

UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES
CARRERA INGENIERIA FORESTAL



**IMPACTO DEL INCENDIO FORESTAL DEL AÑO 2002 EN EL PREDIO LA FUSTA,
LONQUIMAY. EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DE LA DIVERSIDAD,
UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES, ETM+, ASTER y ALI.**

Tesis presentada a la facultad de
Ciencias Agropecuarias y Forestales
de la Universidad de La Frontera.
Como parte de los requisitos para
optar al título de ingeniero forestal.

GABRIEL ALEJANDRO SANHUEZA SANHUEZA
TEMUCO-CHILE

2011

UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES
CARRERA INGENIERIA FORESTAL



**IMPACTO DEL INCENDIO FORESTAL DEL AÑO 2002 EN EL PREDIO LA FUSTA,
LONQUIMAY. EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DE LA DIVERSIDAD,
UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES, ETM+, ASTER y ALI.**

Tesis presentada a la facultad de
Ciencias Agropecuarias y Forestales
de la Universidad de La Frontera.
Como parte de los requisitos para
optar al título de ingeniero forestal.

GABRIEL ALEJANDRO SANHUEZA SANHUEZA
MAURICIO REYES SCHENCKE
TEMUCO-CHILE

2011

“Impacto del incendio forestal del año 2002 en el Predio La fusta, Lonquimay. Evaluación multitemporal de la diversidad, utilizando imágenes satelitales, Landsat ETM+ y ASTER.”

PROFESOR GUIA:

Mauricio Reyes Schencke

Ingeniero Forestal

Departamento de Ciencias Forestales

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales

PROFESOR CONSEJERO:

Patricio Acevedo Aránguiz

Magíster en Geofísica

Departamento de Ciencias Físicas

Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración

Claudia BassaberEscárate

Ingeniero Forestal

Departamento de Ciencias Forestales

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales

CALIFICACION PROMEDIO TESIS:

AGRADECIMIENTOS.

En primer Lugar Agradecer a mi familia y amigos quienes confiaron en mis capacidades y no decayeron en su apoyo incondicional.

A mis profesores y ahora amigos quienes siempre me guiaron de buena manera para poder terminar de mejor manera esta etapa en mi vida.

Y por sobre todo agradecer a mi hija Constanza Sanhueza Méndez por ser el mayor pilar de ayuda en los momentos en los cuales las ganas de trabajar o la frustración se apoderaba de mi. Por estar y simplemente con una sonrisa dándome el apoyo necesario para terminar mis metas y nuestros sueños en común.

Agradecer también a Jacqueline Méndez Frías y a toda su familia por todo el apoyo entregado en todos los años de universidad.

Agradecimiento al proyecto de investigación Basal Financing Programs for Cientific in Technological Centers of excellence CONYCIT. Proyecto FB0824/2008 Center for Optics and Photonics.

INDICE.

Capítulo	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	3
2.1 Recurso Vegetacional de Chile	3
2.2 Recurso Vegetacional de la Región de La Araucanía	3
2.3 Conceptos básicos de la teledetección espacial	4
2.4 Espectro Electromagnético	5
2.5 Procesamiento digital de Imágenes satelitales	7
2.6 Clasificación Digital	7
2.6.1 Fase de Entrenamiento	8
2.6.2 Índices Espectrales	9
2.6.3 Normalized Burned Ratio (NBR)	9
2.6.4 Índice de Área Quemada o Burn Area Index	10
2.6.5 Índice de Humedad por Diferencia Normalizada o Índice de Agua	11
2.6.6 Índice Normalizado de Diferencia de Agua	11
2.7 Corrección de las imágenes	11
2.7.1 Corrección Radiométrica	11
2.7.2 Corrección Geométrica	12
2.7.3 Corrección Atmosférica	12
2.8 Características Generales del sensor ASTER	13
2.8.1 Bandas espectrales del sensor ASTER	14
2.9 Características Generales del programa Landsat	15
2.10 Uso de la teledetección en sistemas forestales	15
2.11 Corrección atmosférica y ENVI FLAASH	17
2.11.1 El modelo FLAASH ENVI	18
2.12 Obtención de firmas espectrales	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1 Materiales	20
3.1.1 Área de estudio	20
3.1.2 Fundo La Fusta	21
3.1.3 Fotografías aéreas, imágenes satelitales y equipo computacional	22
3.2 Métodos	23
3.2.1 Calibración de imágenes satelitales	23
3.2.1.1 Metodología de trabajo con imágenes satelitales ASTER.	23

3.2.1.2	Corrección atmosférica.	23
3.2.1.3	Corrección Radiométrica.	23
3.2.1.4	Transformación de valores a reflectancia.	24
3.2.2.1	Pre-Procesamiento de imágenes Landsat ETM+	26
3.2.2.2	Descripción de los cálculos de Correcciones	26
3.2.2.3	Conversión a radiancia espectral (Q_{cal} a $L\lambda$).	26
3.2.2.4	Calibración Radiométrica	26
3.2.2.5	Conversión a reflectancia TOA ($L\lambda$ a $\rho\lambda$).	28
3.2.3.1	Calibración atmosférica de Imagen ALI a partir de imagen corregida HYPERION	29
3.2.3.2	Muestreo de áreas de interés.	29
3.2.3.3	Ajuste de modelos de regresión	30
3.2.3.3.1	Verificación de supuestos estadísticos.	30
3.2.4	Capacidades predictivas	32
3.2.5	Determinación de los índices de vegetación.	33
3.2.5.1	Calculo del NDVI	33
3.2.6	Determinación del Índice Normalized Burned Ratio (NBR)	34
3.2.7	La extracción de los índices de vegetación.	34
3.2.8	Cartografía del Fundo La Fusta	34
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIONES	36
4.1	Ajuste de modelos de regresión	36
4.1.1	Capacidades predictivas.	42
4.2	Obtención de Firmas espectrales	43
4.3	Clasificación NDVI	45
4.4	Imágenes de diferencia de NBR Landsat 2001-2003	49
4.5	Análisis Estadístico de índices Espectrales	50
4.5.1	Diagrama de Cajas	51
4.5.2	Diseño de Experimento	54
4.5.2.1	Rodales de Araucaria	54
4.5.2.2	Rodales de Araucaria y Lenga	57
4.5.2.3	Análisis de Conglomerados Jerárquicos	60
4.5.2.4	Muestreo de Área quemada	65
4.5.2.5	Análisis de Varianza de índices espectrales	69
4.6	Rodalización del Fundo La Fusta	77
5.	CONCLUSIONES	80
6.	RESUMEN	82
7.	SUMMARY	83
8.	LITERATURA CITADA	84

1. INTRODUCCIÓN.

En Chile, según la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2009), la ocurrencia y daño histórico de incendios forestales entre los años 1964 y 2009, alcanza un total de 188.072 incendios forestales, los cuales afectaron una superficie de 2.073.453 ha, a nivel nacional.

Por su parte en la región de La Araucanía entre los años 1979 y 2009 se detectaron 27.078 incendios los que afectaron a 230.965,97 ha. En la comuna de Lonquimay, donde se establece este estudio, se detectaron 5 incendios forestales entre los años 2001 y 2002, los cuales afectaron una superficie de 5.230,24 ha de vegetación nativa.

Estos incendios ocasionan importantes pérdidas en los recursos forestales y paisajísticos, aumentan la desprotección del suelo frente a la erosión, lo cual implica pérdidas de biodiversidad y, en muchos casos, también de vidas humanas en las tareas de extinción (Chuvieco, 1996). En Chile los incendios forestales son muy habituales y las pérdidas por este tipo de fenómenos son muchas; la evaluación y cuantificación tanto de las pérdidas como de la regeneración natural de las zonas afectadas, es una información de mucha ayuda, ya que esto permite establecer los tiempos de regeneración natural de los sitios dañados y, además, establecer cuáles son las especies que comienzan con la regeneración de los sitios afectados.

La evaluación de estos daños y la recuperación mediante la toma de datos es un proceso largo y costoso, es por esto que este estudio pretende evaluar, mediante un análisis multitemporal, la recuperación de los bosques mediante el procesamiento de imágenes satelitales para facilitar y abaratar los costos involucrados en este proceso. Además, establecer los procesos de recuperación natural de los patrimonios boscosos dentro del predio La Fusta.

Hipótesis.

Es posible evaluar los niveles de recuperación de la vegetación afectada por un incendio, mediante imágenes satelitales Landsat ETM+, ASTER, ALI y HYPERION.

Objetivos.**Objetivo General.**

Evaluar el grado de recuperación de la vegetación del predio La Fusta en la comuna de Lonquimay tras el incendio ocurrido el año 2002, mediante la comparación de imágenes satelitales Landsat ETM+, ASTER y ALI, entre los años 2001 y 2010.

Objetivos Específicos.

- Identificar la cobertura y uso del suelo existentes en el predio La Fusta, antes de ser afectado por el incendio ocurrido el año 2002, mediante imágenes ETM+.
- Identificar y delimitar la zona afectada por el incendio ocurrido el año 2002, mediante análisis espectral de imágenes ETM+ 2001 y ETM+ 2003.
- Clasificar intensidades de daño en las áreas quemadas en base a delta Normalized Burn Ratio (dNBR)
- Evaluar niveles de recuperación de la cobertura vegetal mediante imágenes de diferencia.
- Elaborar cartografía temática de áreas quemadas y recuperación.
- Analizar efectividad de la clasificación satelital respecto de cartografía controlada en terreno.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1. Recurso Vegetacional de Chile.

Según el Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile (CONAF/CONAMA/BIRF, 1999), Chile posee una superficie de 75.665.560,8 ha. Las categorías de uso de la tierra que cubren la mayor superficie son las Áreas desprovistas de vegetación, con 24.727.789,5 ha, que corresponden a un 32,7% del total nacional, seguidas por Praderas y Matorrales con 20.529.673,1 ha, y de bosque 15.637.232,5 ha, que representan un 27,1% y 20,7% del total respectivamente, el otro 19,5% corresponde a zonas de Nieves y Glaciares, Humedales, Terrenos Agrícolas, Áreas Urbanas e industriales Aguas continentales y Áreas no Reconocidas. Del total nacional de bosque, 13.430.602,7 ha, (85,9%) corresponden a Bosque Nativo, 2.119.004,5 ha; (13,5%) son plantaciones forestales y 87.625,4 ha; son de Bosques Mixtos (0,5%).

2.2. Recurso Vegetacional de la Región de La Araucanía.

En el caso de la región de La Araucanía, esta posee una superficie de 3.182.732,5 ha, de las cuales los usos más importantes son: terrenos agrícolas, con 955.080,4 ha, Praderas y matorrales, con 711.964,9 ha, Bosque con 1.287.481,4, ha siendo estos tres usos los más importantes de la región. De la totalidad de la superficie de bosques dentro de la región de La Araucanía, 908.501,1 ha corresponden a Bosque Nativo, 359.906,2 ha corresponden a Plantaciones Forestales y tan sólo 19.074,1 ha corresponden a Bosques Mixtos. Dentro de la superficie de bosque nativo que posee la región de La Araucanía podemos encontrar los siguientes tipos forestales:

Cuadro 1. Superficie por tipos forestales afectados por incendios en la novena región de La Araucanía.

Tipo Forestal	Superficie (ha)
Araucaria	207.885,2
Ciprés de la cordillera	5.264,5
Lenga	102.199,5
Roble-Raulí- Coihue	432.488,0
Roble-Raulí-Tepa	104.638,8
Esclerófilo	354,9
Siempre verde	55.670,2

Fuente. (CONAF/CONAMA/BIRF, 1999)

2.3. Conceptos básicos de la teledetección espacial.

Chuvieco, (2002), señala que la teledetección es la técnica que permite obtener información sobre un objeto, área, o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área, o fenómeno a estudiar. Además, menciona que la teledetección consta de tres elementos fundamentales: el sensor, el objeto observado y el flujo energético que permita poner a ambos en relación. Este flujo de energía puede proceder del objeto por reflexión de luz solar, por algún tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. De este modo se derivan las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión (Chuvieco, 1996a).

Para Avery y Graydon (1992), un sensor remoto se define como un instrumento espacial que tiene la capacidad de obtener información de un objeto sin estar físicamente en contacto con él. Estos tipos de instrumentos se conocen en conjunto como Sensores Remotos, donde se incluyen aparatos como la cámara fotográfica, sistemas scanner y radar.

La teledetección espacial es aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales (Ayesa y López, 1998). Un sistema de teledetección espacial consta de los siguientes elementos:

- Fuente de energía
- Cubierta terrestre
- Sistema sensor
- Sistema de recepción-comercialización
- Intérprete, que analiza esa información
- Usuario final (Ayesa y López, 1998)

Chuvieco (1996), define a la teledetección como la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia.

2.4. Espectro Electromagnético.

Podemos describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, se establece una serie de bandas, donde la radiación electro-magnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitud de onda se denomina espectro electro-magnético. Comprende, en un continuo, desde las longitudes de ondas más cortas (rayos gamma, rayos X), hasta los metros o kilométricas (telecomunicaciones) (Ayesa y López, 1998; Chuvieco, 2002).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual.

- Espectro visible (0,4 a 0,7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (A, 0,4 – 0,5 μm), verde (V, 0,5 – 0,6 μm); y rojo (R, 0,6 – 0,7 μm), en razón de los colores primarios que los ojos perciben a esas longitudes de onda.
- Infrarrojo cercano (IRC, 0,7 – 1,3 μm). También se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1,3 - 8 μm). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisiones de la superficie terrestre. La primera banda se sitúa entre 1,3 y 2,5 μm y se denomina infrarrojo de onda corta (*short wave infrared*, SWIR), que resulta idóneo para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda, comprendida principalmente en torno a 3,7 μm , se conoce propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos).
- Infrarrojo lejano o térmico (IRT, 8 a 14 μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se destaca el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- Micro-ondas (M, por encima de 1mm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

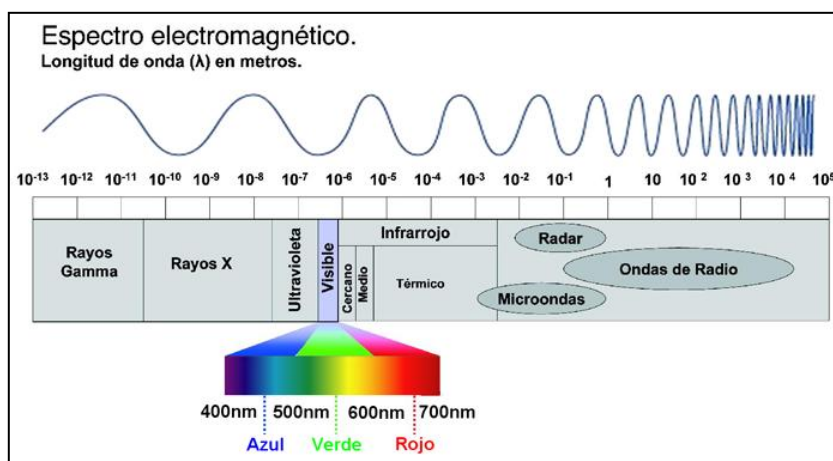


Figura 1. Espectro electromagnético.

