

GENERACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA A INCENDIOS FORESTALES APLICANDO LÓGICA FUZZY EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

Quisilema Ron, W.A.¹, Columba Tallana, M.J.², Padilla Almeida, O.V.³, Toulkeridis, T.⁴

Escuela Politécnica del Ejército

Av. Gral. Rumiñahui s/n Sangolquí – Ecuador

www.espe.edu.ec

INTRODUCCIÓN

El área de estudio se encuentra dentro del Distrito Metropolitano de Quito. Sus límites son: al Norte: Provincia de Imbabura. Sur: cantones Rumiñahui y Mejía. Al Este: cantones Pedro Moncayo, Cayambe y Provincia de Napo. Oeste: cantones Pedro Vicente Maldonado, Los Bancos y Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas.

El DMQ durante la época seca es muy susceptible a incendios forestales, cuya intensidad, frecuencia y extensión han aumentado en los últimos años, provocando grandes pérdidas económicas, ecológicas y humanas. Cada año el número de incendios incrementa y la atención por parte del Cuerpo de Bomberos parece no es suficiente; el fuego se propaga rápidamente, destruyendo una gran parte de los pocos bosques forestales todavía existentes.

En el 2009, se perdieron aproximadamente 2700 Ha (Secretaría del Ambiente, DMQ, 2009), mientras que en el 2012 se declara a Quito en emergencia por los incendios forestales y el número de Has afectadas ascienden a 3796 (*Diario El Hoy*, 27 septiembre 2012). Los pocos estudios relacionados en nuestro país respecto a esta problemática han sido insuficientes para ejecutar una verdadera gestión de emergencias frente a este tipo de desastres.

Es por ello que la ocurrencia y sobre todo la recurrencia de los incendios forestales en el DMQ, es una situación preocupante en el ámbito social, ambiental y económico, por lo cual la idea de realizar la siguiente investigación, responde a la necesidad el interés de generar información cartográfica a escalas que puedan ser útiles para las distintas autoridades competentes en el DMQ en la toma de decisiones de prevención y/o mitigación de incendios forestales, además de que la misma metodología a utilizarse en la zona de estudio pueda ser aplicada en otras zonas del país que se ven afectadas por los incendios forestales.

Este proyecto propone determinar las áreas vulnerables a incendios forestales y su cálculo de probabilidad de ocurrencia mediante la metodología de Lógica Fuzzy, generando modelos de la ocurrencia de incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito, que cada época seca es afectado por dicho fenómeno.

METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO

La metodología es desarrollada con el uso de variables meteorológicas, tales como: precipitación, humedad relativa, temperatura y otras variables, como: pendiente, distancia a la red hídrica, distancia a las vías de comunicación y combustibilidad de la cobertura vegetal, que son los parámetros para el estudio de la Lógica Fuzzy.

Obteniéndose así algunos modelos, en donde se definirá cuál de ellos tiene un mejor ajuste acercado a la realidad.

ANÁLISIS DE LAS VARIABLES SEGÚN CASOS DE LA LÓGICA FUZZY

Precipitación: en la variable precipitación existe una relación inversamente proporcional, es decir, que la influencia del agua lluvia en el terreno, provoca menor ocurrencia de incendios forestales.

Humedad relativa: en la variable humedad relativa existe una relación inversamente proporcional, es decir, que la influencia de la humedad, provoca menor ocurrencia de incendios forestales.

Temperatura: en la variable temperatura existe una relación directamente proporcional, es decir que mientras a mayor temperatura exista en el medio, mayor será la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

Distancia a Vías de Comunicación: En dicha variable existe una relación inversamente proporcional, es decir que mientras mayor sea la distancia de una vía, los habitantes se encuentran lejos para poder iniciar un incendio, lo cual tiende a provocar menos incendios forestales.

Distancia a Red Hídrica: Con dicha variable existe una relación directamente proporcional, es decir, que mientras más grande es la distancia a los incendios es mayor la probabilidad de ocurrencia de los mismos.

Pendiente: en la variable pendiente existe una relación directamente proporcional, es decir que mientras a mayor grado de pendiente exista, mayor será la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

Combustibilidad de la vegetación: En esta variable existe una relación directamente proporcional, es decir que mientras mayor sea la combustibilidad, existirá mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

MODELAMIENTO DE LAS VARIABLES

Los diferentes modelos creados, se realizaron en un SIG, mediante operaciones algebraicas, y posteriormente su respectivo análisis. Para la obtención de los modelos se utilizó un software de sistemas de información geográfica, en este caso ArcGIS 9.3 y la herramienta RasterCalculator.

