciden tanto en el 2013 como en el 2014 se muestran en las ilustraciones (ilustraciones 9 y 10).



*Ilustración 9. Mapa de dos áreas quemadas que coinciden en los años 2013 y 2014*



*Ilustración 10. Mapa de la tercera área quemada que coincide en los años 2013 y 2014*

Al cargar los datos de ETAPA para la validación de los resultados se encontró que ETAPA ha detectado la misma zona de quema pero con una mayor superficie lo cual sugiere que se trata de la misma quema que se ha ido recuperando (ver anexo 4).





Se identificaron 12 zonas con alta densidad de quemas, la zona que tuvo mayor número de quemas fue la zona 12 (ubicada en Dudas-Mazar) y las zonas que menor número de quemas tuvieron fueron la 6 (ubicada en Moya-Molón) y la 9 (ubicada cerca de la parte noroeste de allcuqui), con 3 cada una. En la ilustración 11 a continuación se muestra la ubicación de las zonas con mayor densidad de quemas, con respecto a Áreas de Bosque y Vegetación Protectora (ABVPs).

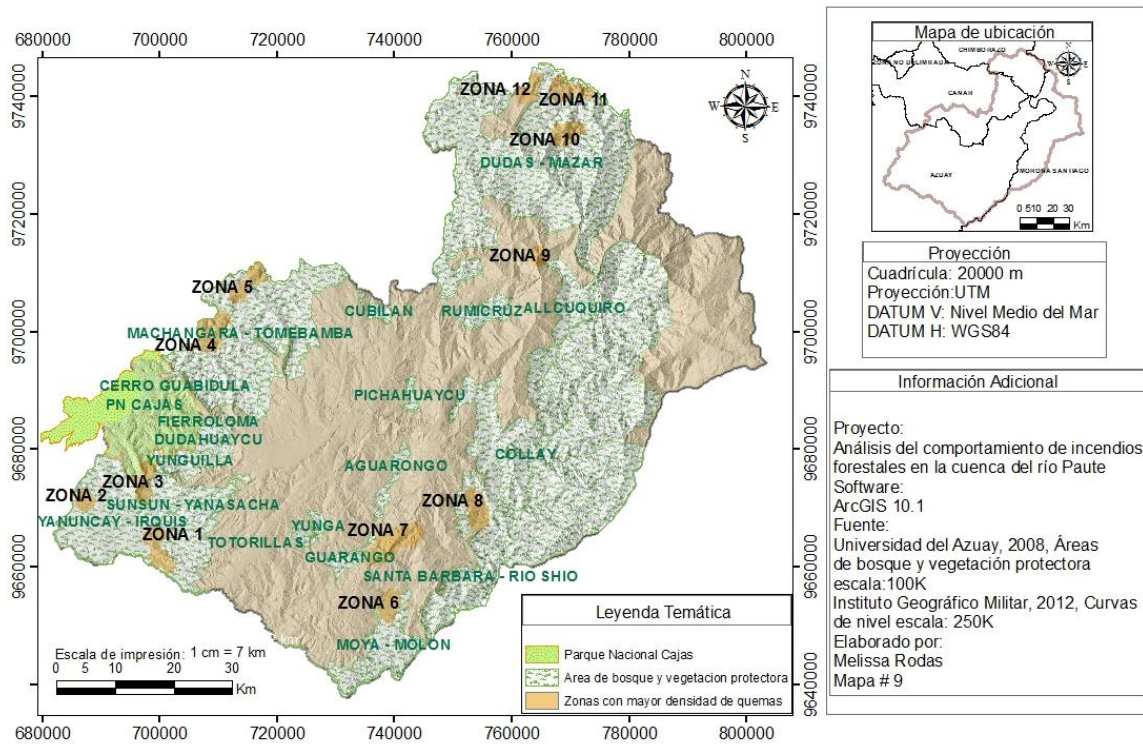


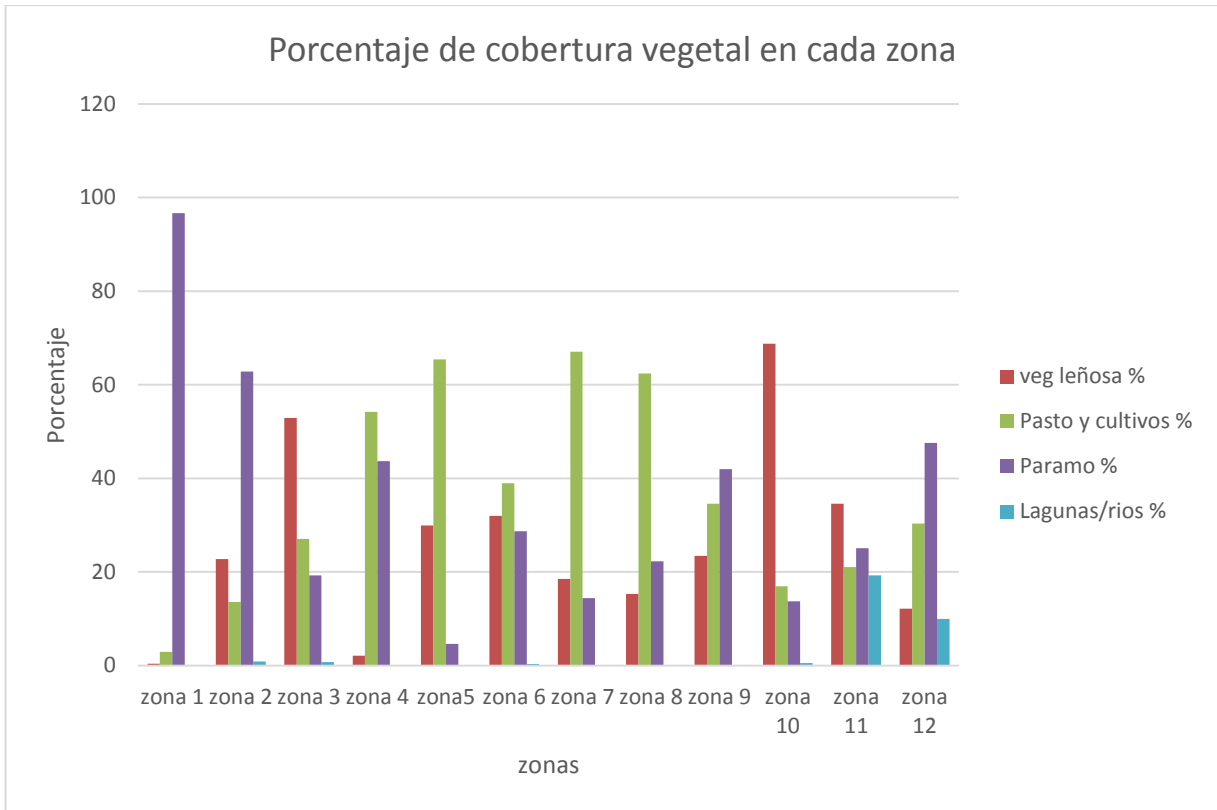
Ilustración 11. Mapa de ubicación de las zonas de mayor densidad kernel en la cuenca del río Paute



No se encontró evidencia de que la ocurrencia de quemas estuviera asociada al tipo de cobertura vegetal presente en las zonas. Sin embargo podemos decir que 4 zonas con mayor densidad de quemas son similares en cuanto a la cobertura vegetal, estas son las zonas 4 a 8 (tabla 3 e ilustración 12).