2.5. Procesamiento digital de Imágenes Satelitales.

Sobrino (2000), lo define como la manipulación de las cuentas digitales contenidas en una imagen, con ayuda de una computadora, para los propósitos de su corrección, perfeccionamiento y/o extracto de rasgos.

La corrección de la imagen es el proceso que tiende a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización, y en la radiometría de los píxeles que la componen (Chuvieco, 2002).

2.6. Clasificación Digital.

La clasificación digital corresponde a una etapa de importancia en el trabajo con información satelital, considerando básicamente en dividir el conjunto de píxeles que componen la imagen en clases temáticas previamente definidas o por definir, según sea el método clasificatorio que se decida utilizar. Durante la clasificación digital se requiere la adopción de unos métodos que incorporen reglas de decisión, los cuales se pueden agrupar en dos grandes

categorías: los supervisados y los no supervisados (Chuvieco, 1996a). La diferencia fundamental entre ambos tipos de métodos es que, en el caso de los primeros, se requiere necesariamente un conocimiento previo y muy preciso de las clases informacionales a clasificar, mientras que en los no supervisados la segmentación de las clases espectrales se obtiene en base a un procedimiento estadístico, generándose clases estadísticas, las que posteriormente deberán ser asignadas a clases o categorías de información de acuerdo con antecedentes de terreno (Sobrino, 2000).

Chuvieco (1996a), señala que la clasificación digital distingue las siguientes fases: 1) definición digital de las categorías (fase de entrenamiento), 2) Agrupación de los píxeles en una de esas categorías (fase de asignación), y 3) comprobación y verificación de resultados.

2.6.1. Fase de entrenamiento.

Se consideran métodos no supervisados a aquellos métodos totalmente automatizados que solo requieren la intervención de un operador para la interpretación de los resultados. Detectan y localizan las agrupaciones naturales de puntos en una imagen sin usar más información que las propias imágenes o el resultado de aplicarles alguna transformación; con posterioridad un operador debe identificar las agrupaciones y decidir a qué clase informacional las asigna (Sobrino, 2000).

Reside en definir áreas de entrenamiento para que representen lo mejor posible a cada una de las categorías que componen la leyenda de clasificación. Las superficies creadas se utilizarán para realizar el cálculo de los Niveles Digitales que definen cada clase, para posteriormente asignar el resto de los píxeles de la imagen satelital a una de esas categorías en función de sus Niveles Digitales (Chuvieco, 1996a).

2.6.2. Índices Espectrales.

Sobrino (1996) manifiesta que el índice de vegetación es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de otros factores externos como las propiedades ópticas del suelo, y la irradiación solar, entre otros.

El cálculo de esta relación entrega valores entre -1 y +1, que correlacionan directamente el grado de reflectividad. Este grado en ocasiones está asociado con el porcentaje de biomasa o vigor del bosque. Aquí cabe destacar la posibilidad de caracterizar el estado fotosintético de la vegetación a partir de la combinación de estas dos bandas del espectro visible; como lo son la banda del Rojo y del Infrarrojo cercano. Es en estas dos zonas espectrales donde está la principal diferencia entre vegetación con grados de mayor y menor reflectividad (Morales y Parra, 1996).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es uno de los más utilizados en muchas aplicaciones pertinentes para el análisis de parámetros biofísicos. Sin embargo, las conclusiones acerca de su valor varían, dependiendo de la utilización de determinados parámetros biofísicos y las características del área de estudio (Dengshenget *al.*, 2004)

2.6.3. Normalized Burned Ratio (NBR).

La severidad de los incendios ha sido estimada mediante la utilización del índice NBR, basado en la combinación de las bandas del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio utilizando la siguiente expresión (Key y Benson, 2005).

$$NBR = \frac{\rho_{irc} - \rho_{swir}}{\rho_{irc} + \rho_{swir}} \quad (2.1)$$

Donde ρ_{irc} y ρ_{swir} son las reflectancias del infrarrojo cercano (0,6 μm) e infrarrojo medio (1-2,5 μm) respectivamente. La Banda del infrarrojo cercano es sensible a la actividad fotosintética de la vegetación mientras que la del infrarrojo medio proporciona información del contenido de agua; esto hace que el índice NBR sea especialmente sensible a la detección de cambios en la vegetación viva y el contenido de humedad, así como de algunos cambios producidos en el suelo como consecuencia del fuego (Key y Benson, 2005). El índice NBR tiene valores entre -1 y +1: valores bajos indican severidad alta, mientras que valores altos indican severidad baja o inexistente.

2.6.4. Índice de Área Quemada o Burn Area Index (BAI).

Definido específicamente para la discriminación de áreas quemadas. Este índice se basa en la distancia establecida entre cada pixel y un valor espectral de referencia, al cual las áreas recientemente quemadas tienden a converger:

$$BAI = \frac{1}{(pc_r - \rho_r)^2 + (pc_{nir} - \rho_{nir})^2} \quad (2.2)$$

Donde pc_r y pc_{nir} son las reflectividades de referencia en el rojo y en el infrarrojo cercano, respectivamente, ρ_r y ρ_{nir} son las reflectividades de cada pixel en dichas bandas. Los valores de los puntos de convergencia se definieron para las imágenes AVHRR como 0,1 y 0,01 para el rojo e infrarrojo cercano, respectivamente, basándose en la literatura y en el análisis de varios grupos de imágenes de satélite. Estos valores tienden a enfatizar la señal de carbón de las áreas quemadas.

2.6.5. Índice de Humedad por Diferencia Normalizada o Índice de Agua.

Cualquier sensor con una banda de color verde y una banda infrarrojo cercano (NIR) puede utilizar este índice. El NDWI se calcula mediante la fórmula (2.3) donde el verde es una banda que abarca la luz verde reflejada y NIR representa la radiación infrarroja cercana reflejada

$$NDWI = \frac{(verde - NIR)}{(verde + NIR)} \quad (2.3)$$

2.6.6. Índice Normalizado de Diferencia de agua (NDWI)

Fue modificado por Xu (2006) manteniendo la banda del verde y sustituyendo la banda del infrarrojo cercano utilizado en el NDWI por la banda del infrarrojo medio y este índice se calcula mediante la fórmula (2.4)

$$MNDWI = \frac{(verde - MIR)}{(verde + MIR)} \quad (2.4)$$

2.7. Corrección de las imágenes.

2.7.1. Corrección Radiométrica.

Pérez y Sánchez (2006), consideran que la calibración radiométrica implica la transformación de los valores correspondientes al nivel digital de cada pixel (información de

cómo el sensor almacena los datos recibidos) a parámetros físicos (calores referidos a la reflectancia o temperatura) de la cubierta terrestre.

2.7.2. Corrección Geométrica.

Las imágenes digitales proporcionadas por los distintos sensores presentan una serie de distorsiones en la localización de algunos puntos con respecto a la imagen real. Por ende, estas correcciones buscan amortiguar estas alteraciones, esto debido que son múltiples las deformaciones que presentan las imágenes satelitales al momento de obtenerlas (Sobrino, 2000).

La corrección geométrica implica un proceso de transformación para situar biunívocamente cada pixel de las diferentes imágenes en su correcta posición geográfica de la superficie terrestre. Con ello se logra una superposición espacial de las imágenes para las distintas fechas y así poder evidenciar que en cada pixel pueda valorarse la evolución seguida por ese punto a lo largo del tiempo, o al menos en las fechas concretas de las que se tiene información del satélite (Pérez y Sánchez, 2006).

2.7.3. Corrección Atmosférica.

Chuvieco (1990), considera que es muy complejo abordar una corrección rigurosa de la atmósfera, por lo que se requiere una serie de medidas simultáneas a la adquisición de la imagen. Sin embargo, pese a esta dificultad es necesario realizar al menos una estimación del efecto atmosférico.

Sobrino (2000) menciona que el modo particular en que la atmosfera afecta a las imágenes satelitales depende de las características de los sistemas de teledetección y que para conseguir la corrección de la imagen captada deben estimarse magnitudes de los procesos que contaminan la imagen, siendo el caso de los procesos de dispersión y absorción por gases, aerosoles y nubes.

2.8. Características Generales del sensor ASTER.

El sensor ASTER se encuentra a bordo del satélite TERRA que presenta una órbita helio sincrónica a una altitud de 705 kilómetros, un ciclo de revisita de 16 días, un ancho de barrido de 60 kilómetros y una distancia entre orbitas de 172 Km. Dicho sensor está compuesto por 3 subsistemas, para cada región del espectro electromagnético: VNIR, SWIR, TIR. Cada uno de estos subsistemas presenta características particulares tales como tres bandas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano (VNIR), con una resolución espacial de 15 metros; seis bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR), con una resolución espacial de 30 metros y cinco bandas en la región del infrarrojo termal (TIR), con una resolución espacial de 90 metros (Abrams y Hook, 2002).

Según Abrams y Hook (2002), las imágenes de este sensor pueden ser utilizadas en varias áreas específicas de la investigación científica tales como:

- Estudios de la composición y geomorfología de la superficie terrestre, mantos rocosos y procesos superficiales para el estudiar la historia geológica de la Tierra.
- Monitoreo de volcanes, erupciones y eventos precursores, como la emisión de gases volcánicos a la atmósfera, evolución de lagos de lava y actividad de las fumarolas, historia eruptiva y potencial de erupción.
- Observaciones de los componentes atmosféricos característicos, como aerosoles y tipos de nubes. Esta información es de gran utilidad en la corrección atmosférica de los datos satelitales.

Consta de tres telescopios, uno para cada zona espectral, los que pueden ser orientados en direcciones transversales. Además, obtiene pares estereoscópicos a lo largo del camino orbital, de

-24° a +24° en VNIR y -8,55° y +8,55° en SWIR y TIR. Tomando datos durante 8 minutos por órbita.

2.8.1. Bandas espectrales del sensor ASTER.

Abrams y Hook (2002), indican que las 14 bandas de los tres subsistemas del sensor ASTER se encuentran distribuidas en el espectro electromagnético de la siguiente manera:

- Dos bandas en el visible y una en el infrarrojo cercano VNIR (0,52 – 0,86 μm).
- Seis bandas en el infrarrojo medio SWIR (1,6 – 2,43 μm).
- Cinco bandas en el infrarrojo termal TIR (8,125 – 11,65 μm).

Abrams y Hook (2002), señala que la resolución espacial de la información captada por el ASTER tiene las siguientes características:

- Quince metros para las bandas del visible y la de infrarrojo cercano.
- Treinta metros para las seis bandas del infrarrojo medio SWIR.
- Noventa metros para las cinco bandas del infrarrojo termal TIR.

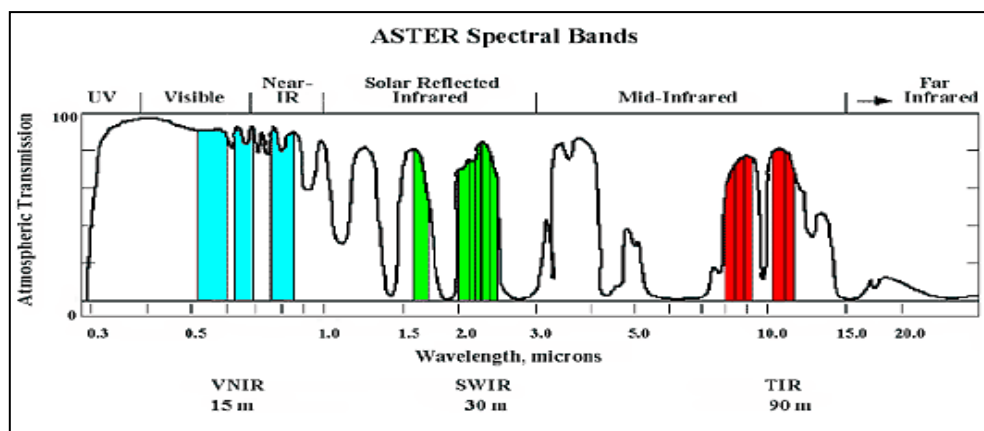


Figura 2. Espectro electromagnético de imagen ASTER. (Geoscience Australia¹.)

¹<http://www.ga.gov.au/about-us.html>

2.9. Características Generales del programa Landsat.

Entre los satélites de recursos, el programa Landsat puede considerarse el más fructífero, puesto que ha proporcionado datos multiespectrales a una amplia gama de usuarios durante más de 25 años, lo que representa el registro más largo de información sobre la superficie terrestre de forma global y repetitiva desde el espacio (Sobrino, 2000).

El sensor ETM+ provee imágenes con 8 bandas espectrales. La resolución espacial es de 30 metros en las bandas visibles e infrarroja cercana (bandas 1-5 y 7). La resolución de la banda pancromática (banda 8) es de 15 metros, y la banda infrarroja termal (banda 6) es de 60 metros. El tamaño aproximado de la escena es de 170 x 183 kilómetros.

2.10. Uso de la teledetección en sistemas forestales.

En distintos países el uso de la teledetección parece aumentar significativamente para diversos fines y más aún para el monitoreo de zonas vegetacionales. Wagner (2004), en un estudio realizado en Brasil, menciona la utilización de las imágenes satelitales ASTER para monitorear bosques densos.

Segura y Trincado (2003), han trabajado con imágenes Landsat en el bosque de Valdivia y concluyen que es una herramienta que entrega múltiples informaciones de la situación de vigor de las especies que conforman estos bosques.

González *et al.*, (2009), estudiaron el incendio forestal que afectó a la provincia de Guadalajara, en Julio del 2005. Este estudio se realizó mediante imágenes hiperespectrales AHS del INTA. Estas imágenes cuentan con 63 bandas, cubriendo las regiones VIS, NIR, SWIR y MIR, con anchos de banda variables según la región. La resolución espacial es de 3 metros.

La metodología empleada por González *et al.*, (2009) consistió en tomar 2 tipos de puntos en terreno los puntos A), localizados en zonas quemadas para estimar el grado de severidad y puntos B), tomados en zonas no quemadas y suelos desnudos para definir zonas de entrenamiento.

Como uno de los primeros pasos se delimitó el perímetro y se estimó la superficie afectada, posteriormente se realizó una clasificación no supervisada, en dos clases, que se identificaron como quemado y no quemado. Luego de realizado estos procesos se calcularon diferentes índices como lo son:

- La severidad del incendio ha sido estimada mediante la utilización del índice NBR (*Normalized Burn Ratio*).
- El estudio de la regeneración se ha realizado mediante el uso del índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI, para determinar el grado de regeneración a nivel de monte.

Por su parte, en otro estudio realizado por Quintanilla *et al.*, (1998) se utilizaron seis parcelas de 60 por 40 metros, localizadas al interior de la zona quemada, que comprende 410 hectáreas. Las parcelas instaladas representan sectores no quemados, sectores con quema superficial y sectores con incendio de copas.

Después de dos años de producidos los últimos incendios y entre un año y el siguiente en que se sucedieron nuevos fuegos (1996-1997), se anotaron los individuos rebrotados, no rebrotados (muertos) y nuevos de cada especie encontrada, a partir de lo cual se obtuvo el porcentaje de rebrote, mortalidad y capacidad de colonización en el área.