- Modelo de Probabilidad de ocurrencia de Incendios Forestales con Variables Originales

De los raster de las variables, se obtuvo valores de máximo y mínimo (que son valores que el programa genera por default) con lo que se procede a la normalización, que es llevar los valores de la variable original entre 1 y 0, con la siguiente fórmula:

$$N = \frac{Vo}{VM} \quad (1)$$

Donde:

N= Normalización

Vo= Variable Original

VM = Valor Máximo

Después de normalizado, se convirtió a radianes cada variable dependiendo del rango al cual pertenece cada una de ellas.

En los casos 2 y 3, el rango es de 0 a $\frac{\pi}{2}$, por lo que para la conversión a radianes se utiliza la siguiente fórmula:

$$R = N \times 1.5707963268 \quad (2)$$

Donde:

R = Radianes

Se procede a la obtención de las probabilidades del primer modelo, aplicando la función que pertenece a cada variable, con la siguiente fórmula:

$$P = \sin(R) \quad (3)$$

$$P = \cos(R) \quad (4)$$

Donde

P = Probabilidad.

Cabe recalcar, que las ecuaciones (3) o (4) se utiliza dependiendo de la pertenencia de cada variable a su función.

Por último para la obtención del Modelo, se procede a extraer el promedio, que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas.

$$Y = (\text{combustibilidad vegetal} + \text{d. vías} + \text{d. red hídrica} + \text{pendiente} + \text{precipitación} + \text{humedad relativa} + \text{temperatura}) / 7 \quad (5)$$

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo.

- Modelo de Probabilidad de ocurrencia de Incendios Forestales de Percentiles 5 y 10

Para el diez percentil (10%), los valores más cercano y el más lejano, son:

Valor más cercano = 0.1 y Valor más lejano = 0.9

Para el cinco percentil (5%), los valores más cercano y el más lejano, son:

Valor más cercano = 0.05 y Valor más lejano = 0.95

El resultado de la aplicación de estos dos valores, en la ecuación de la recta; sirve para linealizar la dispersión de los incendios forestales; es llevar los valores de los raster de cada variable a valores semejantes entre 0 y 1. La aplicación de la ecuación de la recta es la obtención de la normalización en este modelo.

$$y - y_1 = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} (x - x_1) \quad (6)$$

Las fórmulas para los dos casos de Lógica Fuzzy empleados en este proyecto y aplicadas en la ecuación de la recta, para normalizar las variables son:

Para el Segundo Caso (diez percentil):

$$y = 0.1 + \left(\frac{0.8}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad (7)$$

Y para el Tercer Caso (diez percentil):

$$y = 0.9 - \left(\frac{0.8}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad (8)$$

Para el Segundo Caso (cinco percentil):

$$y = 0.05 + \left(\frac{0.9}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad (9)$$

Y para el Tercer Caso (cinco percentil):

$$y = 0.95 - \left(\frac{0.9}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad (10)$$

Donde:

y = Variable Normalizada

Vo = Variable original

VM = Valor Máximo

Vm = Valor Mínimo

Las ecuaciones (7), (8), (9) y (10) son utilizadas para la normalización, es decir llevar las variables a valores entre 0 y 1.

El proceso es similar al modelo anterior, la conversión a radianes y la obtención de probabilidades.

Se procede a extraer el promedio, que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas.

$$Y = (\text{combustibilidad vegetal} + \text{d. vías} + \text{d. red hídrica} + \text{pendiente} + \text{precipitación} + \text{humedad relativa} + \text{temperatura}) / 7 \quad (11)$$

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los modelos se observa una escala de color determinada, ya que de esta forma se demostró con más claridad qué modelo concuerda con la realidad, es decir la semejanza que existe entre la metodología utilizada.

Cabe aclarar que en los modelos realizados con distintas ecuaciones pero muy semejantes entre ellos, las diferencias son muy escasas. Es decir que, se observa los colores más oscuros en los lugares de alta probabilidad, los mismos que de acuerdo con los puntos de recurrencia de los incendios forestales, concuerdan con la realidad del terreno.