*Tabla 3. Porcentajes de cada tipo de cobertura de suelo en las zonas con mayor densidad kernel*

Zona	Número de quemas	Vegetación leñosa (%)	Pastos y cultivos (%)	Páramo (%)	Lagunas y ríos (%)
zona 1	5	0.3815	2.9428	96.6485	0.0272
zona 2	6	22.7414	13.5638	62.8367	0.8582
zona 3	5	52.9412	27.0688	19.2423	0.7478
zona 4	7	2.0817	54.2277	43.6906	0.0000
zona5	5	29.9087	65.4401	4.6512	0.0000
zona 6	3	31.9808	38.9893	28.7348	0.2951
zona 7	12	18.5095	67.0852	14.4053	0.0000
zona 8	7	15.2720	62.4483	22.2624	0.0172
zona 9	3	23.4428	34.5980	41.9592	0.0000
zona 10	6	68.8063	16.9329	13.7090	0.5518
zona 11	7	34.6050	21.0131	25.0990	19.2829
zona 12	13	12.1344	30.3360	47.5681	9.9616



*Ilustración 12. Porcentaje de cada tipo de cobertura de suelo en las doce zonas de mayor densidad kernel*

Las zonas con mayor densidad de quemas que presentaron mayor dominancia de páramo son la zona 1, 2, 9 y 12, mientras que las zonas 4-8 presentaron mayor dominancia de cultivos y las zonas 3 y 10 presentaron mayor dominancia de vegetación leñosa.



### 6.3 Comportamiento de los incendios forestales en la cuenca del río Paute

Se encontró que la distancia a la cual las quemas identificadas forman conglomerados es de 20 Km. Las variables que estuvieron asociadas significativamente con la ocurrencia de quemas fueron: 1. La distancia promedio al valor de elevación más cercano, 2. La distancia a la vía más cercana, 3. La distancia a los ecosistemas intervenidos y 4. La elevación promedio (tabla 4); sin embargo no fueron suficientes para generar un modelo de predicción de quemas.

*Tabla 4. Resúmenes de significancia y multicolinealidad de las variables determinadas*

Variable	Resumen de significancia de las variables			Resumen de Multicolinealidad		
	% Significancia	% Negativo	% Positivo	VIF	Violaciones	Covariables
Valor de elevación más cercano	87.5	0	100	2	0	-----
Distancia a la vía más cercana	25	0	100	1.8	0	-----
Distancia a los ecosistemas intervenidos	25	88	12.5	1.7	0	-----
Elevación promedio	25	0	100	2.4	0	-----

*Fuente: ArcGIS 10.1*

*Los requisitos de la regresión de mínimos cuadrados ordinarios considerados para la obtención de estas variables son los siguientes:*

- Valor mínimo del índice de Moran: 0.1
- Valor mínimo del estadístico de Jarque-Bera: 0.1
- Valor máximo del factor de inflación de la varianza (VIF): 7.5
- Valor-p máximo: 0.05
- Valor mínimo de R<sup>2</sup> ajustado: 0.5



Como se puede observar en la tabla 4, estas variables presentan un porcentaje de significancia estadística considerable y el factor de inflación de la varianza ( $VIF$ )<sup>7</sup> no sobrepasa el valor de 7.5 (no existe multicolinealidad), por lo tanto estas variables son buenos indicadores de la ubicación de las quemas.

A pesar de no contar con un número óptimo de variables se aplicó la herramienta de Regresión Geográficamente Ponderada para observar el gráfico de residuales estándar (ilustración 13).

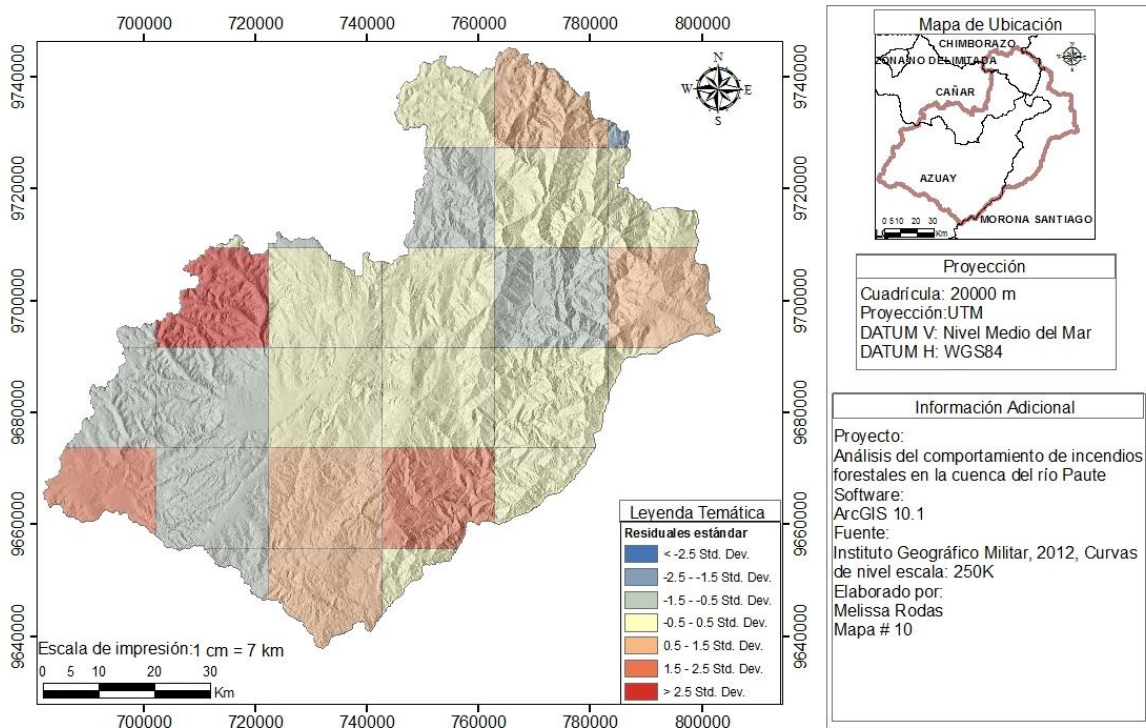


Ilustración 13. Mapa de residuales estándar

Los resultados de la regresión geográficamente ponderada con las cuatro variables determinadas mostraron predicciones demasiado generalizadas, se puede ver en la ilustración 12 una alta autocorrelación espacial por el tamaño y poca variabilidad de las predicciones, lo cual es indicativo de la deficiencia de variables para la generación de un modelo.

<sup>7</sup> El factor de inflación de la varianza ( $VIF$ ) cuantifica cuan inflada es la varianza. El error estándar por lo tanto la varianza de los coeficientes estimados se infla cuando existe multicolinealidad (The Pennsylvania State University, 2015).



## Capítulo VII. CONCLUSIONES

En la cuenca del río Paute, según los resultados de este estudio se registraron un total de 141 quemas entre el período 2010-2014 (exceptuando 2012), que corresponden a una superficie total de 21.38 Km<sup>2</sup>. La mayor parte de estas zonas quemadas están localizadas en áreas de bosque y vegetación protectora (ABVP), por ello podemos decir que las áreas más importantes en cuanto a biodiversidad y retención hídrica de la cuenca del Paute son las que se están quemando. Aunque el número de quemas aumentó en los años analizados, la superficie del área quemada disminuyó casi a la mitad.

Las variables que estuvieron significativamente asociadas a las quemas fueron: (1) el valor de elevación más cercano, (2) la distancia promedio de las quemas a las vías, (3) la distancia promedio de las quemas a un ecosistema intervenido y (4) la elevación promedio.

Según los resultado del estudio las zonas de Áreas de Bosque y Vegetación Protectora más afectadas por las quemas fueron: (1) la parte norte de Moya-Molón, (2) noreste de Guarongo, (3) suroeste de Sunsun-Yanasacha, (4) Yanuncay-Irquis, (5) oeste de Machángara-Tomebamba, (6) noroeste de Allcuqui y (7) norte de Dudas-Mazar.