Como complemento se ha realizado un método de análisis de la tendencia histórica de la vegetación en estas zonas, basados en diferentes índices espectrales derivados de las imágenes satelitales SPOT y LANDSAT entre los años 1985 y 1996.

El método se basa en la utilización de los siguientes índices:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).
- IVR (Índice de Verdor Relativo).
- NDVIc (es el análisis del cambio vegetacional medido entre dos épocas diferentes a través de los correspondientes índices de vegetación NDVI).

2.11. Corrección atmosférica y ENVI FLAASH

La naturaleza de la percepción remota requiere que la radiación solar pase a través de la atmósfera antes de que sea colectada por el instrumento. Debido a esto, las imágenes de percepción remota incluyen información sobre la atmósfera y la superficie de la Tierra. Para aquellos interesados en el análisis cuantitativo de la reflectancia de la superficie, eliminar el efecto de la atmósfera es un paso crítico del pre-procesamiento. Para compensar los efectos atmosféricos, se deben conocer propiedades tales como la cantidad de vapor de agua, la distribución de los aerosoles y la visibilidad de la escena. Debido a que las mediciones directas de estas propiedades atmosféricas raramente están disponibles, hay técnicas que las deducen de su huella en datos hiperspectrales de radiancia. Además, las correcciones atmosféricas de este tipo se pueden aplicar sobre una base píxel a píxel, ya que cada píxel de una imagen hiperspectral contiene una medida independiente de las bandas de absorción de vapor de agua de la atmósfera.

FLAASH puede procesar sensores hiperspectrales (como HyMAP, AVIRIS, HYDICE, HYPERION, Sonda-1, CASI, y AISA) y sensores multispectrales (como Landsat, SPOT, IRS y ASTER). La recuperación del vapor de agua y de los aerosoles sólo es posible cuando la imagen contiene anchos de bandas adecuados.

ALI tiene 10 bandas, de las cuales la primera es pancromática con 10 metros de resolución espacial y 9 multispectrales (6 en el VNIR y 3 en el SWIR) con una resolución de 30 metros; HYPERION tiene 220 bandas, las cuales abarcan el rango espectral de 356 a 2577 nm, con una

resolución espacial de 30 metros; gracias a su resolución espectral es posible realizar análisis espectrales detallados de diferentes coberturas de suelo.

El Módulo FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), es una herramienta de modelado de corrección atmosférica de principios básicos para recuperar la reflectancia espectral desde radiancia de imágenes hiperespectrales. Con FLAASH, se puede compensar con precisión los efectos atmosféricos. FLAASH corrige longitudes en el visible a través de las regiones del infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, de hasta 3 mm. (Para las regiones termal, se debe utilizar la Corrección Atmosférica Termal de las Utilidades de calibración para el Pre-procesamiento en el menú Basic Tools). A diferencia de muchos otros programas de corrección atmosférica que interpolan propiedades de transferencia de radiación desde los resultados de modelamiento de una base de datos pre-calculada, FLAASH incorpora el código de transferencia de radiación MODTRAN4.

2.11.1. El modelo FLAASH ENVI. Una breve descripción del Modelo de Corrección Atmosférica utilizado por FLAASH.

FLAASH parte de una ecuación estándar de radiancia espectral en un píxel del sensor, L , que se aplica al rango solar de longitud de onda (se omite la emisión térmica) y planos, materiales Lambertianos o sus equivalentes. La ecuación es la siguiente:

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (2.2)$$

Dónde:

ρ es la reflectancia de la superficie del píxel

ρ_e es una reflectancia promedio de la superficie del píxel y una región circundante

S es el albedo esférico de la atmósfera

L_a es la radiancia dispersada por la atmósfera

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

Para imágenes que no contienen las bandas en las posiciones de longitud de onda adecuada para apoyar la recuperación de agua (por ejemplo, Landsat o SPOT), la cantidad de vapor de la columna de agua está determinada por el modelo atmosférico seleccionado por el usuario. Después que se realiza la recuperación de agua, la ecuación (2.3) es resuelta para la reflectancia de la superficie del píxel para todos los canales de sensor. El método de solución implica calcular la radiancia espacial promedio de la imagen L_e , desde la cual la reflectancia espacial promedio es estimada utilizando la ecuación aproximada (Kaufmann, *et al*, 1997):

$$L_e \approx \left(\frac{(A+B)\rho_e}{1-\rho_e S} \right) + L_a \quad (2.3)$$

2.12. Obtención de firmas espectrales.

El sol es el emisor de radiación más usual para imágenes de teledetección, este emite la radiación que incide inicialmente con la atmósfera. Los gases presentes en dicha atmosfera, como el resto de la materia presente en el universo, interactúan con la radiación, absorbiéndola, reflejándola y/o transmitiéndola.

Una vez que la radiación solar ha traspasado la atmósfera interacciona con la superficie terrestre, encontrándose con todo tipo de materiales diferentes, agua dulce, salada, tierra desnuda, nieve, zonas de vegetación densa, zonas de vegetación arbustiva, ciudades, etc. Cada tipo de superficie interacciona con la radiación de manera diferente, absorbiendo unas longitudes de onda muy concretas y reflejando otras diferentes en unas proporciones determinadas. Esta característica hace posible que se puedan identificar los distintos objetos: suelo, vegetación, aguas, etc.

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Materiales.

3.1.1. Área de estudio.

La comuna de Lonquimay está ubicada en la región de La Araucanía. Esta comuna posee una superficie de 395.379 ha, lo que la convierte en la comuna de mayor superficie dentro de la región. La comuna se encuentra ubicada a los 38° 29' Latitud S y 71° 17' Longitud O. Posee una población de 10.237 habitantes, de los cuales 3.435 habitantes pertenecen a la zona urbana y 6.802 habitan pertenece a la zonas rurales de la comuna.

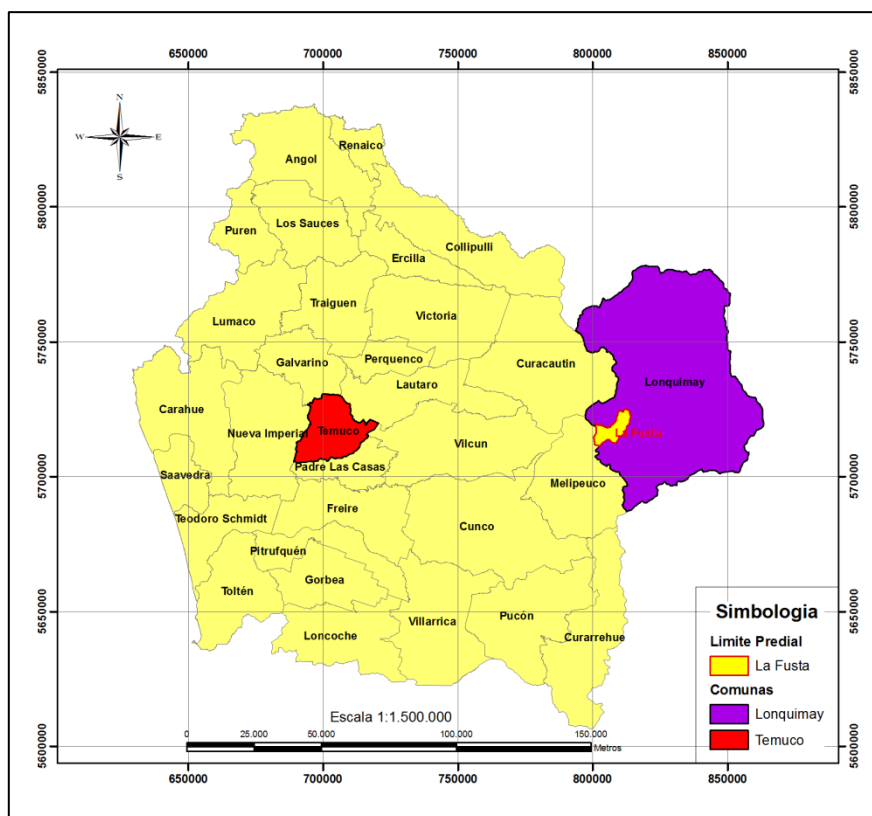


Figura 3. Plano de Ubicación de la comuna de Lonquimay (Elaboración propia).

3.1.2. Fundo La Fusta.

El fundo “La Fusta” se encuentra ubicado a unos 15 kilómetros al sur de Lonquimay en la región de La Araucanía y abarca a las comunas de Lonquimay y Melipeuco. Posee una superficie de 9.109,1 ha y fue afectado por un incendio forestal el año 2002, que quemó extensas superficies de bosque de Araucaria y Lenga.

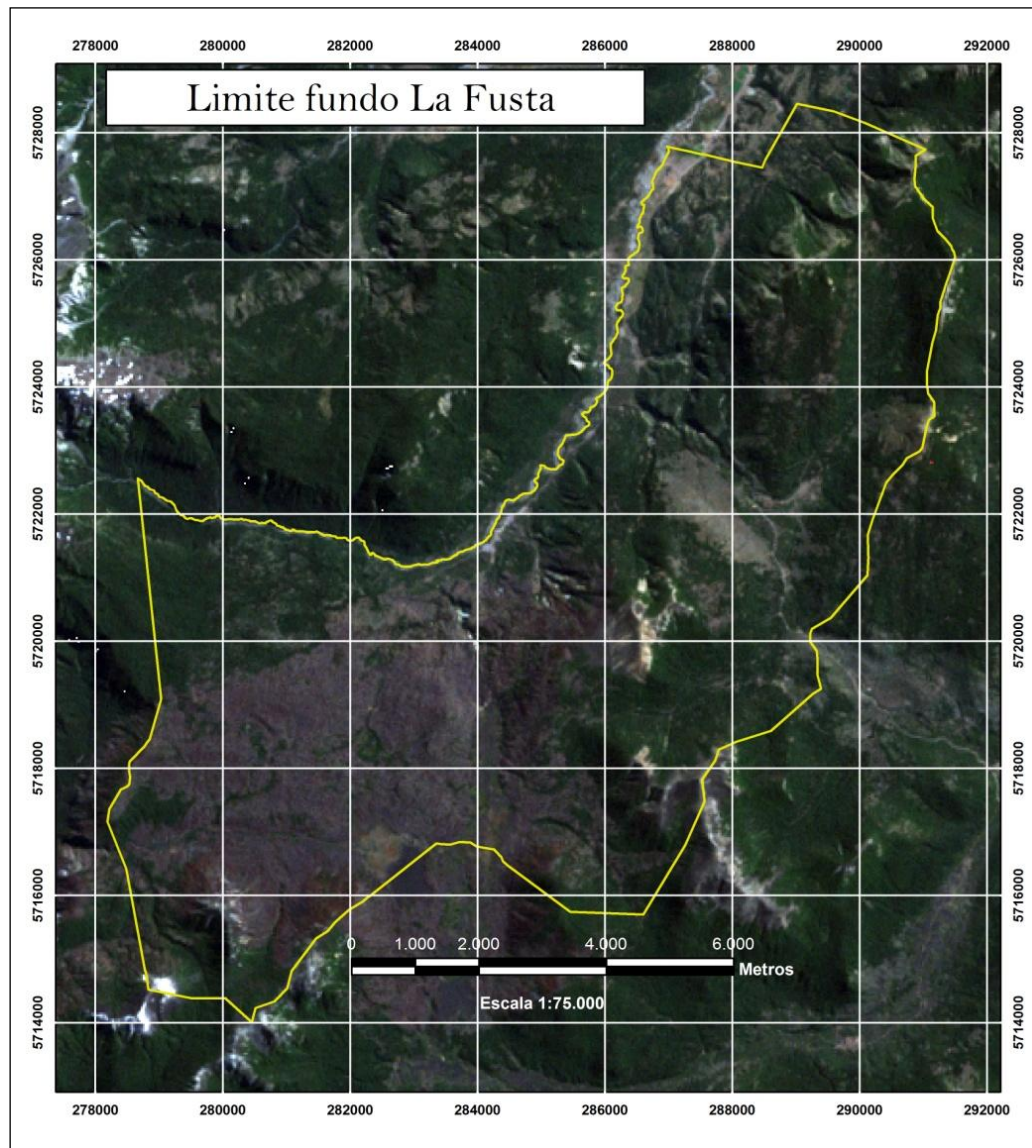


Figura 4. Límite del fundo “La Fusta” Lonquimay.

3.1.3. Fotografías aéreas, imágenes satelitales y equipo computacional.

Para la realización de este trabajo se obtuvieron 5 imágenes satelitales. Las dos primeras corresponden a imágenes Landsat ETM+ de la zona afectada, de fecha de adquisición 07 de febrero del año 2001 y la segunda imagen con una fecha de adquisición del 07 de marzo del año 2003.

La tercera imagen obtenida es una imagen ASTER que corresponde al 24 de febrero del 2007.

Las dos últimas imágenes obtenidas para este trabajo corresponden a las de los sensores HYPERION y ALI del 08 de enero del 2010.

La información base del presente estudio correspondió a:

- Imagen satelital Landsat ETM+ del 07-02-2001
- Imagen satelital Landsat ETM+ del 07-03-2003
- Imagen satelital ASTER del 24-02-2007
- Imágenes satelitales HYPERION y ALI del 08-01-2010
- Fotografía aérea del fundo la Fusta vuelo privado del año 2007
- Fotografía aérea del fundo la Fusta CONAF año 2000

Para el ingreso y análisis de la información:

- Computador Intel Core i5 procesador 430M (2.26GHZ, 1066MHz 3 GB Memoria)
- Programa ENVI versión 4.8
- Programa ArcGIS versión 9.3

3.2. Métodos.

3.2.1. Calibración de imágenes satelitales.

3.2.1.1. Metodología de trabajo con imágenes satelitales ASTER. Para la utilización de estas imágenes fue necesaria la aplicación de correcciones, ya que éstas no incluyen las correcciones atmosféricas y radiométricas, sólo presentan una georeferenciación en la proyección UTM zona 18 Norte Datum North América 1972. Por ello es necesario definir una nueva proyección correspondiente a UTM zona 18 sur, Datum WGS 1984.

3.2.1.2. Corrección atmosférica. FLAASH corrige longitudes en el visible a través de las regiones del infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, de hasta 3 mm. (Para las regiones termales, se debe utilizar la Corrección Atmosférica Termal de las Utilidades de calibración para el Pre-procesamiento en el menú Basic Tools) A diferencia de muchos otros programas de corrección atmosférica que interpolan propiedades de transferencia de radiación desde los resultados de modelamiento de una base de datos pre-calculada, FLAASH incorpora el código de transferencia de radiación MODTRAN4

3.2.1.3. Corrección Radiométrica. La corrección radiométrica permitió transformar los niveles digitales a medidas físicas de reflectancia, las cuales pueden ser asociados más directamente con los distintos tipos de coberturas del suelo. Esta corrección fue hecha para reparar distintas fuentes de variación, tales como: las relaciones con el sensor, con la iluminación y por las condiciones atmosféricas.

La siguiente ecuación corresponde a la corrección:

$$L = (bn - 1) * coef.conversión \quad (3.1)$$

Dónde: L ($W/m^2/sr/\mu m$) = Radiancia espectral.

bn = cada banda ingresada en nivel digital.