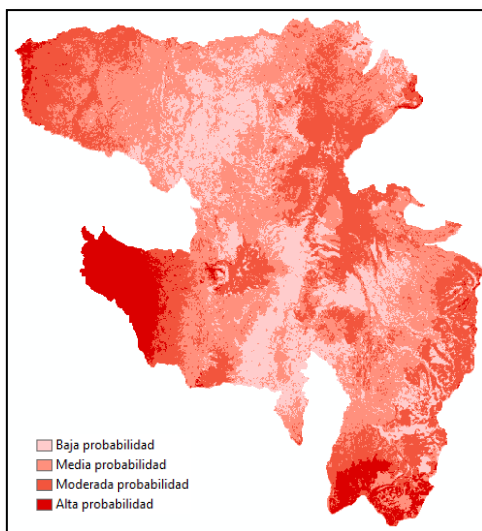


Figura 1. Modelo Óptimo (julio, agosto, septiembre)

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

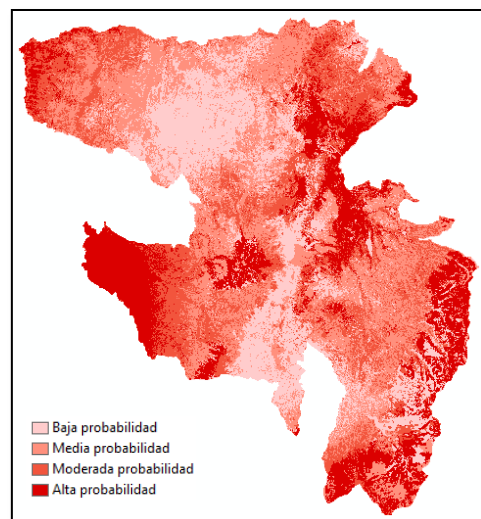


Figura 2. Modelo Óptimo (octubre, noviembre, diciembre)

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

De acuerdo a este cálculo del ajuste, todos los modelos muestran a su forma, la realidad de ocurrencia de incendios forestales, ya que al plantear los casos de Lógica Fuzzy, cada modelo muestra que su variabilidad. Esto permite conocer que los diferentes modelos de incendios forestales, muestran semejanza con la realidad, dependiendo de los valores de desviación estándar de cada uno de ellos, se puede saber qué modelo representa de mejor manera la realidad del terreno.

Finalmente para la época seca de julio a septiembre, el mejor modelo es el modelo1 debido a que tiene una desviación estándar cercana a uno y su ajuste fue el menor de los modelos 2 y 3

Y para la época seca de octubre a diciembre, el mejor modelo es el modelo4 debido a que tiene una desviación estándar cercana a uno y su ajuste fue el menor de los modelos 5 y 6

Tabla. 1. Desviaciones estándar de los modelos de la época seca (julio, agosto, septiembre)
MODELOS DE INCENDIOS FORESTALES

	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
DESVIACION ESTANDAR	0.657428	0.347303	0.525172
AJUSTE	0.342572	0.652697	0.474828

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Tabla. 2. Desviaciones estándar de los modelos de la época seca (octubre, noviembre, diciembre)
MODELOS DE INCENDIOS FORESTALES

	MODELO 4	MODELO 5	MODELO 6
DESVIACION ESTANDAR	0.581162	0.299750	0.310408
AJUSTE	0.418838	0.700250	0.689592

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

CONCLUSIONES

El modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales con las variables originales, determina las áreas vulnerables a incendios forestales y su probabilidad de ocurrencia en la zona estudiada. Ya que la zona en tonos rojos oscuros mostraría la mayor probabilidad y los tonos rojos claros la baja probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en la zona.

La variable de índice de combustibilidad de la cobertura vegetal, interviene como un papel importante debido a que se puede observar que de acuerdo a los mapas de cobertura vegetal realizados por la Secretaria de Ambiente, la más alta probabilidad a incendios forestales se encuentra en los Bosque Secos, Arbustos Secos y Herbazales Secos.

La metodología Fuzzy es una alternativa eficiente en el modelamiento de incendios forestales en la zona, mostrando resultados confiables.

La validación de los modelos muestra que cuando se tiene una desviación estándar cercana a uno y un ajuste cercano a cero, es allí que se obtiene el óptimo modelo en la aplicación de la Lógica Fuzzy.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANDOCILLA, Lorena, (2012), "Implementación del algoritmo de Lógica Fuzzy aplicado a la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el área Monjas–Ferroviaria–La Magdalena– Itchimbia del Distrito Metropolitano de Quito", Tesis de Grado, ESPE.
- BONILLA, Roberto, (2001) "Guía Técnica en control y prevención de Incendios Forestales", Guatemala.
- PADILLA, Oswaldo, (2005) "Cartografía de áreas Quemadas a Escala Local", España
- PADILLA, Oswaldo, (2006) "Fundamento teórico para la modelización de variables ambientales mediante operadores difusos", Revista Geoespacial No.4.
- TARANTOLA et al Valette, (1982) "Inverse problems. quest for information. J. Geophys.", 1982.