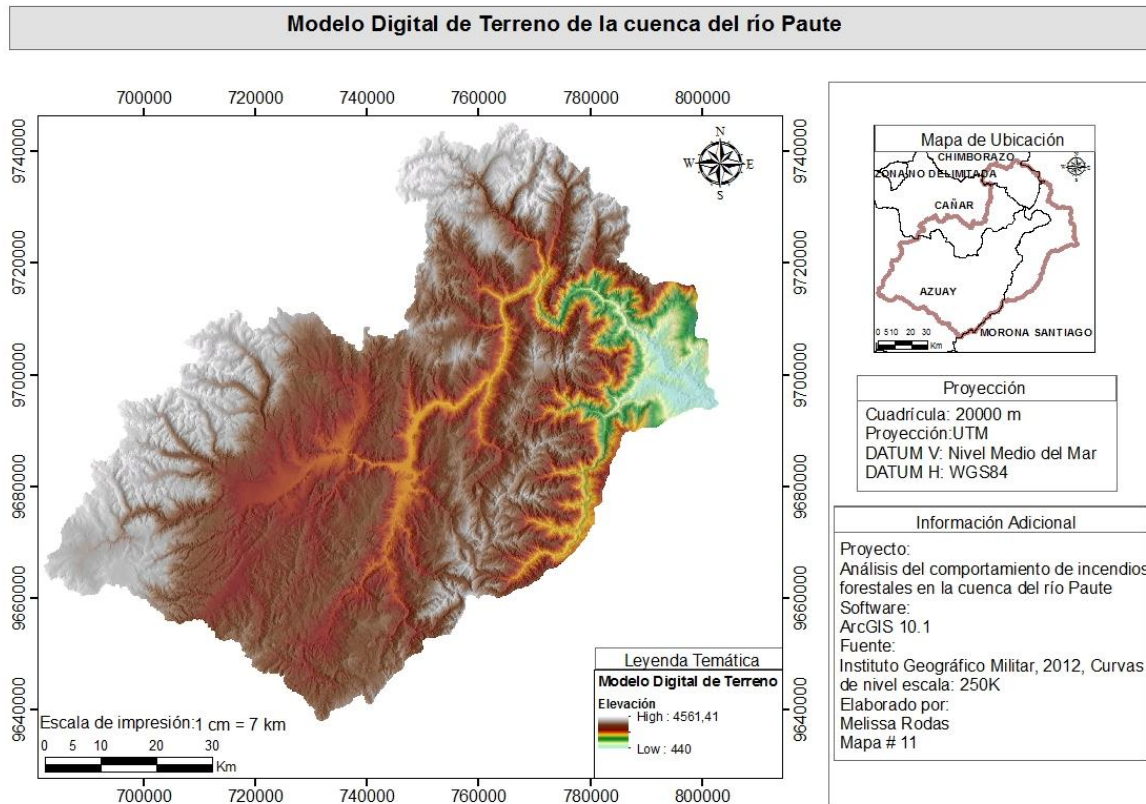
Como sugerencias se recomienda realizar un seguimiento a las zonas afectadas para verificar si existe regeneración o degradación, y el tipo de cobertura vegetal afectada. Se sugiere también realizar un análisis de la relación que pueda existir entre los conflictos de tenencia de la tierra y los incendios forestales, así como las variables socioeconómicas.

También recomiendo realizar un análisis que incluya quemas de menor superficie (utilizando imágenes de mayor resolución espacial u otras técnicas de detección) para identificar si existe variación o similitud con los resultados del presente estudio ya que pueden existir variaciones dependiendo de la escala utilizada.



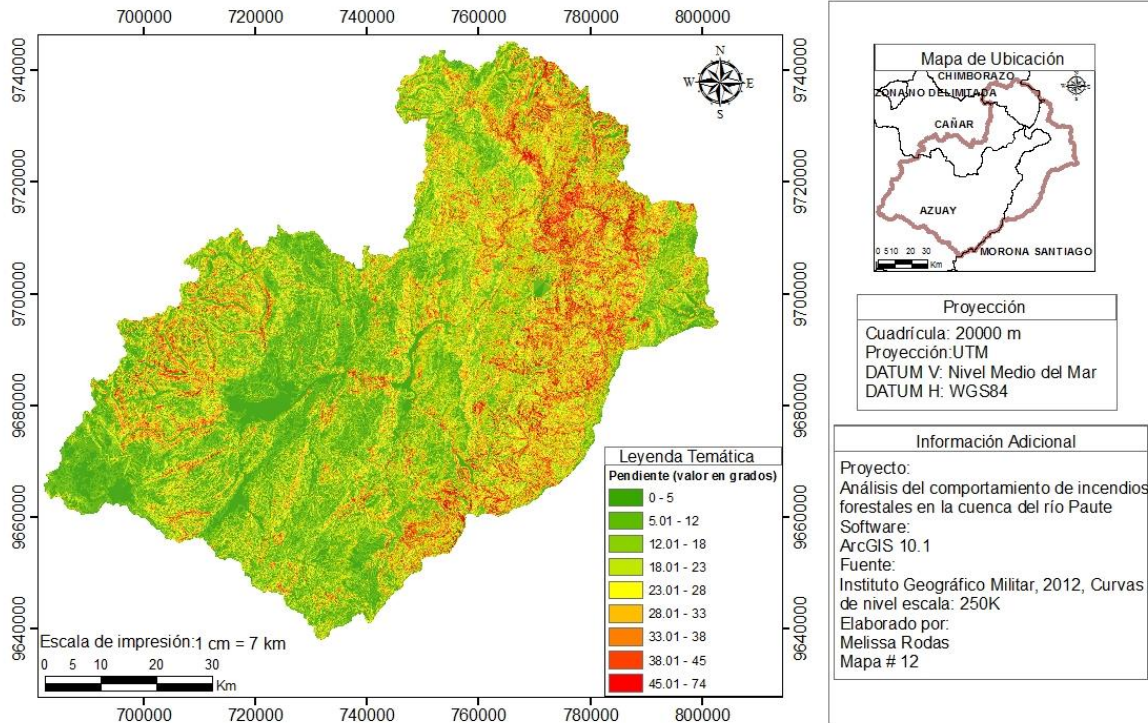
## ANEXOS

### Anexo 1. Zona de estudio





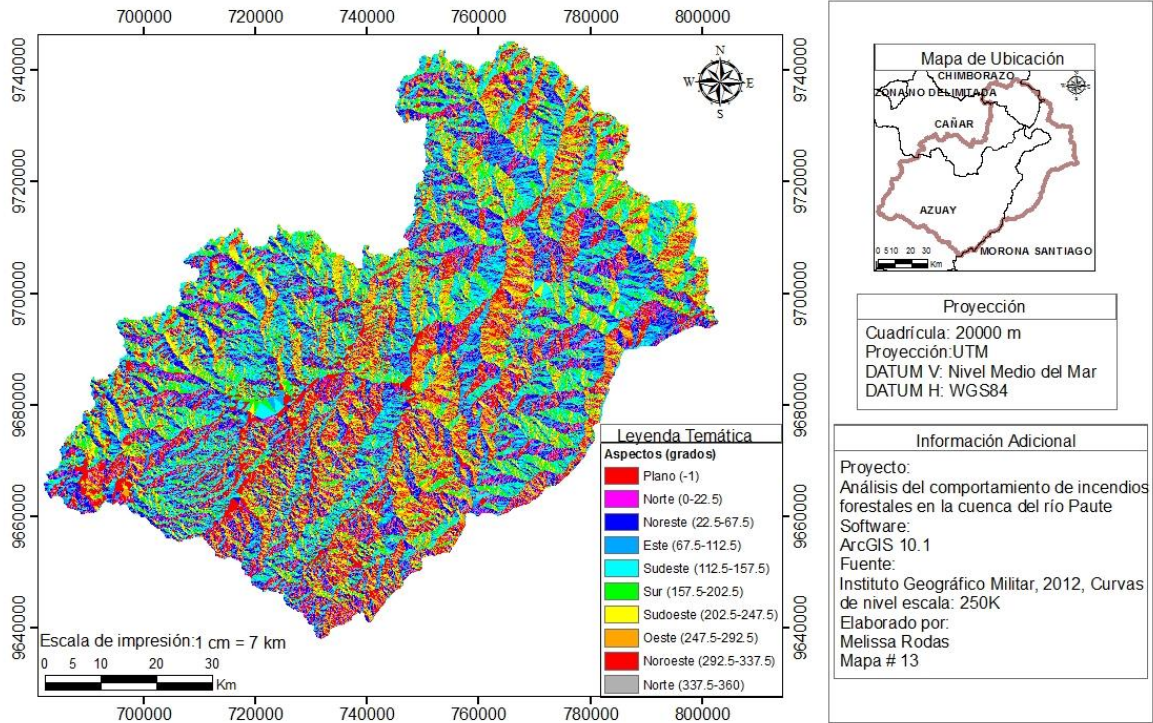
**Mapa de pendientes de la cuenca del río Paute**