Coef. Conversión = ganancia (coeficiente)

Cuadro 2. Distintos coeficientes de conversión utilizando en la corrección radiométrica para el sensor ASTER.

N° Bandas	coeficientes ($W/m^2/sr/\mu m$) / DN			
	Ganancia alta	Ganancia normal	Ganancia baja 1	Ganancia baja 2
1	0,676	1,688	2,25	
2	0,708	1,415	1,89	NA
3N	0,423	0,862	1,15	
3B	0,423	0,862	1,15	
4	0,1087	0,2174	0,29	0,29
5	0,0348	0,0696	0,0925	0,409
6	0,0313	0,0625	0,083	0,39
7	0,299	0,0597	0,0795	0,334
8	0,0209	0,0417	0,0556	0,245
9	0,0159	0,0318	0,0424	0,265
10	NA	6.882×10^{-3}	NA	NA
11		6.780×10^{-3}		
12		6.590×10^{-3}		
13		5.693×10^{-3}		
14		5.225×10^{-3}		

Fuente. Abrams y Hook 2002.

3.2.1.4. Transformación de valores a reflectancia. Luego de realizadas las correcciones radiométricas y atmosféricas se debió traspasar los valores de radiancia a reflectancia.

Para la aplicación de las correcciones se utilizó el programa ENVI versión 4.5 mediante los comandos Basic Tools, Band Math, a través de la entrada de expresiones matemáticas.

El traspaso de los valores a reflectancias queda expresado por en la siguiente ecuación.

$$p_{i,k} = \frac{B_n \times \pi \times d^2}{E \lambda_n (\cos \theta_i)} \quad (3.2)$$

Dónde: $p_{i,k}$ es la reflectividad del pixel i para la banda k

B_n = Banda corregida radiométrica y atmosféricamente.

$\pi = 3,1416$

d = es un factor que tiene en cuenta la variación de la distancia Tierra-Sol, y se calcula a partir del día juliano (J)

$E \lambda_n$ = es la irradiación solar en el techo de la atmosférica (exo-atmosférica)

θ_i = ángulo cenital solar

Cuadro 3. Constantes de irradiación solar exo-atmosférica empleadas para la obtención de valores en reflectancia.

Nº Bandas	Constantes
1	1.843,477
2	1.556,587
3N	1.083,006
4	219,2
5	87,3
6	82,1
7	75,6
8	68,2
9	62,1

Fuente: Acevedo 2007.

3.2.2.1. Pre-Procesamiento de imágenes Landsat ETM+.

3.2.2.2. Descripción de los cálculos de Correcciones

3.2.2.3. Conversión a radiancia espectral (Qcal a L_λ). Las calibraciones radiométricas del sensor ETM+ incluyeron re-escalar los números digitales crudos transmitidos desde el satélite a números digitales calibrados, que tienen la misma escala radiométrica para todas las escenas procesadas de una zona geográfica para una fecha específica.

3.2.2.4. Calibración Radiométrica. Durante la calibración radiométrica, los valores de los pixeles de las imágenes son convertidos a unidades de radiancia espectral absoluta, utilizando cálculos de punto flotante de 32 bit. Los valores de radiancia absoluta son escalados a 8 bit (ETM+, Qcalmax=255). La conversión de Qcal en imágenes Level 1 en radiancia espectral del sensor, requiere conocer los límites inferior y superior de factores escalados originales. Las siguientes ecuaciones se utilizan convertir Qcal a L_λ . (Chander, *et al*, 2009).

$$L_\lambda = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \right) (Q_{cal} - Q_{cal\ min}) + LMIN_\lambda \quad (3.3)$$

O

$$L_\lambda = G_{rescalado} \times Q_{cal} + B_{rescalado} \quad (3.4)$$

Dónde:

$$G_{rescalado} = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \right) \quad (3.5)$$

$$B_{rescalado} = LMIN_\lambda - \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \right) Q_{cal\ min} \quad (3.6)$$

Dónde:

- L_{λ} = radiancia espectral en la apertura del sensor [$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$]
 Q_{cal} = valor de pixel calibrado cuantificado [DN]
 Q_{calmin} = mínimo valor de pixel calibrado cuantificado correspondiente a $LMIN_{\lambda}$ [DN]
 Q_{calmax} = máximo valor de pixel calibrado cuantificado correspondiente a $LMAX_{\lambda}$ [DN]
 $LMIN_{\lambda}$ = radiancia espectral en el sensor que es escalada para Q_{calmin} [$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$]
 $LMAX_{\lambda}$ = radiancia espectral en el sensor que es escalada para Q_{calmax} [$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$]
 $G_{rescalado}$ = Factor de ganancia reescalado para una banda específica [$(W/(m^2 \text{ sr } \mu m))/DN$]
 $B_{rescalado}$ = Factor de sesgo reescalado para una banda específica [$(W/(m^2 \text{ sr } \mu m))/DN$]

El cuadro 4 resume los rangos espectrales, rangos dinámicos de post-calibración (parámetros escalados de $LMIN_{\lambda}$ y $LMAX_{\lambda}$ y las correspondientes ganancia [$G_{rescalado}$] y sesgo [$B_{rescalado}$], e Irradiancia solar exoatmosférica media (E_{λ}) para ETM+.

Cuadro 4. Rangos espectrales, rangos dinámicos de post-calibración e Irradiancia solar exoatmosférica media (E_{λ}) para ETM+.

Sensor ETM+ LANDSAT ($Q_{calmin}=1$ y $Q_{calmax} = 255$)							
LowGain (LPGS)							
Banda	Rango Espectral (μ)	longitud de onda central (μ)	$LMIN_{\lambda}$	$LMAX_{\lambda}$	$G_{rescalado}$	$B_{rescalado}$	E_{λ}
			$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$		$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)/DN$		$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$
1	0,452-0,514	0,483	-6,2	293,7	1,180709	-7,38	1997
2	0,519-0,601	0,560	-6,4	300,9	1,209843	-7,61	1812
3	0,631-0,692	0,662	-5,0	234,4	0,94252	-5,94	1533
4	0,772-0,898	0,835	-5,1	241,1	0,969291	-6,07	1039
5	1,547-1,748	1,648	-1,0	47,57	0,19122	-1,19	230,8
6	10,31-12,36	11,335	0,0	17,04	0,067087	-0,07	N/A
7	2,065-2,356	2,206	-0,35	16,54	0,066496	-0,42	87,9
Pan	0,515-0,896	0,706	-4,7	243,1	0,975591	-5,68	1362

3.2.2.5. Conversión a reflectancia TOA (L_λ a ρ_λ). Para una reducción en la variabilidad de escena a escena, se convirtió la radiancia espectral a reflectancia TOA exoatmosférica, también conocida como albedo planetario, para cada una de las bandas utilizadas. La reflectancia TOA de la Tierra se calcula de acuerdo a la siguiente expresión (Chander, *et al*, 2009).

$$\rho_\lambda^n = L_\lambda^n \frac{\pi d^2}{E_\lambda^n \cos \theta_s} \quad (3.7)$$

Dónde:

n= Banda de la escena

ρ_λ = Reflectancia Planetaria TOA [sin unidades]

π = Constante matemática aproximadamente igual a 3.1416 [sin unidades]

L_λ = Radiancia espectral en la apertura del sensor [$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$]

d= Distancia Tierra-Sol [unidades astronómicas]

E_λ = Irradiancia solar exoatmosférica media [$W/(m^2 \mu m)$]

θ_s = ángulo zenith solar (grados)

El cálculo de la reflectancia requiere la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas, obtenida directamente desde tablas o ecuaciones polinomiales de acuerdo al día Juliano de la escena.

A continuación se muestra en el Cuadro 5, los valores utilizados y el resumen las ecuaciones finales para convertir a reflectancia las imágenes ETM+ utilizadas para la actualización del sector cordillera:

Cuadro 5. Valores de variables utilizados y resumen de ecuaciones para obtener reflectancia TOA exoatmosférica.

FECHA		2001-02-07
TRACK		233-084
Dia Juliano		38
Gamma		0,03440
$1/d^2$		1,03430
Distancia Sol-Tierra UA		0,966839
Sunelevation		56,131017
ANGULO CENITAL		66.7391323
COS ANGULO CENITAL		0,830314
d^2		0,966839
Cte. Exoatmos.	Banda	Cálculo
1997	1	0,001832
1812	2	0,002019
1533	3	0,002386
1039	4	0,003521
230,8	5	0,015849
84,9	6	0,043087
1362	Pan	0,002686

3.2.3.1. Calibración atmosférica de Imagen ALI a partir de imagen corregida HYPERION.

3.2.3.2. Muestreo de áreas de interés. En la corrección de los parámetros de la imagen satelital ALI a partir de la imagen HYPERION, se realizaron diez grillas de 10 x 10 pixeles en el programa ArcGis 9.3; estas grillas se hicieron coincidir en las dos imágenes. Luego, se procedió a

convertir las grillas en ROIs en el programa ENVI 4.8 y para ambas imágenes se extrajeron los valores de reflectancia. Finalmente, se ajustaron regresiones considerando como variable independiente la reflectancia corregida atmosféricamente de HYPERION y como variable dependiente la reflectancia sin corrección atmosférica desde la imagen ALI, para así poder calibrar la imagen ALI en base a los parámetros obtenidos de la imagen HYPERION.

3.2.3.3. Ajuste de modelos de regresión. El proceso de ajuste se realizó para cada una de las bandas, por medio del software SPSS 15 para Windows mediante el método de los mínimos cuadrados. En este caso sólo se llevó a cabo el ajuste para una regresión lineal, ya que estudios como el de Overgaard, *et al*, 2010. Que ajustó modelos mediante el método de mínimos cuadrados para establecer los rendimientos y concentración de proteínas de los granos mediante imágenes satelitales. También el estudio de Sriwongsitanon, *et al*, (2011) evaluó la influencia de la corrección atmosférica y el número de puntos de muestreo de la exactitud de la claridad del agua mediante teledetección. Para ésto ajustó ecuaciones de regresión lineal entre los parámetros de transformación logarítmica de la reflexión de la claridad y la superficie de cada banda y la relación de la banda en el pixel.

3.2.3.3.1. Verificación de supuestos estadísticos. A. Normalidad: La normalidad de los residuos de cada modelo ajustado, se probó por el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S). A través de esta prueba de bondad de ajuste, es posible decidir si los residuos de cada modelo se ajustan a una distribución normal.

B. Homocedasticidad: La homogeneidad de la varianza de los residuales, se testeó con la prueba de Levene. Este test calcula primero la varianza de los residuales, los cuales son ordenados en grupos determinados por el valor real del volumen. Luego verifica la homogeneidad de la varianza, calculando para cada caso, la diferencia absoluta entre su valor en la variable dependiente y la media de su grupo, y después realiza una ANOVA de un factor sobre esas diferencias.

C. Autocorrelación: La independencia serial de los errores de cada modelo se evaluó mediante la estadística de Durbin y Watson (D-W). Esta prueba busca detectar si es que los errores o residuos de un modelo de regresión ajustado, presentan una relación serial entre ellos.

D. Multicolinealidad: Se calculó el factor de inflación de la varianza (VIF), para cada variable independiente de los modelos ajustados, para detectar la presencia de multicolinealidad entre dichas variables.

Cada uno de los estadísticos utilizados para verificar los supuestos, se obtuvieron del paquete estadístico SPSS versión 15.

El criterio de cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad se basó en el valor-p ($v-p$), ya que cuando éste es mayor a 0,05, se dice que no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula y por lo tanto existen diferencias significativas. El valor-p o nivel de significancia observado es la probabilidad de obtener un valor mayor en la estadística de prueba tan extremo o más que el valor observado en la propia estadística de prueba (Maddala, 1996).

Aquellos modelos que presentaron $v-p$ menores al 0,05 en los test K-S (normalidad) y Levene (Homocedasticidad) fueron eliminados de los posteriores procesos.

El cumplimiento de la independencia serial de los residuos, se determinó al comparar el valor del test de D-W entregado por el paquete estadístico con los valores tabulados de la estadística de Durbin y Watson. Canavos (1988) y Maddala (1996) describen las tres posibles respuestas que entrega el análisis del valor calculado para D-W; en caso que el valor del test sea menor que el límite inferior (d_l) tabulado para el correspondiente número de observaciones y de variables independientes, se establece que los errores del modelo se encuentran autocorrelacionados. Mientras que si el valor de D-W es mayor que el límite superior (d_u)

tabulado correspondiente, el modelo no presenta autocorrelación. En último caso, si D-W se encuentra entre el rango comprendido por d_l y d_u , la prueba no es concluyente.

3.2.4 Capacidades predictivas. Fueron evaluadas para la totalidad de la muestra de ajuste, con el fin de comparar los cinco modelos seleccionados en el punto 3.2.11.3, así como también para cada uno de los cuatro rangos de clase de DAP en los cuales se encuentre los datos del grupo de especies.

Esto último, permite conocer entre que rangos diamétricos funcionan mejor las ecuaciones ajustadas y es posible distinguir que a pesar de que una ecuación sea la más adecuada (según el ranking) para la totalidad de rangos de DAP en los cuales se prueba, existen otras ecuaciones superiores para ciertos rangos.

Los estadísticos empleados son los siguientes:

A. Error Cuadrático Medio (ECM):

$$ECM(\%) = \frac{100}{\bar{v}} \times \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2}{n}} \right) \quad (3.8)$$

B. Diferencia Agregada(DA):

$$DA(\%) = \frac{100}{\bar{v}} \times \left(\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)}{n} \right) \quad (3.9)$$

La presencia de multicolinealidad, siguiendo lo propuesto por Trincado (1994), se asumió para aquellas ecuaciones que presentaron VIF mayores a 10 para alguna de sus variables independientes, por lo que aquellos modelos que presentaron al menos una variable independiente con VIF mayor a 10 fueron eliminados del proceso posterior.

3.2.5. Determinación de los índices de vegetación. La utilización de índices de vegetación se justifica en dos situaciones: para mejorar la discriminación entre suelos y vegetación y para reducir el efecto del relieve (Pendiente y Orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas. Para este estudio se utilizaron los siguientes índices:

3.2.5.1. Cálculo del NDVI

Las imágenes corregidas radiométrica y atmosféricamente y luego transformados sus valores a reflectancia, se procesan mediante el modulo Band Math del programa Envi 4.5. Este módulo permite crear y modificar ecuaciones con la información de bandas de una imagen. Se ingresa la expresión propuesta por Chuvieco (1990):

$$NDVI = \frac{irc - r}{irc + r} \quad (3.10)$$

Para la aplicación de este índice de vegetación en las imágenes ASTER, las variables ingresadas corresponden a “(Bandas 3 – Banda 2) / (Bandas 3 + Banda 2)”. Similar situación ocurre con el cálculo del índice SR (Índice de Vegetación de Razón simple. *Simple Ratio*), pero la expresión ingresada corresponde a:

$$NDVI = \frac{B3 - B2}{B3 + B2} \quad (3.11)$$

3.2.6. Determinación del índice Normalized Burned Ratio (NBR). Su expresión matemática es similar a la del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI), pero sustituye la banda del rojo por la del SWIR. La diferencia entre ambas bandas ofrece el mayor contraste entre imágenes pre y post-incendio, especialmente en espacios con cubierta forestal. La banda correspondiente al IRC es muy sensible al contenido de clorofila, lo que está en relación directa con la vitalidad de la planta; mientras que la región del SWIR, comprendida entre los 2.080 y 2.350 nm, es sensible a los cambios del contenido de agua. Al contrario que el resto de índices, el NBR tenderá a ofrecer valores bajos en las zonas quemadas ya que, tras un incendio, se produce un descenso de la reflectividad en el infrarrojo cercano y un aumento en el SWIR.

$$NBR = \frac{\rho_{irc} - \rho_{swir}}{\rho_{irc} + \rho_{swir}} \quad (3.12)$$

Donde, ρ_{IRC} es la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano, y ρ_{SWIR} es la reflectividad en la banda del infrarrojo medio de onda corta.