Identificación de zonas de recurrencia de incendios forestales mediante análisis multitemporal y aplicación de índices espectrales, en el Distrito Metropolitano de Quito.

Columba Tallana, M.J¹, Quisilema Ron, W.A², Padilla Almeida, O.V³, Toulkeridis, T⁴.

¹Escuela Politécnica del Ejército
Av. Gral. Rumiñahui s/n, Sangolquí, Ecuador.

Introducción

“En el Ecuador los últimos años la problemática de incendios forestales se ha agudizado, ocasionando grandes daños y perjuicios de índole social, económica y ecológica en diferentes provincias en especial aquellas con mayor potencial e incidencia” (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2010), y la gestión de riesgos para la prevención y/o mitigación de incendios forestales es limitada, ya que no existen herramientas de decisión verdaderamente suficientes y útiles que permitan realizar una planificación preventiva y una mejora en la respuesta de atención ante la presencia de este tipo de eventos. Por lo tanto en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) cada época seca es afectado por incendios forestales, los cuales en “más del 90% son originados por actividades humanas, principalmente quemadas agrícolas” (Cuerpos de Bomberos DMQ, 2013), los mismos que “favorecidos por las condiciones climáticas y orográficas, se propagan rápidamente y afectan extensas zonas” (Plan Operativo Forestal, 2012).

El objetivo de la presente investigación es determinar áreas de recurrencia de incendios forestales mediante análisis multitemporal e índices espectrales específicos para áreas quemadas, respondiendo a la necesidad e interés de generar información cartográfica que pueda ser útil para las distintas autoridades competentes en el DMQ en la toma de decisiones de prevención y/o mitigación de incendios forestales, además de que la misma metodología a utilizarse en la zona de estudio pueda ser aplicada en otras zonas del país que se ven afectadas por los incendios forestales.

Área de estudio

El área de estudio comprende todo el Distrito Metropolitano de Quito, ubicado en la provincia de Pichincha, en Ecuador.

Metodología

Se utiliza imágenes satelitales del sensor Landsar TM, ETM+ para los años 1991, 1996, 2000, 2001, 2009, e imágenes Rapideye para el año 2012, proporcionadas por el Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE).

a) Tratamiento Digital de Imágenes Satelitales

Para la interpretación de las imágenes satelitales obtenidas, se debe realizar un tratamiento con anterioridad para determinar las mismas coordenadas geográficas y comparar con una misma unidad de medida, por lo tanto requiere de una corrección geométrica y radiométrica (Chuvieco 2002), este proceso se realiza especialmente para las imágenes que se utilizan en análisis multitemporal.

b) Identificación y Extracción de Áreas Quemadas

Índices Espectrales

Se utilizaron distintos índices espectrales para identificar el daño de la vegetación ocasionados por el fuego.

Se utilizan 3 índices espectrales NVDI (Normalized Differenced Vegetation Index), IAQ (Índice de Área Quemada) y NBR (Normalized Burnt Ratio).

NVDI (Índice Normalizado de Variación de la Vegetación): Permite identificar y estimar el estado de salud de la vegetación, donde $\rho_{i,IRC}$ y $\rho_{i,R}$ indican las reflectividades del píxel i en la banda del infrarrojo cercano y del rojo, respectivamente.

$$NDVI_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R}} \quad (1)$$

NBR (Normalized Burn Ratio): Se trata de un cociente normalizado tipo NDVI, pero utilizando información del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta (Rogan y Franklin, 2001), este índice no fue aplicado a las imágenes Rapideye, ya que no tienen la banda del infrarrojo de onda corta, donde $\rho_{i,IRC}$ es la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano y $\rho_{i,SWIR}$ es la reflectividad en la banda del infrarrojo medio de onda corta.

$$NBR_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,SWIR}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,SWIR}} \quad (2)$$