**Mapa de aspectos de la cuenca del río Paute**





## Anexo 2. Centroides obtenidos de las quemas

Número de quema	Área (Km <sup>2</sup> )	Latitud (m)	Longitud (m)	Año
Quema_1	0.0414	9743839.0155	764741.8233	2010
Quema_2	0.0458	9742823.6506	763360.2730	2010
Quema_3	0.0705	9740925.3128	754990.6023	2010
Quema_4	0.5263	9740083.9512	757600.0245	2010
Quema_5	0.1230	9737265.2062	751109.7768	2010
Quema_6	0.1015	9736532.2486	750023.0738	2010
Quema_7	0.1439	9735379.7900	749172.5967	2010
Quema_8	2.4174	9733912.7761	771233.0721	2010
Quema_9	0.2251	9733816.6358	769282.6661	2010
Quema_10	0.0428	9733811.9454	768616.9913	2010
Quema_11	0.0907	9733450.5257	768351.6871	2010
Quema_12	0.0275	9732834.3439	768159.8644	2010
Quema_13	0.0948	9731799.9561	749057.5031	2010
Quema_14	0.6302	9729728.8748	756314.4663	2010
Quema_15	0.7841	9679169.9493	695067.5430	2010
Quema_16	0.1020	9672171.8676	752950.3555	2010
Quema_17	0.2796	9671302.2349	753831.9379	2010
Quema_18	0.0563	9671361.4574	752897.6399	2010
Quema_19	0.0377	9670005.3967	754850.8981	2010
Quema_20	0.1780	9668375.3827	754186.1240	2010
Quema_21	0.1124	9668046.8331	754825.9916	2010
Quema_22	0.0295	9665883.4213	698873.6534	2010
Quema_23	0.3730	9665490.8599	701012.8243	2010
Quema_24	0.3287	9665490.3358	689726.1359	2010
Quema_25	0.0443	9665260.5530	698540.5071	2010
Quema_26	0.1127	9664517.9196	709024.8609	2010
Quema_27	0.1073	9664603.4202	689311.2341	2010



Quema_28	0.0826	9662696.0049	698248.7133	2010
Quema_29	0.0461	9661199.3497	700227.2820	2010
Quema_30	0.0373	9660820.4585	700919.5027	2010
Quema_31	0.0318	9660351.4943	700361.4358	2010
Quema_32	0.1123	9659224.1089	751630.6120	2010
Quema_33	0.0526	9658547.2626	702799.0888	2010
Quema_34	0.2650	9654080.3159	737604.4830	2010
Quema_35	0.0448	9653809.6379	715343.8892	2010
Quema_36	1.4120	9652716.8044	739208.5318	2010
Quema_37	0.0423	9740450.3705	763543.6401	2013
Quema_38	0.0279	9737645.1749	755935.8090	2013
Quema_39	0.0450	9722079.1620	750162.3380	2013
Quema_40	0.1944	9721588.7009	750368.3269	2013
Quema_41	0.0324	9715135.2287	748864.4380	2013
Quema_42	0.0306	9714352.6796	750656.3498	2013
Quema_43	0.0270	9713251.5620	764739.9380	2013
Quema_44	0.1521	9712878.7691	764456.0208	2013
Quema_45	0.0504	9709881.9549	722395.1523	2013
Quema_46	0.0288	9708658.2495	763176.0005	2013
Quema_47	0.0513	9707167.7725	714774.0433	2013
Quema_48	0.1017	9706360.2877	778022.5575	2013
Quema_49	0.0639	9704696.0972	717816.7267	2013
Quema_50	0.0423	9704158.6684	750584.2784	2013
Quema_51	0.0288	9701619.4995	707165.0630	2013
Quema_52	0.0540	9701487.5620	706643.9380	2013
Quema_53	0.0954	9700888.3733	706779.7682	2013
Quema_54	0.0279	9699109.6910	761567.0993	2013
Quema_55	0.0531	9698828.3078	709430.9211	2013
Quema_56	0.0648	9698786.4787	709022.7713	2013
Quema_57	0.0369	9694467.9522	747327.0600	2013



Quema_58	0.0288	9688295.7495	708394.1255	2013
Quema_59	0.0441	9687884.3783	709414.1829	2013
Quema_60	0.0279	9687773.5620	756637.4219	2013
Quema_61	0.1197	9685917.1710	743834.0433	2013
Quema_62	0.0324	9684676.8953	732785.2713	2013
Quema_63	0.0423	9684689.9450	742891.5125	2013
Quema_64	0.0324	9684619.3953	746185.2713	2013
Quema_65	0.0657	9684230.6853	738000.1572	2013
Quema_66	0.2376	9677461.1756	755319.3244	2013
Quema_67	0.3465	9677576.6010	711224.6133	2013
Quema_68	0.2007	9676693.8759	698227.4089	2013
Quema_69	3.0555	9673240.2188	697645.1368	2013
Quema_70	0.0297	9671559.0166	745083.7562	2013
Quema_71	0.0378	9670990.7049	696573.3666	2013
Quema_72	0.0396	9670632.6529	743483.9835	2013
Quema_73	0.0279	9669271.3039	718049.6799	2013
Quema_74	0.1008	9666778.6513	753964.5273	2013
Quema_75	0.0324	9666591.0620	744243.6047	2013
Quema_76	0.0279	9665635.4975	741987.7445	2013
Quema_77	0.0477	9665095.8262	743539.1078	2013
Quema_78	0.0351	9665206.6389	742614.2457	2013
Quema_79	0.0558	9663716.4652	739235.0025	2013
Quema_80	0.0297	9663295.3802	738468.3016	2013
Quema_81	0.0342	9662946.1936	738565.8854	2013
Quema_82	0.0684	9662030.0094	735814.1748	2013
Quema_83	0.0360	9661838.5620	743076.9380	2013
Quema_84	0.3726	9661776.8229	736403.0250	2013
Quema_85	0.0315	9660899.5620	737392.7951	2013
Quema_86	0.0279	9651787.1104	725920.3251	2013
Quema_87	0.1413	9650902.2244	732187.6068	2013



Quema_88	0.1440	9649490.5620	739692.9380	2013
Quema_89	0.4131	9645842.3202	741047.6896	2013
Quema_90	0.0378	9743821.4191	768535.7143	2014
Quema_91	0.1188	9743102.8802	753814.0909	2014
Quema_92	0.1368	9741327.7067	772563.7500	2014
Quema_93	0.0504	9741191.2406	767802.3214	2014
Quema_94	0.0972	9741158.2842	761557.2222	2014
Quema_95	0.2961	9740728.3948	769051.7325	2014
Quema_96	0.0360	9740986.8120	773441.2500	2014
Quema_97	0.0342	9740935.9304	772485.0000	2014
Quema_98	0.0693	9740963.1724	768180.3896	2014
Quema_99	0.0342	9740357.2462	768701.0526	2014
Quema_100	0.0360	9739294.0620	762432.7500	2014
Quema_101	0.2034	9737585.9071	759862.9646	2014
Quema_102	0.1251	9736018.7419	753258.3453	2014
Quema_103	0.0387	9735063.3294	772250.9302	2014
Quema_104	0.0657	9731820.1373	782261.5068	2014
Quema_105	0.0324	9731308.5620	784115.0000	2014
Quema_106	0.0306	9712775.9149	764590.5882	2014
Quema_107	0.0900	9710809.6620	716262.0000	2014
Quema_108	0.2223	9709996.7604	717522.9960	2014
Quema_109	0.2709	9709603.0969	715326.3787	2014
Quema_110	0.0675	9709371.9620	718437.6000	2014
Quema_111	0.0468	9708578.5620	763780.3846	2014
Quema_112	0.5247	9706215.6889	713106.1750	2014
Quema_113	0.0477	9706247.9016	712670.3774	2014
Quema_114	0.0495	9705961.1984	708349.6364	2014
Quema_115	0.0369	9702229.1718	711448.5366	2014
Quema_116	0.0423	9702072.7109	709337.2340	2014
Quema_117	0.0378	9701752.8477	710369.2857	2014