3.2.7. La extracción de los índices de vegetación. La verificación cruzada de los índices biofísicos es una de las características únicas de la componente de análisis de la vegetación en ENVI. Esta permite la comparación de los diferentes índices en cada pixel para validar sus resultados. La verificación cruzada de los índices biofísicos compara los índices de vegetación en cada pixel para filtrar los valores erróneos e ignorar estos pixeles.

3.2.8. Cartografía del Fundo La Fusta. En el caso de la rodalización del Fundo La Fusta, esta se llevó a cabo en dos etapas: la primera fue por medio de una pre-rodalización, la cual se realizó por medio de Fotografías aéreas (vuelo privado del año 2007 y fotografía aérea del Fundo la Fusta proporcionada por CONAF del año 2000). En esta etapa del trabajo sólo se hizo un reconocimiento de la zona a trabajar, dividiendo el predio en categorías de uso de suelo y vegetación, las que fueron comprobadas mediante visitas a terreno, en las que además se

verificaron los límites naturales y otros parámetros de rodal como exposición, especies principales, entre otras.

La segunda etapa se llevó a cabo mediante dos salidas a terreno realizadas en el mes de abril del año 2010, con la cual se pudo corroborar y corregir el trabajo realizado en la primera etapa de este proyecto. Con los datos obtenidos se pudo realizar una caracterización del área de estudio, la cual permitió identificar las especies existentes y su distribución, además de definir la zona afectada por el incendio del año 2002. En esta caracterización, además de definir el área de estudio, también se definió las especies que componían la zona afectada a través de los vestigios de árboles quemados y regeneración del bosque.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIONES.

4.1. Ajuste de modelos de regresión.

Los siguientes gráficos muestran los resultados obtenidos en el ajuste de las regresiones por banda para la calibración de la imagen satelital ALI en base a los valores de reflectancia con corrección atmosférica de los Rois de Hyperion.

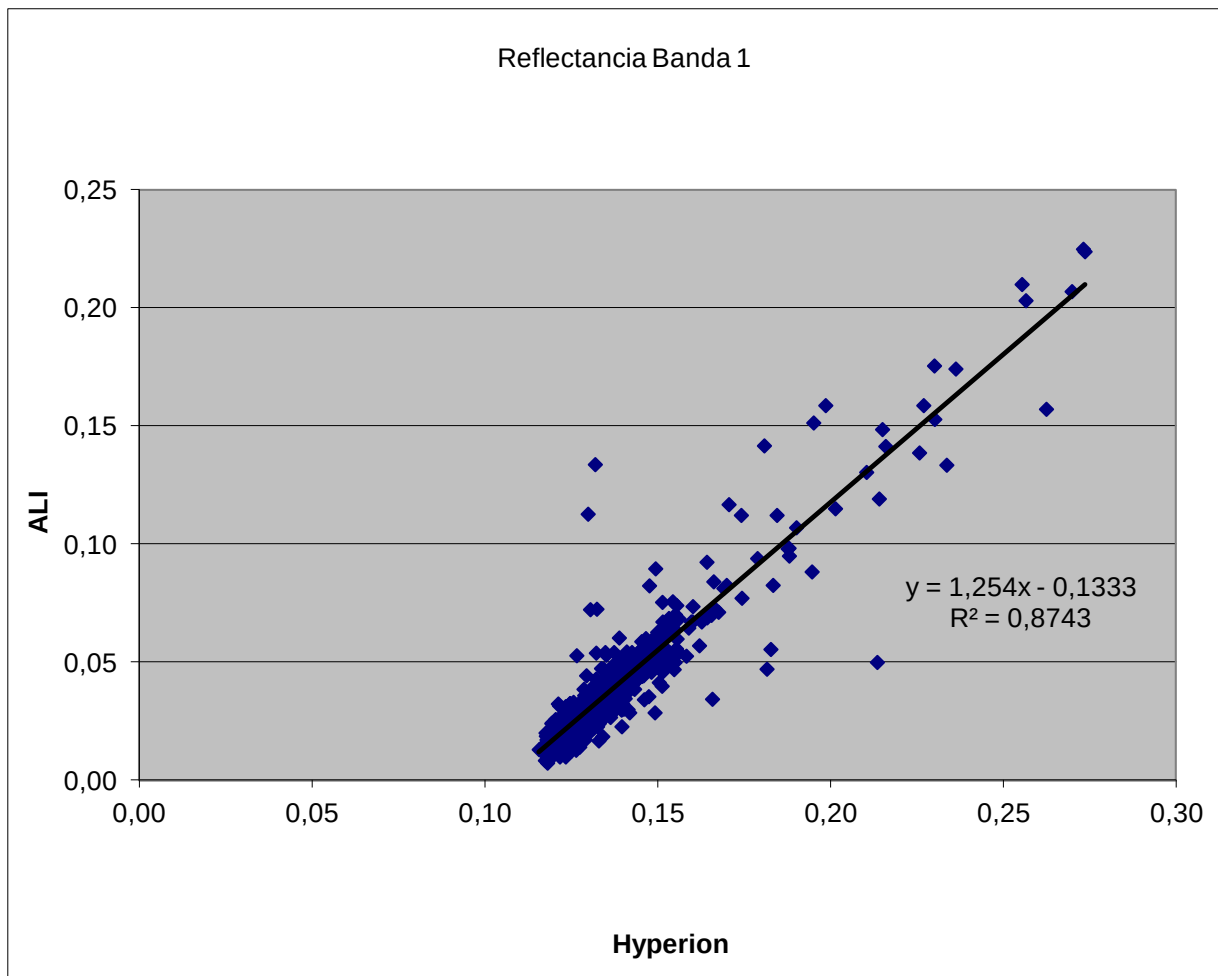


Figura 5. Ajuste de regresión lineal de la banda 1 de ALI en base a los parámetros de Hyperion.

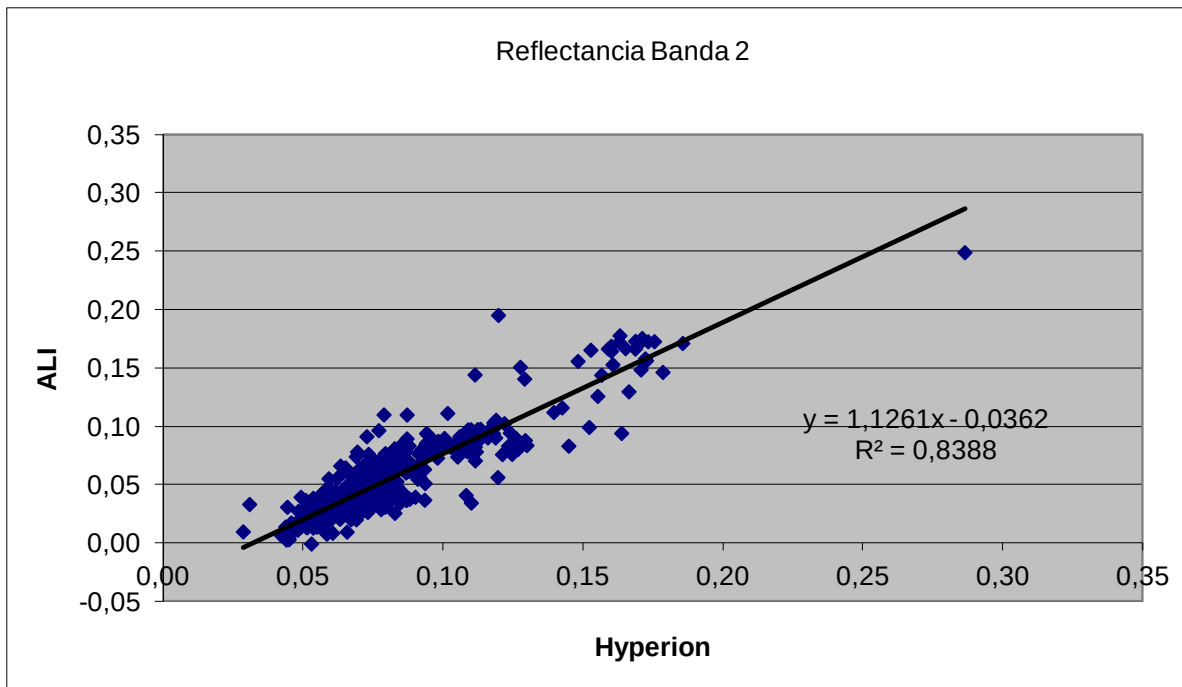


Figura 6: Ajuste de regresión lineal de la banda 2 de ALI en base a los parámetros de Hyperion.

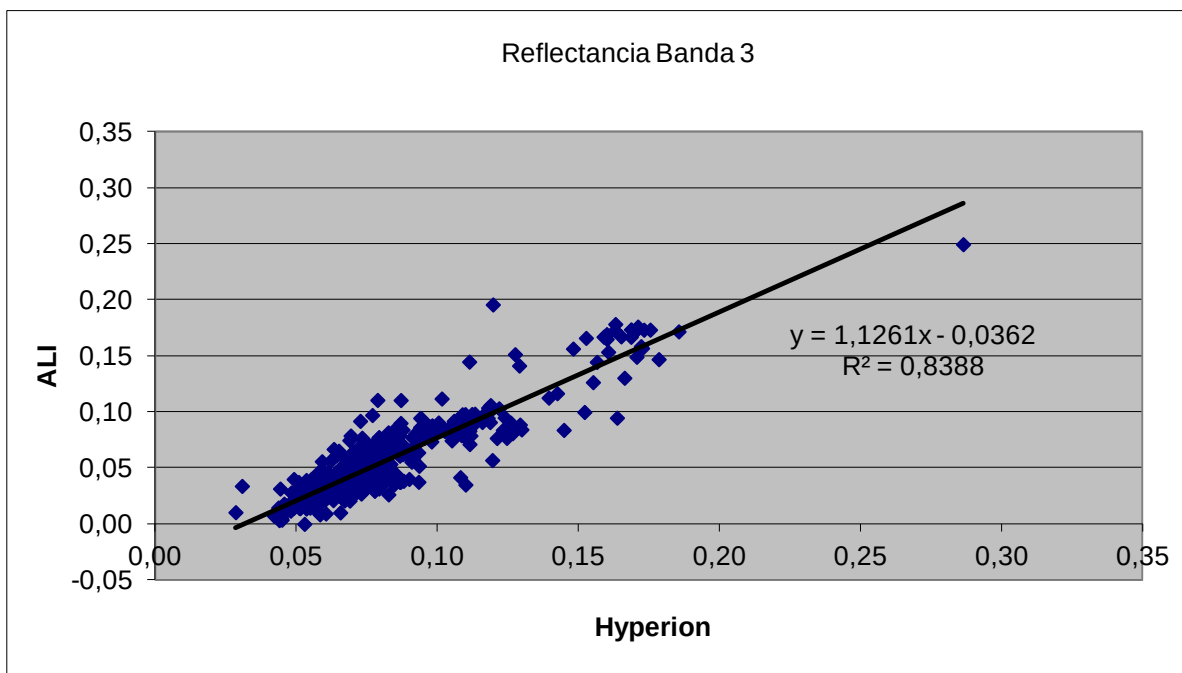


Figura 7: Ajuste de regresión lineal de la banda 3 de ALI en base a los parámetros de Hyperion.

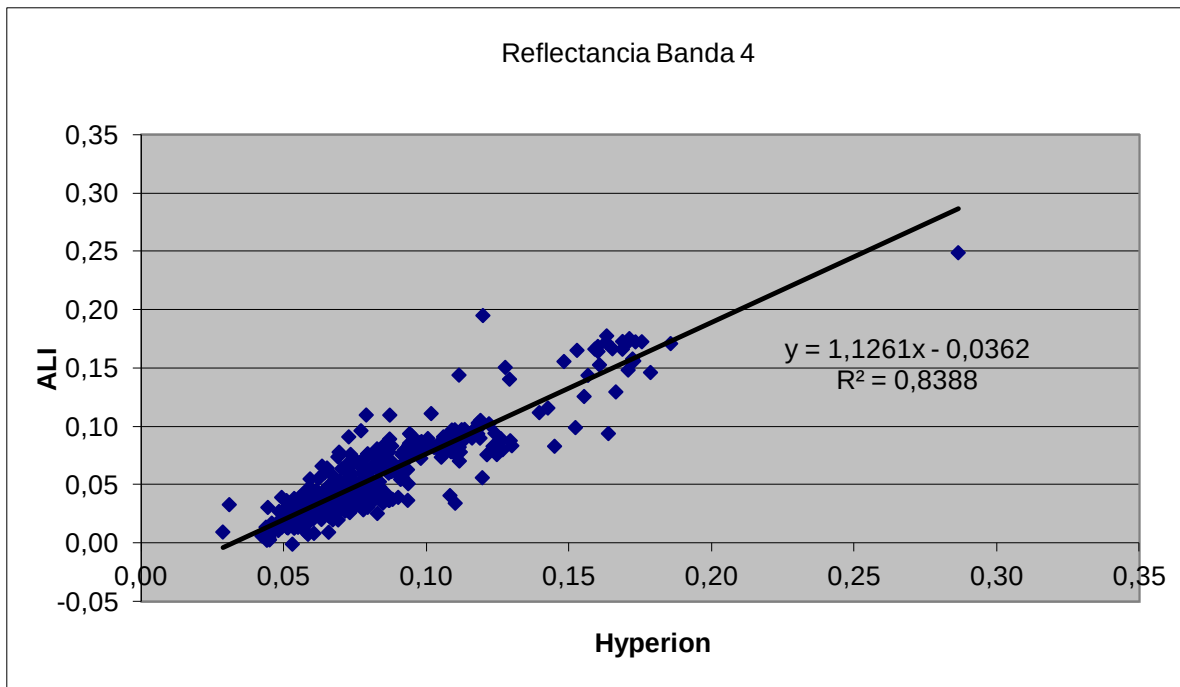


Figura 8: Ajuste de regresión lineal de la banda 4 de ALI en base a los parámetros de Hyperion.