IAQ (Índice de Área Quemada): Específicamente diseñado para la cartografía de área quemada, basándose en el comportamiento espectral de los materiales carbonizados y de las cenizas, producidos tras un incendio. El IAQ se basa en el concepto de distancia euclidiana de cada píxel de la imagen a un punto de convergencia definido en un espacio bidimensional al que tendería a aproximarse el comportamiento espectral de los píxeles recientemente quemados (Martín, 1998). Donde ρ_{nr} y ρ_r indican las reflectividades de las bandas del infrarrojo cercano y del rojo, respectivamente y ρ_{cr} y ρ_{cnr} son los denominados valores de convergencia para áreas recientemente quemadas. Se han definido como 0.1 y 0.06, respectivamente.

$$BAI = \frac{1}{(\rho_{cr} - \rho_r)^2 + (\rho_{cnr} - \rho_{nr})^2} \quad (3)$$

Análisis Multitemporal

Se realiza también una comparación multitemporal a la diferencia de los tres índices aplicados en dos fechas distintas en el mismo año.

Una vez aplicado los índices se identifican las zonas quemadas y se extrae la información mediante digitalización considerando únicamente el IAQ, la diferencia multitemporal de IAQ y la clasificación no supervisada aplicada al IAQ.

RESULTADOS

Índices Espectrales

Los índices espectrales que se aplicaron permiten discriminar las áreas afectadas por incendios forestales, el IAQ (Índice de Área Quemada), es el índice que muestra mejores resultados, las zonas quemadas muestran un color blanco bien definido.

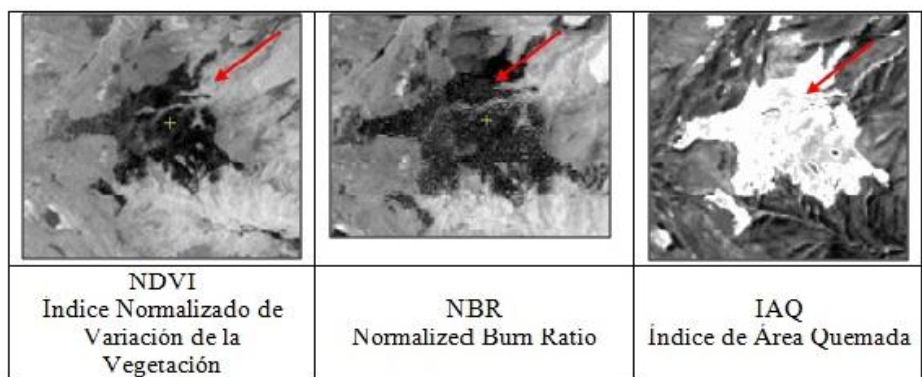


Figura 1. Comparación Índices Espectrales

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Áreas de Recurrencia a Incendios Forestales

Una vez extraídas las áreas quemadas se determina que las zonas administrativas La Delicia, Eloy Alfaro y Tumbaco, presentan una mayor recurrencia de incendios forestales. La parte noroccidental de La Delicia y de la Eloy Alfaro no se registran datos debido a la espesa capa de nubes de esas zonas.