Quema_118	0.0549	9699540.9391	706678.0328	2014
Quema_119	0.0288	9699422.9370	706931.2500	2014
Quema_120	0.0432	9697616.0620	704381.8750	2014
Quema_121	0.0990	9697598.0166	706214.7273	2014
Quema_122	0.0279	9696763.8846	709148.7097	2014
Quema_123	0.0342	9695592.5094	700744.7368	2014
Quema_124	0.0378	9694605.7049	698775.7143	2014
Quema_125	0.0297	9693421.7438	695780.0000	2014
Quema_126	0.0432	9686719.8120	730595.6250	2014
Quema_127	0.2610	9683975.1482	690779.7931	2014
Quema_128	0.0387	9682841.0039	692065.8140	2014
Quema_129	0.0432	9676800.4370	698188.7500	2014
Quema_130	0.0333	9672382.7512	697201.6216	2014
Quema_131	0.0351	9671619.7158	686949.2308	2014
Quema_132	0.0387	9671025.1899	687593.0233	2014
Quema_133	0.0468	9670708.1774	687160.3846	2014
Quema_134	0.0594	9665809.9256	740099.0909	2014
Quema_135	0.0405	9664037.5620	738822.0000	2014
Quema_136	0.0792	9663765.0393	683066.9318	2014
Quema_137	0.1458	9662299.1176	754512.2222	2014
Quema_138	0.0522	9659490.2861	750830.1724	2014
Quema_139	0.0963	9654783.0947	739912.7103	2014
Quema_140	0.0369	9654758.9279	739678.5366	2014
Quema_141	0.1935	9652132.5853	738306.5581	2014



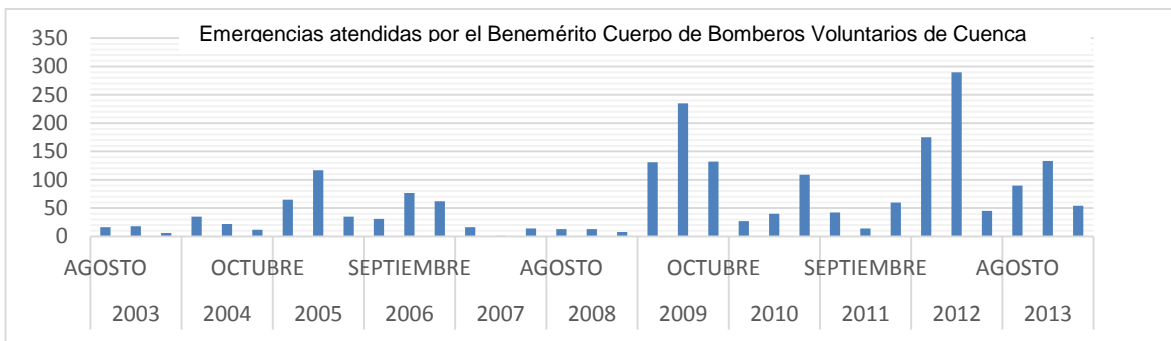
### Anexo 3. Datos entregados por el Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca

Se tabularon los datos de los incendios forestales entregados por el Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca y como se puede ver en la tabla a continuación, los meses de Agosto, Septiembre y Octubre son los meses con mayor cantidad de eventos.

TABLA ELABORADA A PARTIR DE LAS ESTADÍSTICAS DE EMERGENCIAS ATENDIDAS POR INCENDIOS FORESTALES DEL BENEMÉRITO CUERPO DE BOMBEROS VOLUNTARIOS DE CUENCA													
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL ANUAL
2003	8	8	4	5	6	7	8	16	18	6	9	4	99
2004	26	17	8	13	6	17	15	35	22	12	13	9	193
2005	18	8	5	1	8	16	36	65	117	35	35	14	358
2006	16	7	3	7	26	16	15	31	77	62	7	sin datos	267
2007	6	5	8	1	2	2	10	16	1	14	7	11	83
2008	15	2	1	3	1	12	10	13	13	8	9	16	103
2009	15	1	25	9	6	11	20	131	235	132	101	17	703
2010	30	23	17	8	6	5	11	27	40	109	54	14	344
2011	21	6	17	3	10	9	7	42	14	60	32	8	229
2012	5	4	5	5	11	56	130	175	290	45	27	27	780
2013	34	7	21	76	28	22	51	90	133	54	75	64	655

Fuente: Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca

En el siguiente gráfico se ha graficado el número de eventos atendidos por el Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca y se puede observar el número de eventos en los meses con mayor número de quemas con mayor claridad.



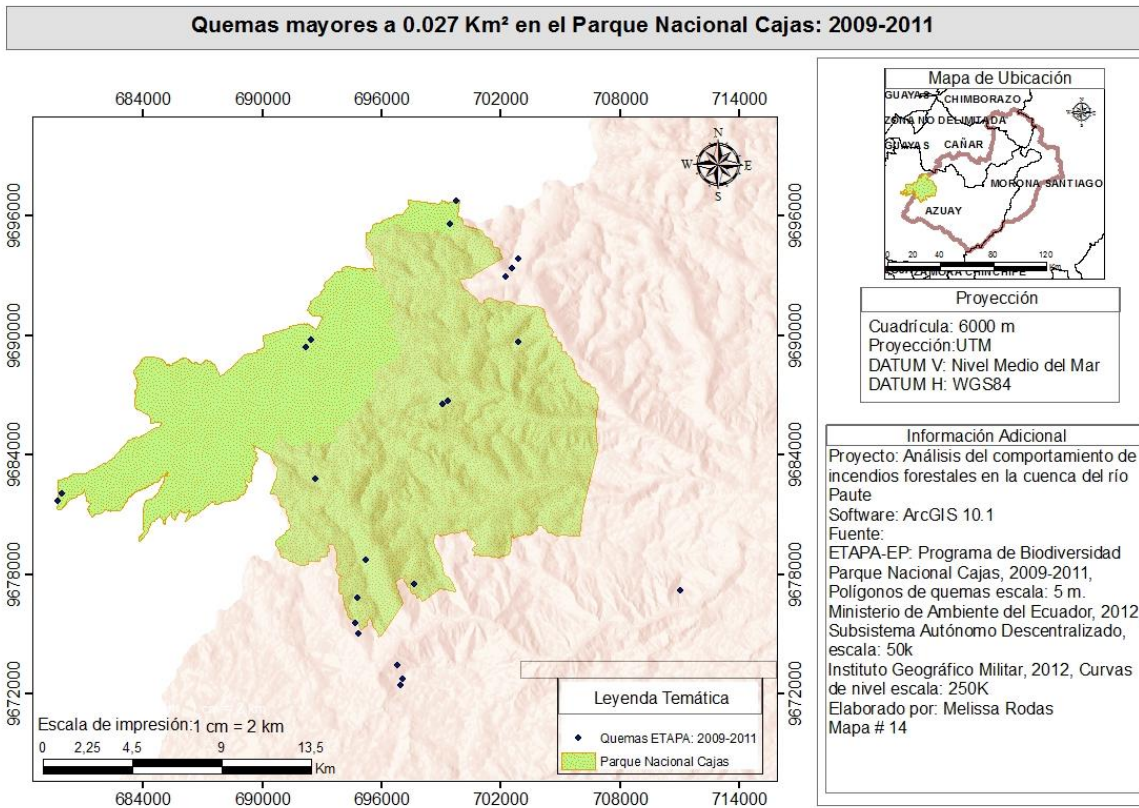
Fuente: Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca

En este gráfico se observa un incremento en los eventos desde el 2003 al 2013. Se ha optado por incluir esta información ya que se puede notar un aumento general en el número de eventos.