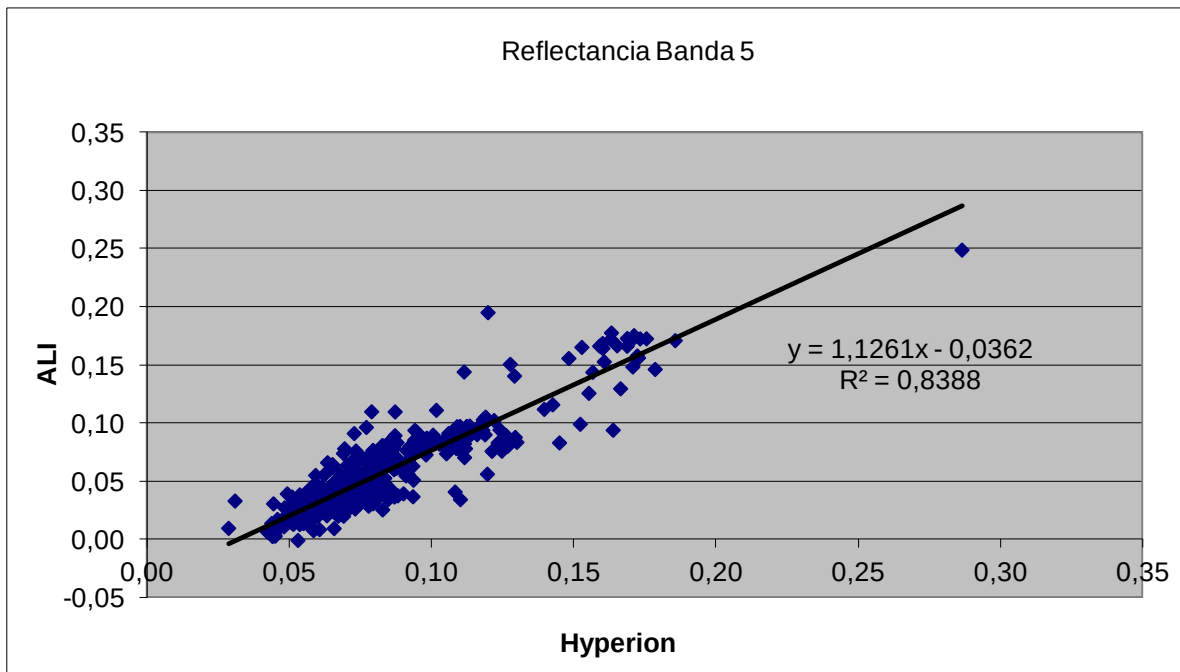


Figura 9: Ajuste de regresión lineal de la banda 5 de ALI en base a los parámetros de Hyperion

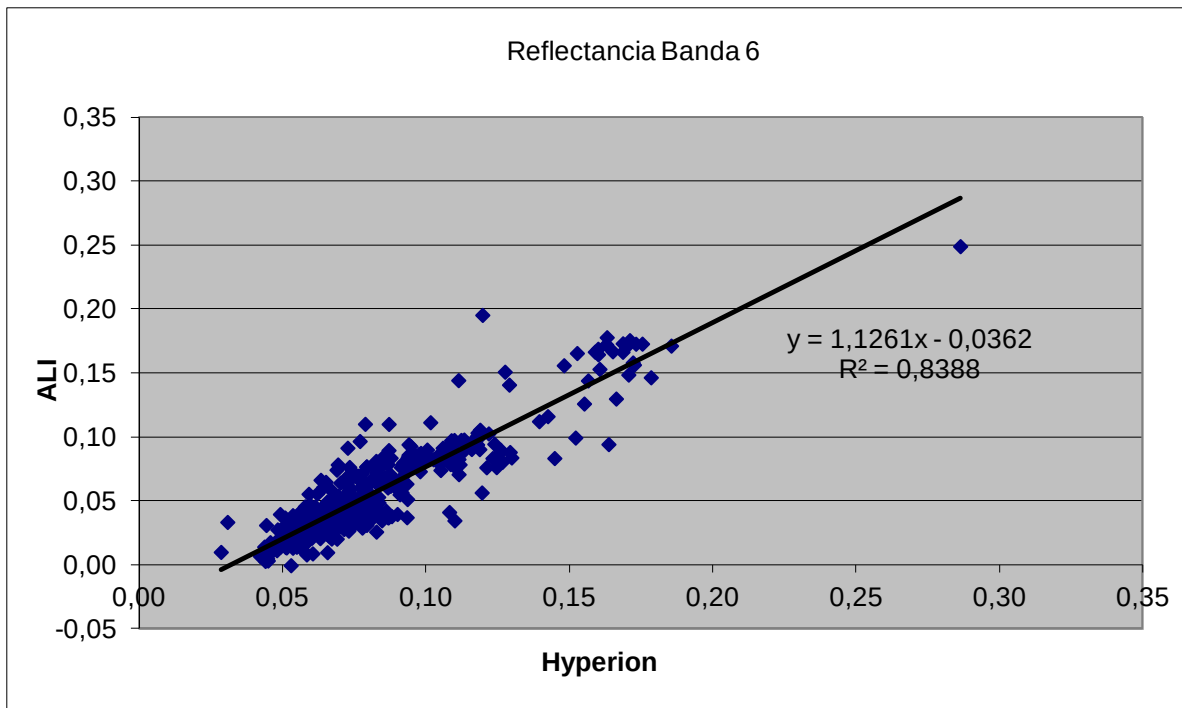


Figura 10: Ajuste de regresión lineal de la banda 6 de ALI en base a los parámetros de Hyperion.

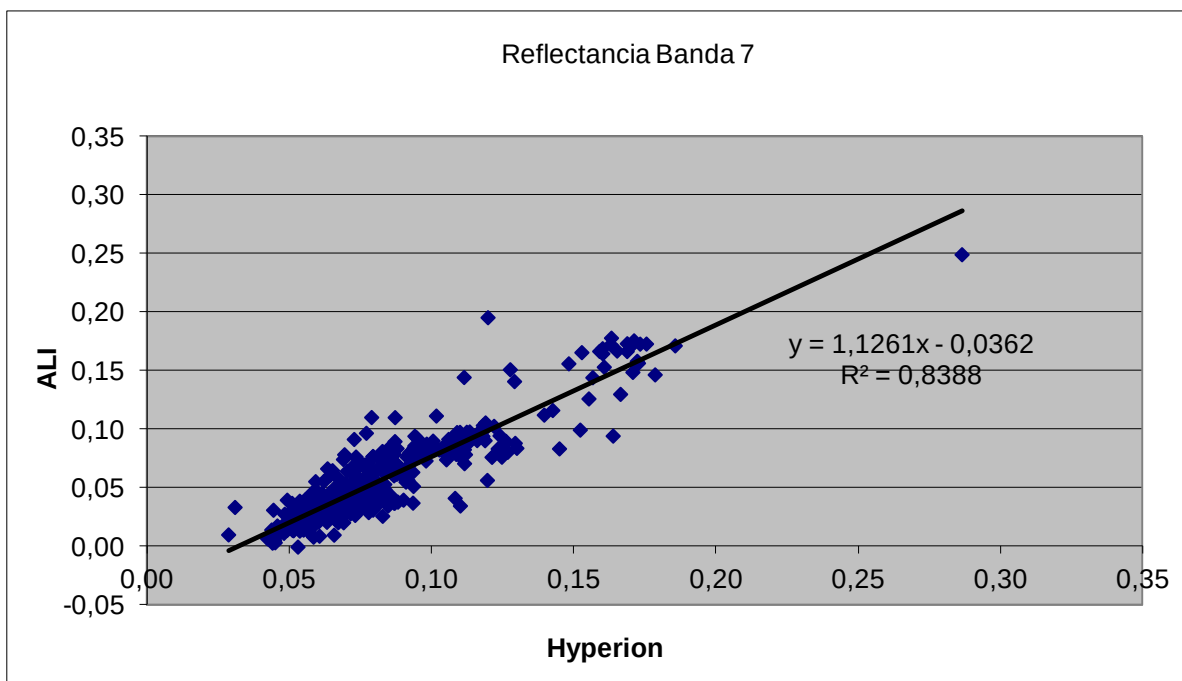


Figura 11: Ajuste de regresión lineal de la banda 7 de ALI en base a los parámetros de Hyperion.

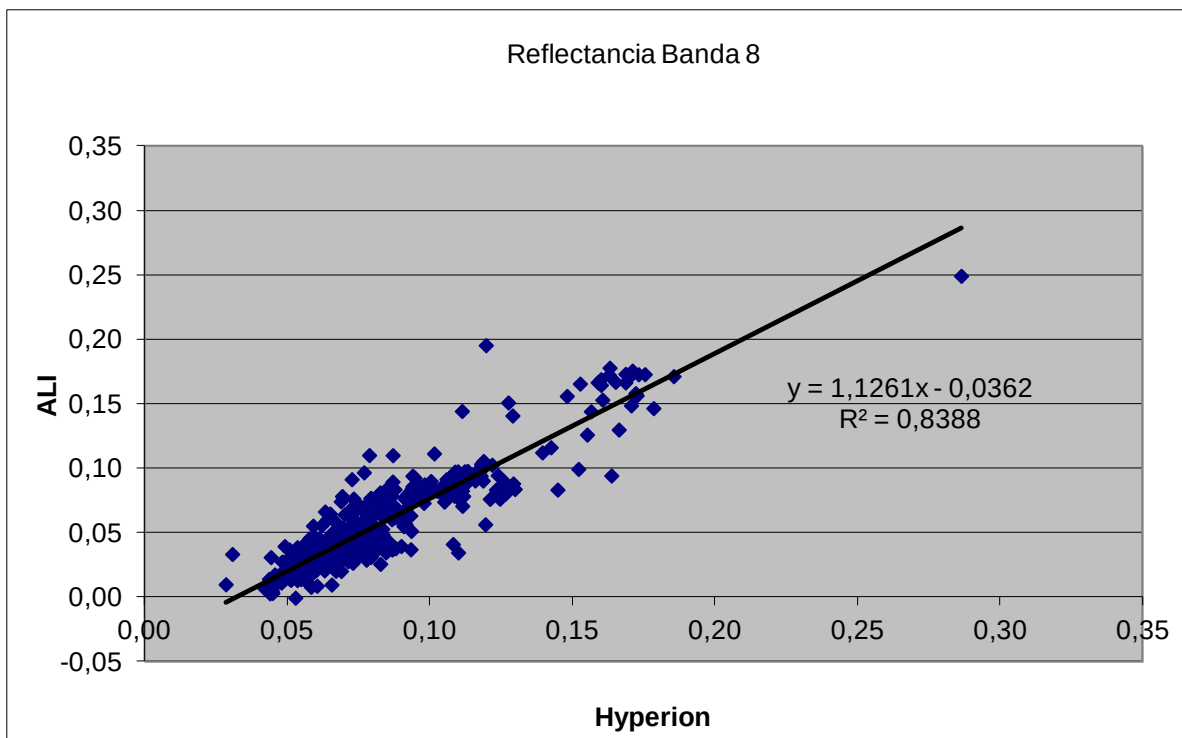


Figura 12: Ajuste de regresión lineal de la banda 8 de ALI en base a los parámetros de Hyperion.

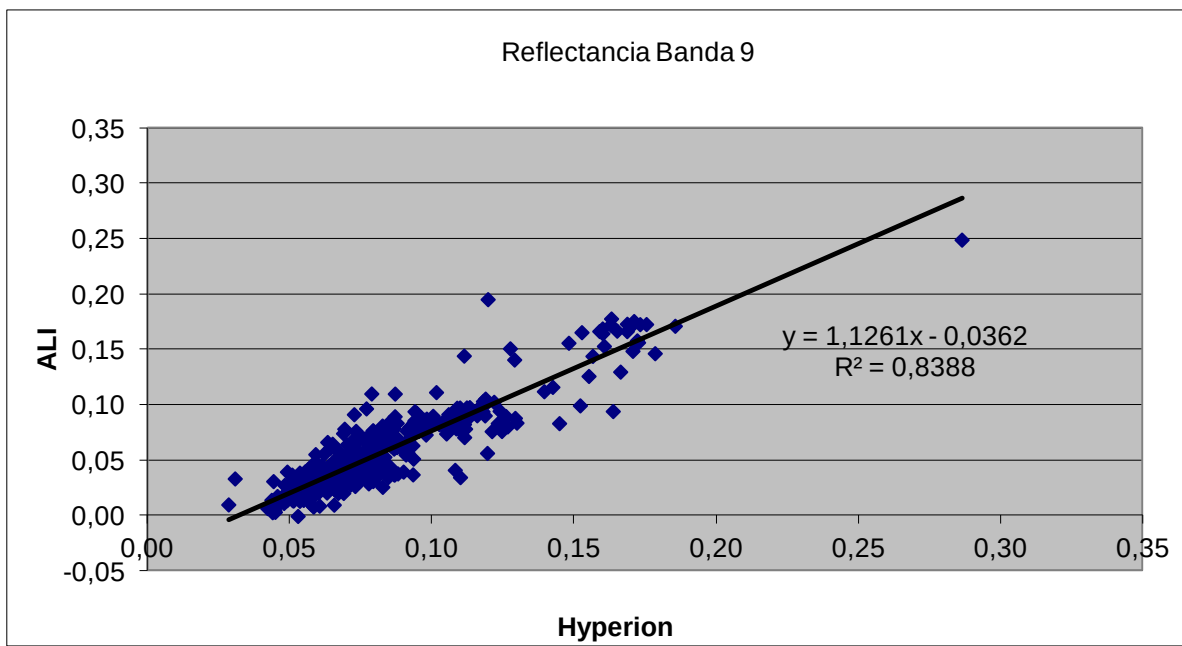


Figura 13: Ajuste de regresión lineal de la banda 9 de ALI en base a los parámetros de Hyperion.

El siguiente cuadro nos muestra un resumen de los modelos en los cuales podemos decir que las primeras bandas poseen los R^2 más bajos, pero los errores de estimación, también son bajos, en las bandas los cuales los R^2 son más altos los errores de estimación también son los más altos pero dentro de esto estos valores no son significativos para rechazar alguna de estas regresiones.

Cuadro 7: Resumen estadístico de los modelos de corrección por banda.

Resumen Modelos						
Banda	B0	B1	R	R cuadrado	Error típico de la estimación	Durbin- Watson
1	-0,126	1,201	0,933	0,871	0,009	1,815
2	-0,079	1,094	0,951	0,905	0,008	1,766
3	-0,044	1,159	0,954	0,92	0,009	1,909
4	-0,021	1,113	0,946	0,894	0,011	1,801
5	-0,016	1,078	0,972	0,944	0,028	1,857
6	-0,015	1,113	0,975	0,951	0,029	1,891
7	-0,007	1,132	0,963	0,927	0,031	1,890
8	-0,007	1,087	0,947	0,897	0,019	1,930
9	-0,036	1,126	0,916	0,839	0,015	1,761

Posterior mente los resultados de los supuestos estadísticos permiten constatar que los modelos ajustados cumplieron con la normalidad, homocedasticidad, autocorrelacion y multicolinealidad.

Cuadro 6: Verificación de supuestos estadísticos.