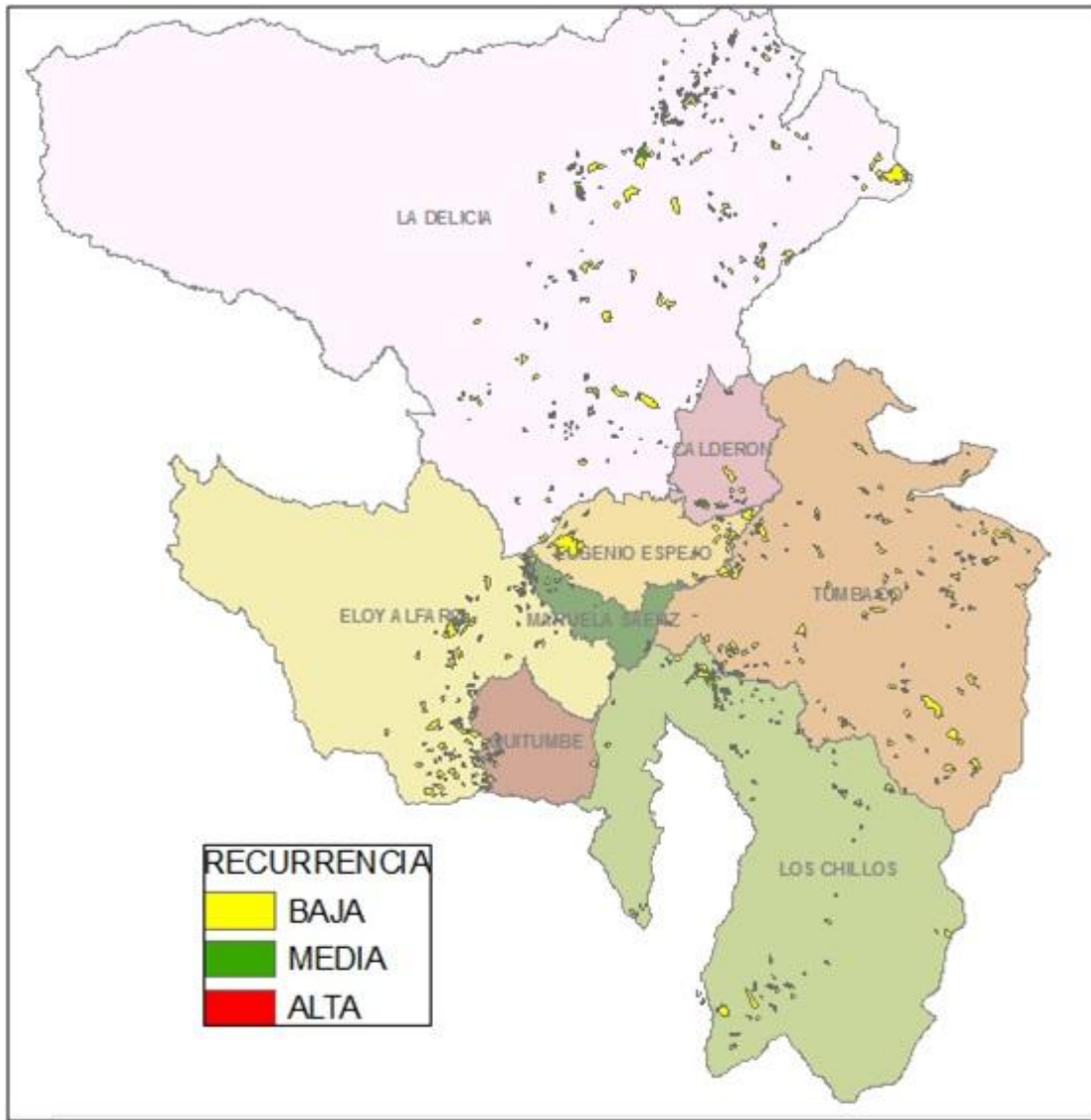


Figura 2. Recurrencia de Incendios Forestales
Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

CONCLUSIONES

En el análisis de imágenes satelitales es importante realizar las correcciones geométricas y radiométricas, ya que se necesita una homogenización relativa de los valores de reflectividad, para trabajar con una misma unidad especialmente cuando se compara imágenes de distintas fechas y sensor.

Al comparar los índices espectrales post- incendio, el IAQ y la diferencia de IAQ en análisis multitemporal, mostraron mejores resultados al discriminar las áreas quemadas.

Es preciso indicar que fue necesario realizar la digitalización de los incendios, ya que a pesar de que se lograron buenos resultados al identificar áreas quemadas con el IAQ, hubieron áreas que presentaron similares características por lo cual el programa no pudo extraer solamente las zonas afectadas por incendios forestales.

Las zonas administrativas La Delicia, Eloy Alfaro y Tumbaco, presentan una mayor recurrencia de incendios forestales, los mismos que afectan principalmente a las parroquias rurales de estas zonas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BERNIS, Víctor; BETANCOURT; Franz, (2006), “Análisis multitemporal y generación del escenario prospectivo de cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en el Parque Nacional Llanganates”. Tesis de Grado, ESPE
- CHUVIECO, E.; MARTÍN, M., (2004), “Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales” Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- CHUVIECO, Emilio, (2002), “Teledetección Ambiental, La observación de la Tierra desde el espacio”, primera edición, Ariel Ciencia, España.
- CHUVIECO, Emilio, (2008), “Satellite observation of biomass burning, en Earth observation of global change. The role of satellite remote sensing in monitoring the global environment” Springer Science: 109-142.
- HEREDIA et. al., (2003) “Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la Cartografía de Áreas Quemadas con Imágenes Landsat Etm+”, GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, 19.
- PADILLA, Oswaldo, (2005) “Cartografía de áreas Quemadas a Escala Local”, España
- PONCE, Carlos, (2008), “Análisis de Cambio de Cobertura Vegetal y Fragmentación en el Corredor de Conservación Comunitaria El Ángel - Bosque Golondrinas, Provincia del Carchi (1996 - 2005)”, Ecuador.