### Anexo 4. Mapa y tabla de Quemas detectadas en el Parque Nacional Cajas y zonas aledañas

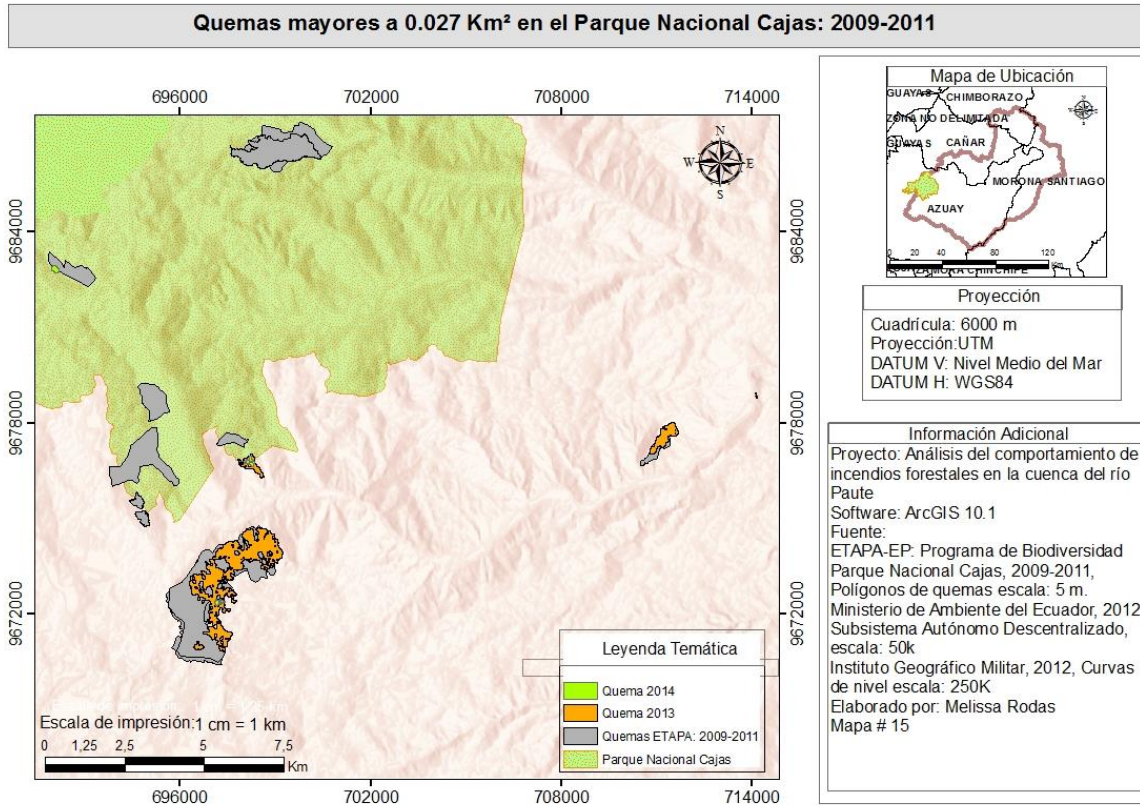
En el mapa a continuación se muestran las quemas detectadas en el Parque Nacional Cajas y zonas aledañas elaborados a partir de información proporcionada por la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento –ETAPA EP







En el siguiente mapa se muestran las quemas mayores a 0.027 Km<sup>2</sup> detectadas en el Parque Nacional Cajas y zonas aledañas (2009-2011) con los polígonos de las quemas detectadas en este estudio sobrepuestos





En la siguiente tabla se muestran los *centroides de las quemas mayores a 0.027 Km<sup>2</sup> identificadas por ETAPA* (Elaboración propia utilizando polígonos entregados por ETAPA).

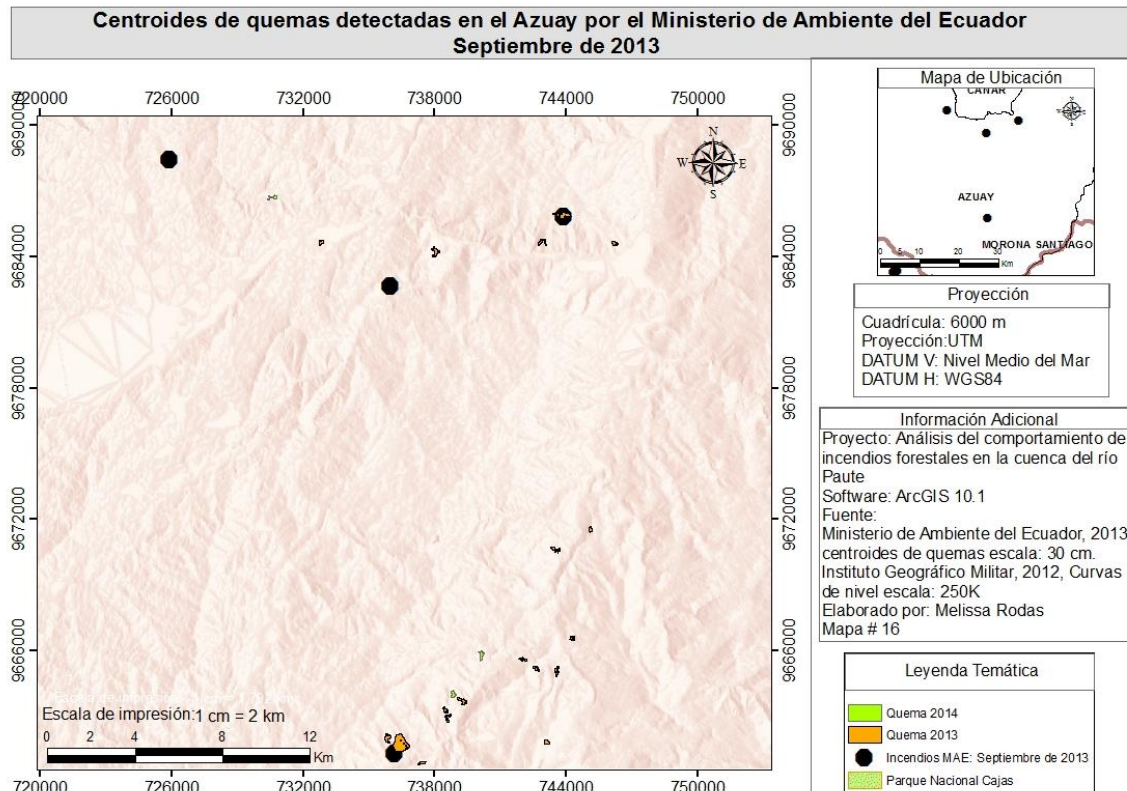
Número de quema Parque Nacional Cajas	Área (Km <sup>2</sup> )	Latitud (m)	Longitud (m)	Año
1	0.0978101	9673441.33133	696760.909403	2009-2011
2	0.134356	9675028.84812	694829.166766	2009-2011
3	0.116581	9675545.71801	694663.864239	2009-2011
4	0.197174	9689392.68124	692171.39405	2009-2011
5	0.197168	9689765.94004	692416.659014	2009-2011
6	0.404058	9692978.94662	702212.472079	2009-2011
7	0.521483	9693406.2383	702556.391989	2009-2011
8	0.337514	9693849.96919	702864.129276	2009-2011
9	0.0736933	9695582.13839	699391.869493	2009-2011
10	0.41119	9696764.28745	699732.325196	2009-2011
11	4.90924	9672423.40022	696944.113445	2009-2011
12	0.712664	9678721.85086	695161.326594	2009-2011
13	0.341042	9682047.51937	679913.800307	2009-2011
14	0.341053	9681679.44656	679671.545142	2009-2011
15	0.242191	9677487.50785	697616.591557	2009-2011
16	0.588165	9682784.28904	692620.820468	2009-2011
17	2.34227	9686715.56879	699316.003525	2009-2011
18	1.72087	9686555.50517	699025.283773	2009-2011
19	0.122908	9689694.73967	702869.711002	2009-2011
20	1.63267	9676823.29274	694786.247296	2009-2011
21	0.199943	9689761.88894	692414.185428	2009-2011
22	0.310732	9677194.94073	710989.0731	2009-2011
23	5.44724	9672756.10126	697055.026346	2009-2011

Fuente: Programa de biodiversidad Parque Nacional Cajas – ETAPA EP.