Verificación de supuestos				
Banda	Normalidad K-S	Homocedasticidad test Levene	AutocorrelaciónDurbin- Watson	Multicolinealidad VIF
1	3,406	0,832	1,815	1,000
2	3,711	0,589	1,766	1,000
3	3,116	0,835	1,909	1,000
4	3,036	0,642	1,801	1,000
5	2,528	0,402	1,857	1,000
6	2,615	0,353	1,891	1,000
7	1,954	0,532	1,890	1,000
8	2,123	0,532	1,930	1,000
9	1,870	0,890	1,761	1,000

4.1.1 Capacidades predictivas.

Cuadro 8. Valores promedios de estadígrafos de capacidades predictivas.

Banda	DA	ECM %
1	1,799	23,116
2	1,808	18,650
3	1,058	13,676
4	1,483	17,164
5	0,607	9,259
6	0,601	8,949
7	0,144	9,309
8	-0,206	10,434
9	-0,560	27,590
Total general	4,435	38,015

Las bandas que presentan sobre estimaciones muestran valores negativos y corresponden a las bandas 8 y 9. Y las bandas que presentan subestimación nos muestra valores positivos y corresponden a las bandas del 1 al 7.

Las bandas que presentan mayores subestimaciones corresponden a las bandas del rango visible (1, 2 y 3), y al infrarrojo cercano. Esto podría estar indicando que sería necesario aumentar la muestra o implementar otro tipo de corrección atmosférica, para el sensor ALI que aun se encuentra en proceso de calibración debido a que es una imagen de corta data.

4.2. Obtención de firmas espectrales.

En este estudio se extrajeron las firmas espectrales de la zona afectada por el incendio, para así poder caracterizar el comportamiento la zona afectada en las diferentes fechas de obtención de las imágenes, a continuación se presentan los gráficos con las firmas espectrales de cada una de las imágenes.

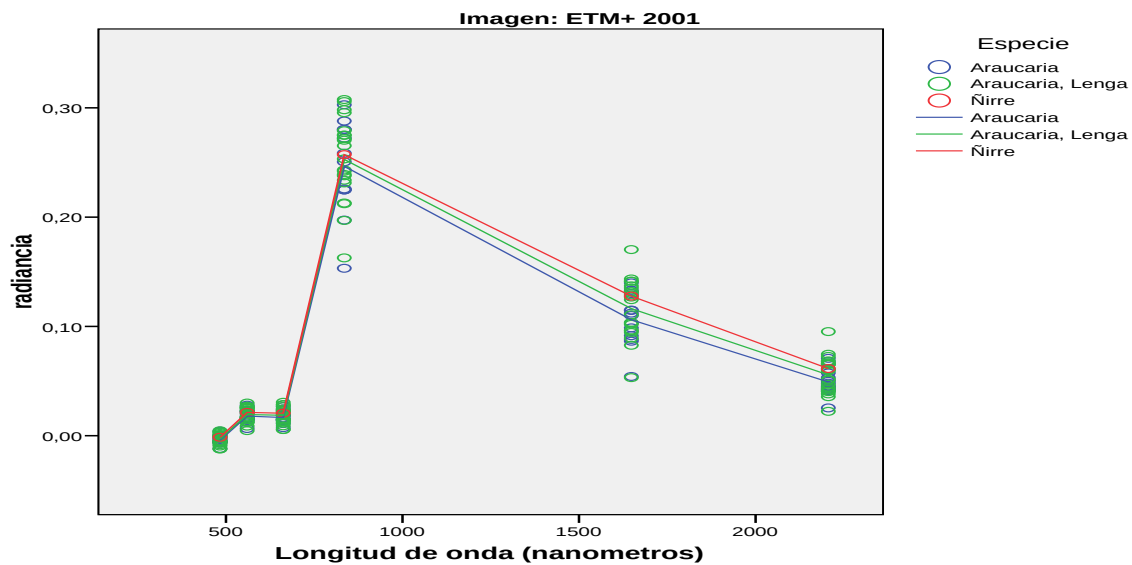


Figura 14: Firmas ETM+ 2001 antes del incendio

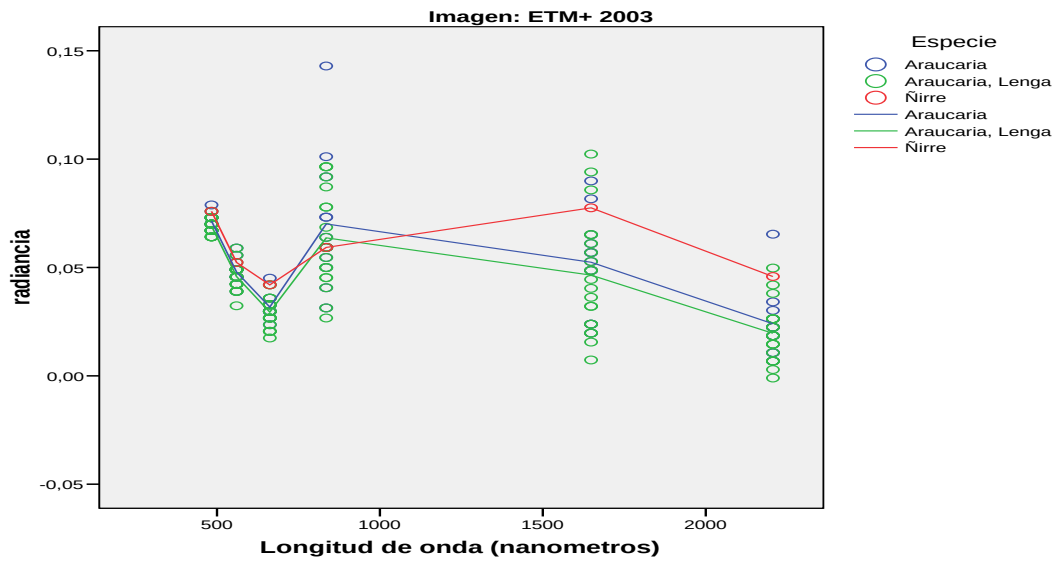


Figura 15: Firmas ETM+ 2003 áreas quemadas



Figura 16: Firmas ASTER 2007 áreas quemadas

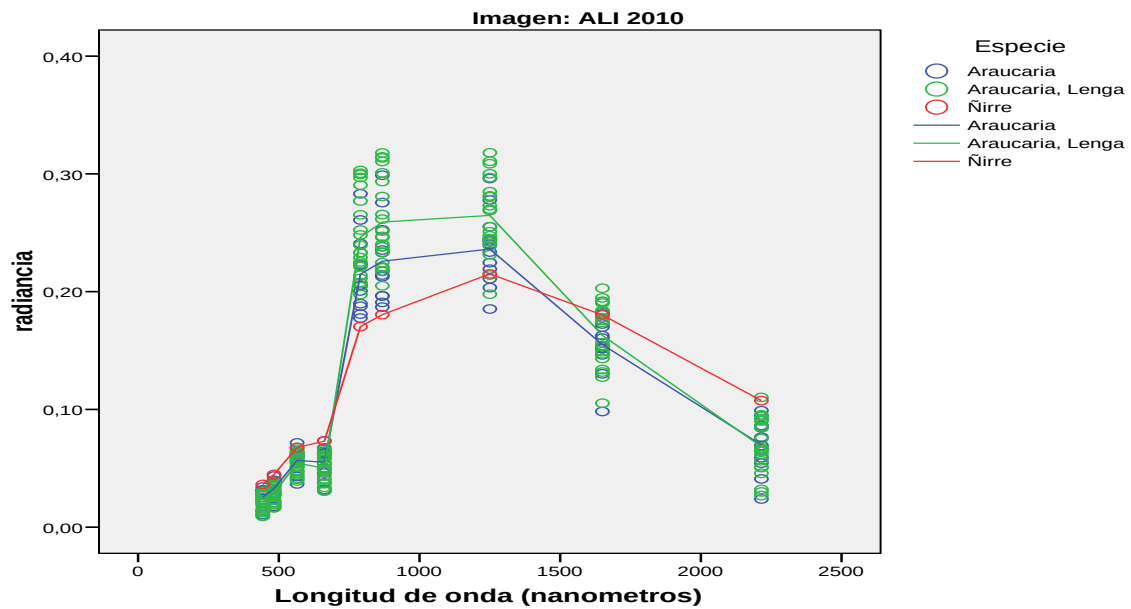


Figura 17: Firmas ALI 2010 áreas quemadas

4.3. Clasificación NDVI.

A partir de los valores obtenidos del índice NDVI, es posible realizar una clasificación de las imágenes satelitales, mediante la intensidad de cobertura vegetal que se encuentra presente en las distintas imágenes (Cuadro 8).

Cuadro 8. Intensidad de cobertura.

Intensidad de cobertura	Cobertura	Color
0.0-0.25	No vegetación	Rojo
0.25-0.50	Escaso	Café Claro
0.50-0.75	Abundante	Verde Claro
0.75-1.00	Denso	Verde Oscuro

Al aplicar la clasificación por intensidad de cobertura del Cuadro 8 en la imagen ETM+ del año 2001, se aprecia que en la zona de estudio, antes de ocurrido el incendio, la mayor parte de la superficie presenta una cobertura vegetal densa (Figura 18). Sólo en algunos sectores se puede identificar zonas sin vegetación, las que corresponden a escoriales y cursos de agua.

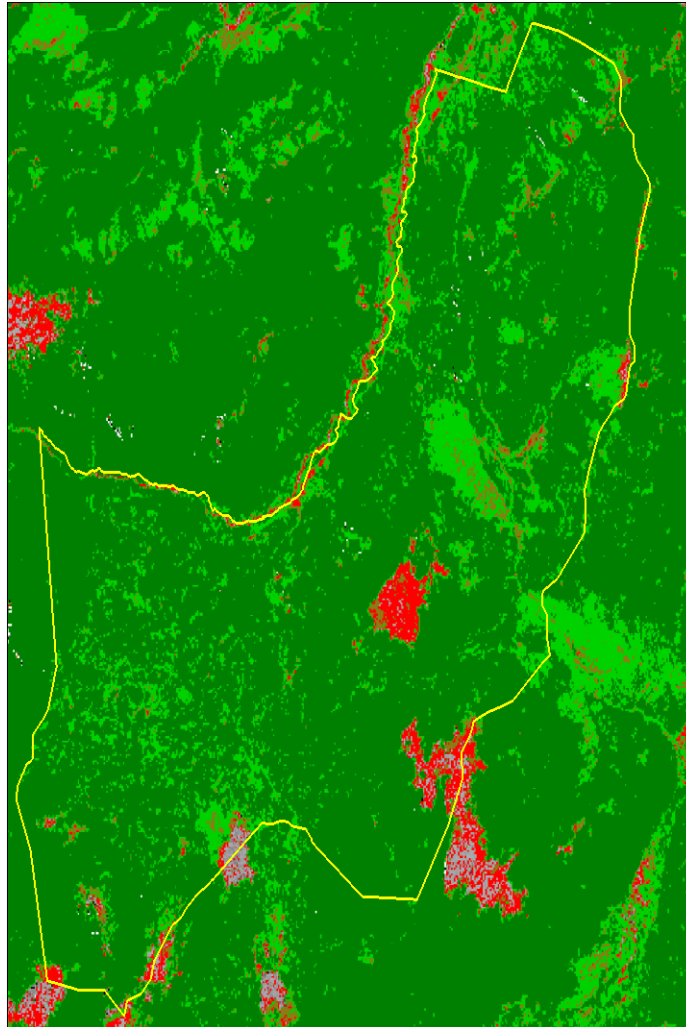


Figura 18. Imagen NDVI/ETM+ del área de estudio, previo al incendio del año 2002.

La imagen ETM+ del año 2003 muestra el cambio en la intensidad de cobertura, respecto de la imagen 2001, luego de aproximadamente un año de ocurrido el incendio (Figura 19). En ella podemos identificar las zonas que fueron más afectadas por el siniestro; los cambios en la intensidad de cobertura son tan drásticos que aquellas zonas clasificadas con vegetación densa pasaron a una categoría de escasa o sin vegetación.

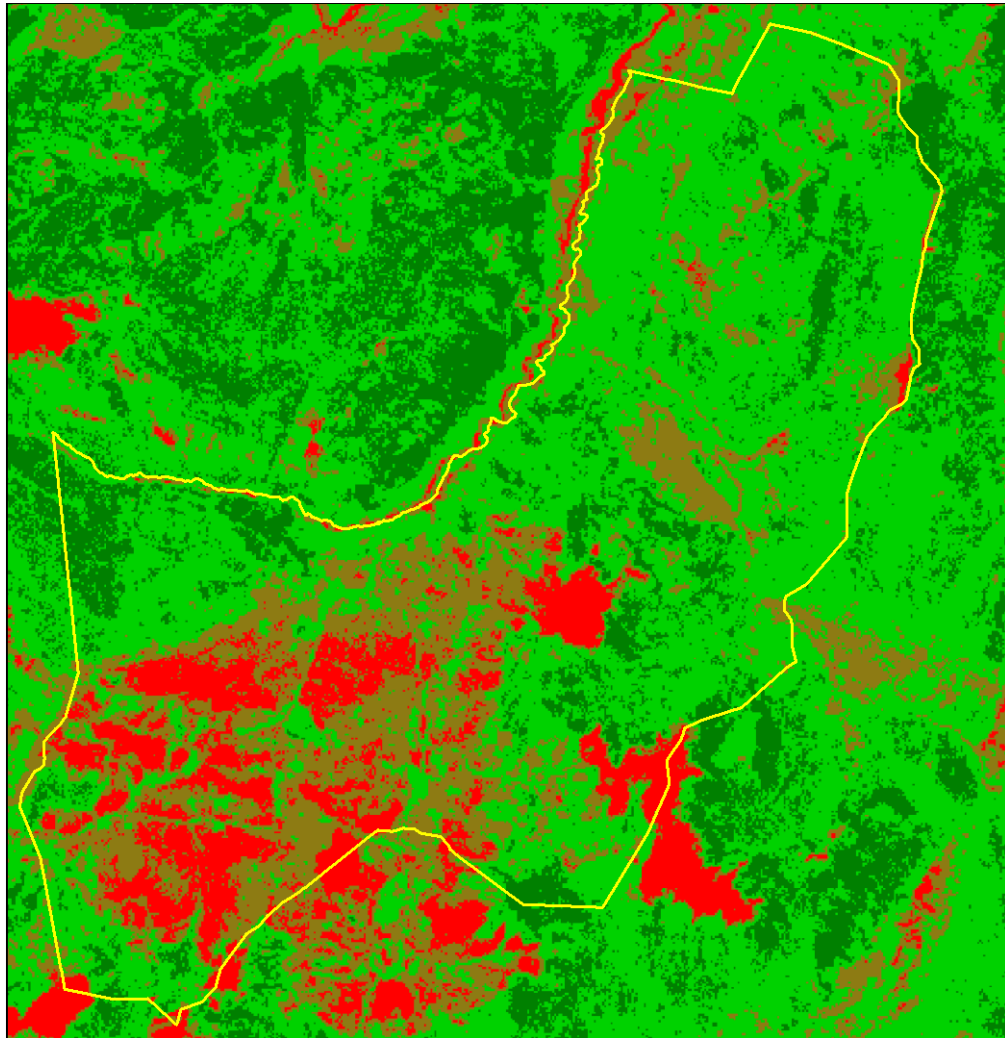


Figura 19. Imagen NDVI/ETM+ del área de estudio, aproximadamente un año después de ser afectada por el incendio.