### Anexo 5. Centroides de quemas detectadas en el 2013 por el Ministerio de Ambiente del Ecuador en el área de estudio

Como se puede ver en el mapa a continuación, dos de las cuatro quemas detectadas por el ministerio del Ambiente coinciden con las quemas identificadas en el presente estudio. Las otras dos zonas no se identificaron, posiblemente son quemas de menor superficie que aquellas analizadas en el presente estudio.





En la tabla a continuación se muestran los centroides de las quemas identificadas por el Ministerio de Ambiente del Ecuador en septiembre del 2013

Número de quema Azuay (MAE)	Latitud (m)	Longitud (m)	Año
1	9688437.4221	725886.7645	2013
2	9682667.7199	735996.7218	2013
3	9661319.7342	736178.1680	2013
4	9685860.6300	743899.1407	2013

Fuente: Ministerio de Ambiente del Ecuador



## BIBLIOGRAFÍA Y OTRA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA CITADA

- Ávila-Flores, D., Pompa-García, M., y Vargas-Pérez, E. (2010). Análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XVI(2), 253-260. doi:10.5154/r.rchscfa.2009.08.028
- Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca. (n.d.). Los incendios forestales. Recuperado 6 Mayo 2014, de <http://www.bomberos.gob.ec/informacion-tecnica>
- Cabrera, S. (2012). *Plan participativo para la prevención, control y liquidación de incendios forestales en la provincia del Azuay* (1st ed.). Cuenca, Ecuador: Dirección provincial del Azuay.
- Camarero, J. J., & Rozas Ortiz, V. F. (2006). Técnicas de análisis espacial de patrones de superficies y detección de fronteras aplicadas en ecología forestal. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 15(1), 67-83.
- Castillo, M., Pedernera, P., Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA*, 19 (3 y 4), 44-53. Recuperado de: Laboratorio de Incendios forestales. Universidad de Chile. Recuperado de: [http://linfor.forestaluchile.cl/wp-content/uploads/2014/03/ID-05-2003-Incendios-forestes-y-M.amb\\_.pdf](http://linfor.forestaluchile.cl/wp-content/uploads/2014/03/ID-05-2003-Incendios-forestes-y-M.amb_.pdf)
- CELEC EP. (2012) Actualización del Estudio de Impacto Ambiental y Plan de Manejo ex post de la Central Paute Molino. CTOTAL Cía. Ltda. Cuenca-Ecuador. Recuperado de: <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/images/stories/noticias/Res%C3%BAmen%20Ejecutivo.pdf>
- CGPaute. Plan maestro de la cuenca del río Paute. (2009). Gabinete Hisoano de Ingeniería (GHI) e Iberinsa-Caminosca y Canales C.Ltda. Cuenca-Ecuador.
- Chasco, C. (2003). Métodos gráficos del análisis exploratorio de datos espaciales. *Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.*



- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental* (pp. 344,577-580). Barcelona: Ariel.
- Columba Tallana, M. J., & Quisilema Ron, W. A. (2013). Artículo Científico- Determinación de áreas vulnerables a incendios forestales y cálculo de probabilidad de ocurrencia mediante lógica fuzzy aplicando herramientas geoinformáticas, en el Distrito Metropolitano de Quito.
- Cordero-Dominguez, I. (2013). *Evaluación de la gestión territorial de la cuenca del río Paute, estrategias y líneas de acción para superarlas. Repositorio Digital. Universidad de Cuenca*. Recuperado 1 Mayo 2015, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/3358/1/TESIS%20.pdf>
- Crespo, P., Céleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., ... & De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos, CONDESAN.
- Diario El Mercurio,. (2014). *Prevenir fuego forestal, duro reto*. Recuperado 30 Junio 2015, de <http://www.elmercurio.com.ec/441945-incendios-forestales-ponen-alerta/#.VZHPHUZPWT8>
- Dull, R., Nevle, R., Woods, W., Bird, D., Avnery, S., y Denevan, W. (2014). The Columbian encounter and the Little Ice Age: Abrupt Land Use Change, Fire, and Greenhouse Forcing. *Annals Of The Association Of American Geographers*, 100(4). doi:10.1080/00045608.2010.502432
- El Telégrafo. Actividad humana, responsable del 90% de incendios forestales. (2013, Septiembre 16). El Telégrafo. Recuperado junio 9, 2015, de <http://telegrafo.com.ec/sociedad/item/actividad-humana-responsable-del-90-de-incendios-forestales.html>
- Etapa.net.ec,. (2015). *MICPA*. Recuperado el 15 Junio 2015, de <http://www.etapa.net.ec/Productos-y-servicios/Gesti%C3%B3n-ambiental/Manejo-de-Cuencas-Hidrográficas/MICPA>
- FONAPA. (2014). *La Cuenca del río Paute*. [online] Recuperado de: <http://www.fonapa.org.ec/index.php/fonapa/la-cuenca-del-rio-paute> [Visitada:



27 Feb 2014].

Fondosdeagua.org,. (2008). *Fondo del Agua para la conservación de la cuenca del río Paute – FONAPA, Azuay – Ecuador, 2008*. Recuperado 15 Junio 2015, de <http://www.fondosdeagua.org/es/fondo-del-agua-para-la-conservacion-de-la-cuenca-del-rio-paute-fonapa-azuay-ecuador-2008>

Galeas, R. (2013). *Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*.

Quito-Ecuador: Ministerio de Ambiente del Ecuador.

Genton, M., Butry, D., Gumpertz, M. y Prestemon, J. (2006). Spatio-temporal analysis of wildfire ignitions in the St Johns River water management district, Florida. *International Journal of Wildland Fire*, [online] 15(1), pp.87. Available at: <http://www.publish.csiro.au/index.cfm> [Visitada 23 Oct. 2014].

Ghobadi, G. J., Gholizadeh, B. y Dashliburun, O. M. (2012). Forest fire risk zone mapping from geographic information system in northern forests of Iran (Case study, Golestan province). *International Journal Of Agriculture and Crop Sciences*, 4 (12), Recuperado de: <http://ijagcs.com/wp-content/uploads/2012/09/818-824.pdf> [Visitada: 30 Mar 2014].

Infraestructura de Datos Espaciales UDA,. (2015). *Visualizadores temáticos – Universidad del Azuay*. Recuperado 26 Mayo 2015, de <http://gis.uazuay.edu.ec/ide/?q=node/4>

Jensen, S. E., & McPherson, G. R. (2008). *Living with Fire : Fire Ecology and Policy for the Twenty-First Century*. Berkeley, CA, USA: University of California Press. Recuperado de <http://www.ebrary.com>. [Visitada: 28 Feb 2014].

Koutsias, N., Martínez-Fernández, J., & Allgöwer, B. (2010). Do factors causing wildfires vary in space? Evidence from geographically weighted regression.



*GIScience & Remote Sensing*, 47(2). Recuperado 2 de julio 2015 de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2747/1548-1603.47.2.221#>.

VZWtaEZPWT8

Landsat.usgs.gov,. (2015). *Using the USGS Landsat 8 Product*. Recuperado 21 Abril 2015, de [http://Landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](http://Landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php)

Manepalli, U. R., Bham, G. H., & Kandada, S. (2011). EVALUATION OF HOTSPOTS IDENTIFICATION USING KERNEL DENSITY ESTIMATION (K) AND GETIS-ORD ( $G_i^*$ ) ON I-630.

Martín, M. y Chuvieco, E. (2001). Propuesta de un nuevo Índice para cartografía de Áreas quemadas: aplicación a imágenes NOAAVHRR y Landsat-TM. *Revista de Teledetección*, [online] 16(10), pp.57-61. Disponible en: <http://www.aet.org.es/?q=revista16-10> [Visitada 23 Oct. 2014].

Ministerio de Ambiente del Ecuador. (2009). Estudio de vulnerabilidad actual a los riesgos climáticos en el sector de los recursos hídricos en las cuencas de los Ríos Paute, Jubones, Catamayo, Chone, Portoviejo y Babahoyo. Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en el Ecuador. Quito-Ecuador. Recuperado de <http://www.pacc-ecuador.org/wp-content/uploads/2013/12/CAMBIO-CLIMATICO-Final.pdf>

Nasi, R., Dennis, R., Maijaard, E., Applegate, G., y Moore, P. (2011). Forest fire y biological diversity. *FAO CORPORATE DOCUMENT*

*REPOSITORY*. Recuperado 7 Junio 2014, de

<http://www.fao.org/docrep/004/y3582e/y3582e08.htm>

National Park Service. (2014). *Wildland fire: Fire In-Depth | U.S. National Park Service*. [online] Recuperado de: <http://www.nps.gov/fire/wildland-fire/learning->





center/fire-in-depth.cfm [Visitada: 26 Feb 2014].

Pérez-Verdín, G., Márquez-Linares, M.A., Cortés-Ortiz, A., y Salmerón-Macías, M. (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de Incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 19(2), 37-58. Recuperado de: Instituto de ecología, A.C. INECOL. Recuperado de: <http://www1.inecol.edu.mx/myb/resumeness/19.2/myb1923758.pdf>

Pezo, D., & Ibrahim, M. (1998). *Sistemas silvopastoriles* (No. 2). Bib. Orton IICA/CATIE. Recuperado 2 de julio de 2015 de: [https://books.google.com.ec/books?hl=en&lr=&id=\\_pYOAQAIAAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=el+pastoreo+de+ganado+remueve+plantas+herbaceas+y+favorece+el+crecimiento+de+plantas+le%C3%B1osas&ots=SXNvAVJIVX&sig=gv5XaAvRpeBLZLC2xQqYEh\\_Rlqw#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=en&lr=&id=_pYOAQAIAAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=el+pastoreo+de+ganado+remueve+plantas+herbaceas+y+favorece+el+crecimiento+de+plantas+le%C3%B1osas&ots=SXNvAVJIVX&sig=gv5XaAvRpeBLZLC2xQqYEh_Rlqw#v=onepage&q&f=false)

Rodríguez, F. D. J., Pompa-García, M., Hernández-Díaz, C., y Juárez-Reyes, A. (2010). Patrón de distribución espacial de la pérdida, degradación y recuperación vegetal en Durango, México. *Universidad de Colima. Avances en Investigación Agropecuaria*, 14(1), 53-65. Recuperado 19 de febrero 2015, de: <http://www.ucol.mx/revaia/portal/pdf/2010/enero/4.pdf>

Romero, A., Aguado, I. y Yebra, M. (2009). CDR Juan Bautista Vazquez - Bases Digitales. [online] Recuperado de: <http://www.tyfonline.com.v.biblioteca.ucuenca.edu.ec/doi/full/10.1080/01431161.2010.532819> [Visitada: 28 Feb 2014].

Rosenshein, L., y Scott, L. (2015). *Spatial-Statistics: Best Practices*. *Media.esri.com*. Retrieved 27 January 2015, from [http://media.esri.com/arcstream/2011/12/903-spatial-statistics-best-practices\\_960.webm](http://media.esri.com/arcstream/2011/12/903-spatial-statistics-best-practices_960.webm)

Saldivia, S. y Rodriguez-Verdú, F. (2007). Variación espacial de Índices espectrales sobre áreas quemadas en Sudamérica. *Cuadernos de investigación geográfica*, [online] 33, pp.39, 54, 55. Disponible en:



<https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/cig/article/view/1188> [Visitada 22 oct. 2014].

Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2001). Impacts of human-caused fires on biodiversity and ecosystem functioning, and their causes in tropical, temperate and boreal forest biomes . CBD Technical Series, [online], pp. 1-22. Disponible en:

[http://www.planta.cn/forum/files\\_planta/cbd\\_technical\\_series\\_5\\_194.pdf](http://www.planta.cn/forum/files_planta/cbd_technical_series_5_194.pdf) [Visitada 20 nov. 2014].

Suárez, R., Aguilar, J., (2013). Repositorio digital ESPE. Identificación de áreas vulnerables a incendios forestales aplicando un modelo de probabilidad y su subsecuente predicción potencial con la metodología de autómatas celulares en el distrito metropolitano de Quito.

The Pennsylvania State University,. (2015). *Detecting Multicollinearity Using Variance Inflation Factors | STAT 501*. Recuperado 28 Junio 2015, de <https://onlinecourses.science.psu.edu/stat501/node/347>

The Columbian Encounter and the Little Ice Age: Abrupt Land Use Change, Fire, and Greenhouse Forcing. (2014). *Annals Of The Association Of American Geographers*, 100 (4), doi:10.1080/00045608.2010.502432 [Visitada: 10 Mar 2014].

Vega Orozco, C., Tonini, M., Conedera, M. y Kanveski, M. (2012). Cluster recognition in spatial-temporal sequences: the case of forest fires.

*Geoinformatica*, [online] 16(4), pp.653-654. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s10707-012-0161-z> [Visitada 22 Oct. 2014].

Villalobos, L. y López, P. (2002). Análisis de la situación de ocurrencia de incendios forestales en la reserva de uso múltiple La Cuenca del Lago Atitlán durante el período 1999-2001., 1-18. Recuperado de:

[http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNACX397.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNACX397.pdf)

Viteri, A., & Cordero, E. V. (2010). Documento de análisis del sector forestal en el contexto de adaptación y mitigación al cambio climático del



sector uso de suelo, cambio de suelo, y silvicultura (forestal) en el Ecuador.  
*P. Cuenca, & V. Cordero, Edits., pp. 7. Recuperado de*  
*[http://www.undpcc.org/docs/National%20issues%20papers/Forestry%20%28mitigation%29/05\\_Ecuador%20NIP\\_forestry%20mitigation.pdf](http://www.undpcc.org/docs/National%20issues%20papers/Forestry%20%28mitigation%29/05_Ecuador%20NIP_forestry%20mitigation.pdf)*  
[Visitada: 10 Jun 2014].

Ward, E., Buytaert, W., Peaver, L., & Wheeler, H. (2011). Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: A water resources perspective. *Advances in Water Resources*, 34(10), 1222-1231

Whelan, R. (1995). *The Ecology of Fire* (1st ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. Recuperado de  
[http://books.google.com.ec/books?hl=en&lr=yid=4bFxAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=fuller+M+Forest+fires:+an+introduction+to+wildland+fire+behavior,+management,+firefighting,+y+prevention.+yots=\\_5DLxztWW&sig=ZfFO\\_KM8iUcQ9nn4w9akl1rKB6c#v=onepage&q=fuller%20M%20Forest%20fires%3A%20an%20introduction%20to%20wildland%20fire%20behavior%2C%20management%2C%20firefighting%2C%20y%20prevention.yf=false](http://books.google.com.ec/books?hl=en&lr=yid=4bFxAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=fuller+M+Forest+fires:+an+introduction+to+wildland+fire+behavior,+management,+firefighting,+y+prevention.+yots=_5DLxztWW&sig=ZfFO_KM8iUcQ9nn4w9akl1rKB6c#v=onepage&q=fuller%20M%20Forest%20fires%3A%20an%20introduction%20to%20wildland%20fire%20behavior%2C%20management%2C%20firefighting%2C%20y%20prevention.yf=false)