En la imagen ASTER del año 2007 se observa un cambio en la zona originalmente más afectada por el incendio, apreciándose un grado de recuperación de la cobertura vegetal (Figura 20), de manera que las zonas clasificadas como sin vegetación (año 2003) han evolucionado a escasa vegetación.

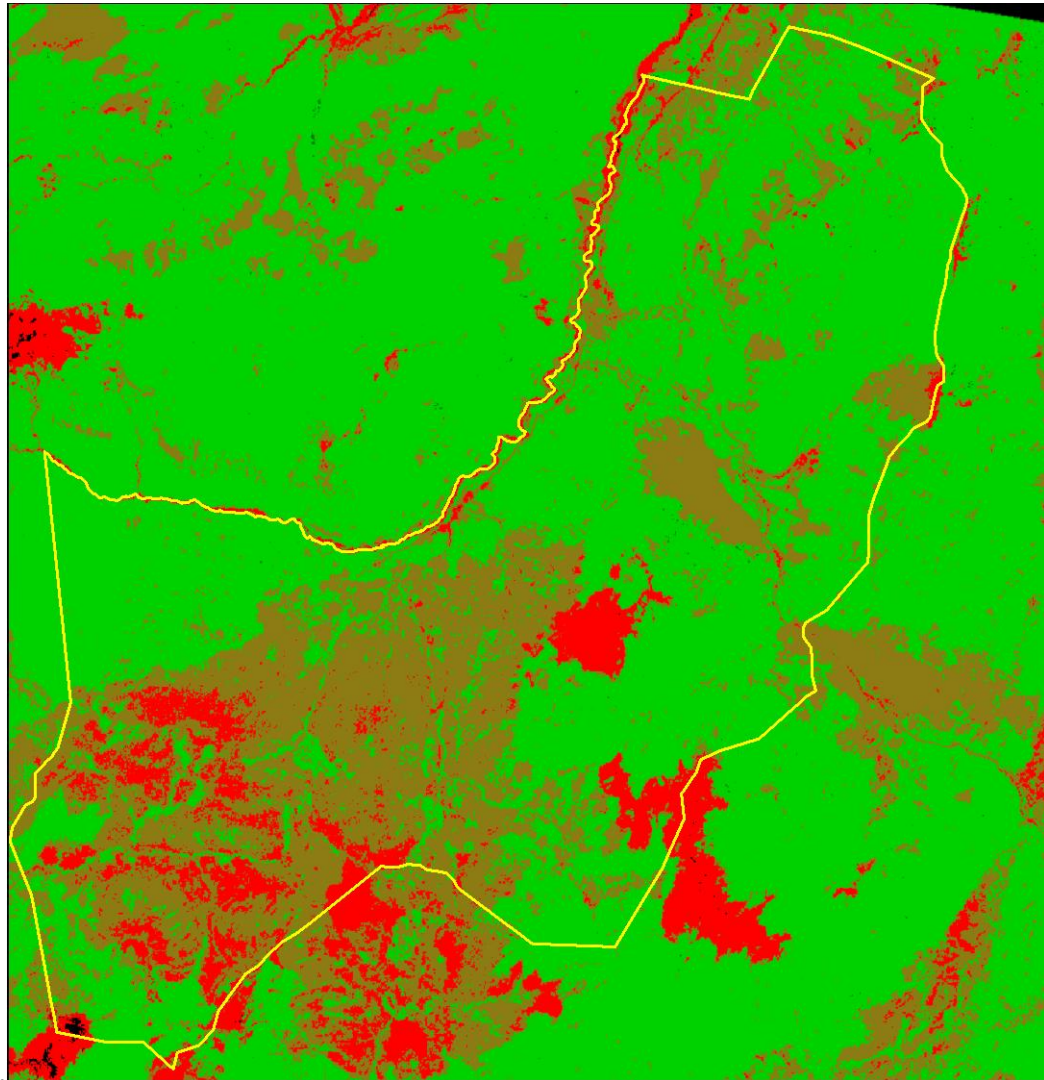


Figura 20. Imagen NDVI/ASTER del área de estudio, a cinco años de ser afectada por el incendio.

En la imagen ALI del año 2010 se puede ver que la zona que fue afectada por el incendio, se encuentra casi en su totalidad con vegetación (Figura 21). En este caso se puede notar que, salvo en algunas pequeñas áreas muy localizadas, aquellas zonas que permanecían sin vegetación en el año 2007, ahora presentan escasa vegetación.

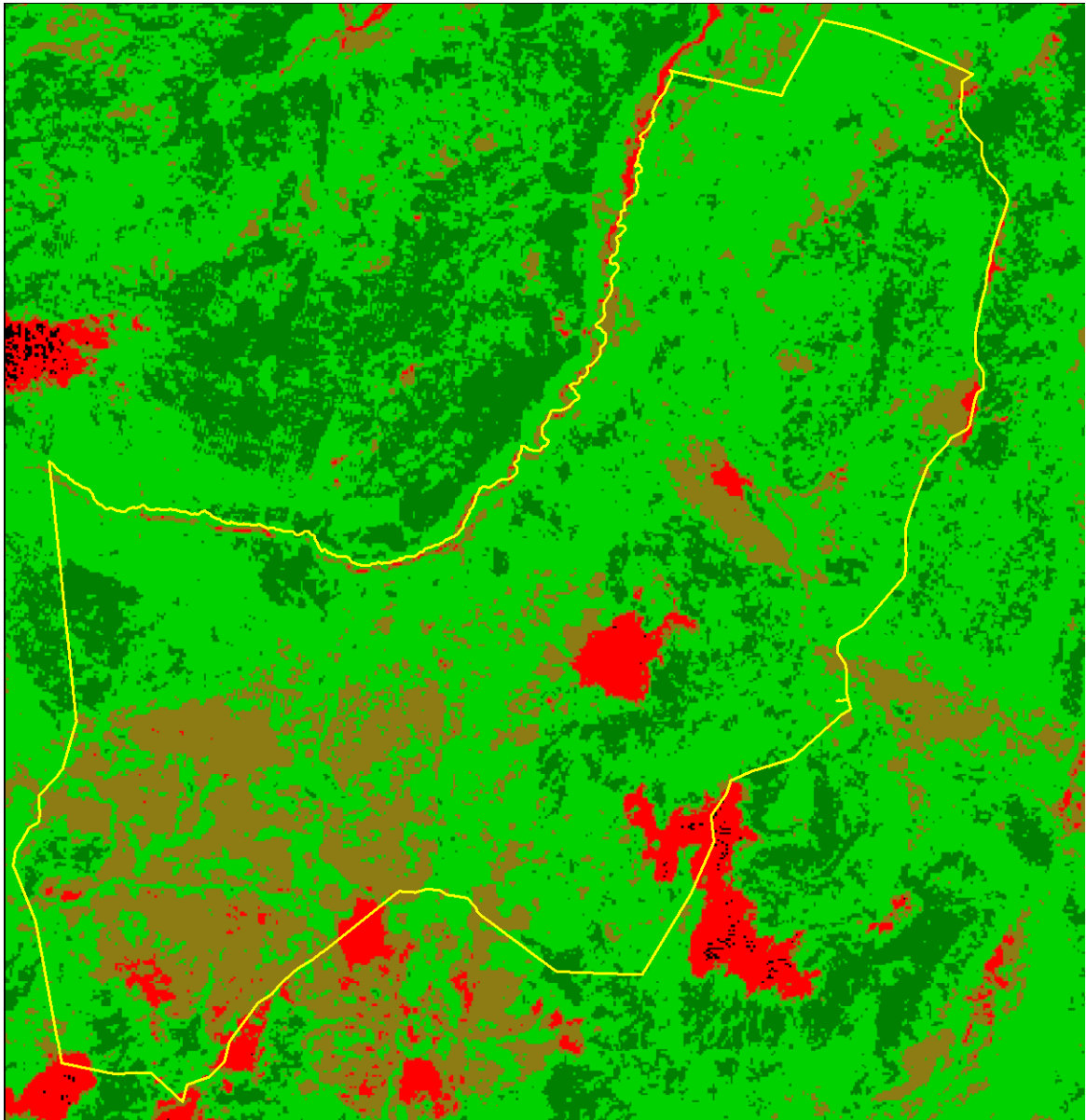


Figura 21. Imagen NDVI/ALI del área de estudio, a ocho años de ser afectada por el incendio.

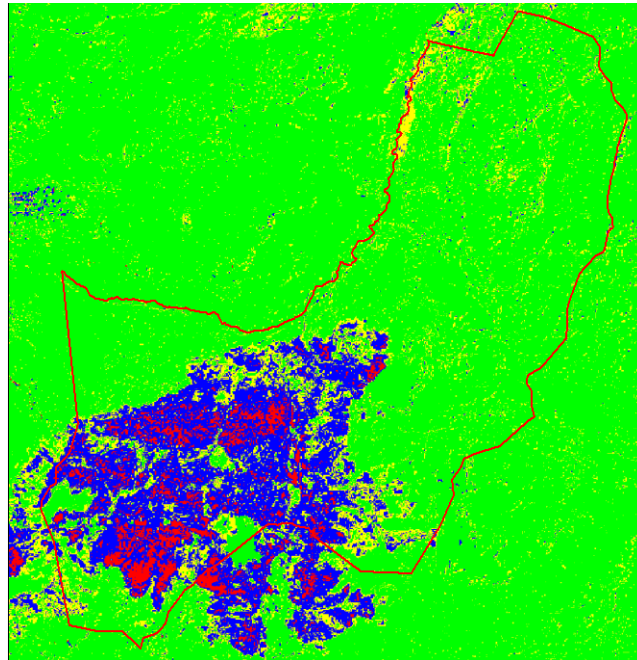
4.4. Imagen de diferencia de NBR Landsat 2001-2003.

Para realizar el cálculo de la diferencia de NBR, se utilizaron las imágenes satelitales ETM+ del año 2001 y 2003. En este caso se definieron cuatro categorías de severidad de daño en base a la diferencia de NBR, clasificadas como alta, media, baja y no quemada (Cuadro 9).

Cuadro 9. Severidad de Daño.

d NBR	Severidad de daño	Color
≥ 0.680	Alto	Rojo
≥ 0.275	Medio	Azul
≥ 0.090	Bajo	Amarillo
≥ 0.0	No Quemado	Verde

Fuente. The Normalized Burn Ratio (NBR) - Brief Outline of Processing Steps FIREMON BR
Cheat Sheet V4, June 2004

**Figura 22.** Intensidad de daño, de acuerdo a las categorías indicadas en el Cuadro 9.

4.5. Análisis Estadístico de índices Espectrales.

Los índices espectrales NDVI y NBR fueron evaluados mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para verificación de normalidad, resultando estadísticamente significativa respecto a la distribución teórica normal.

Cuadro 10: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

	NDVI	NBR
N	136	136
Media	0,577	0,519
Parámetros normales(a,b) Desviación típica	0,216	0,177
Diferencias más extremas Absoluta	0,107	0,089
Positiva	0,095	0,065
Negativa	-0,107	-0,089
Z de Kolmogorov-Smirnov	1,247	1,033
Sig. asintót. (bilateral)	0,089	0,236

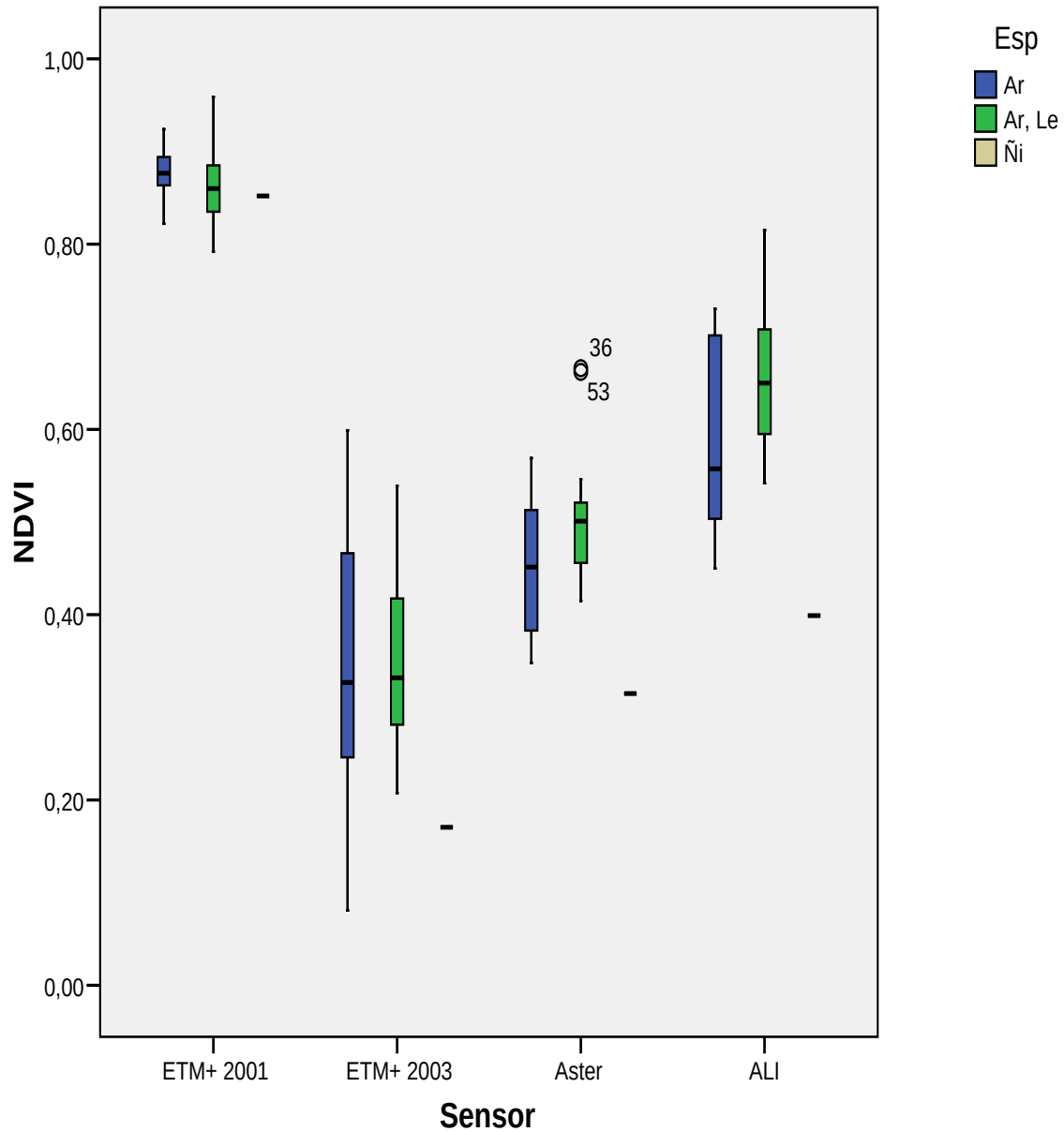
a La distribución de contraste es la Normal.

b Se han calculado a partir de los datos.

4.5.1. Diagramas de cajas

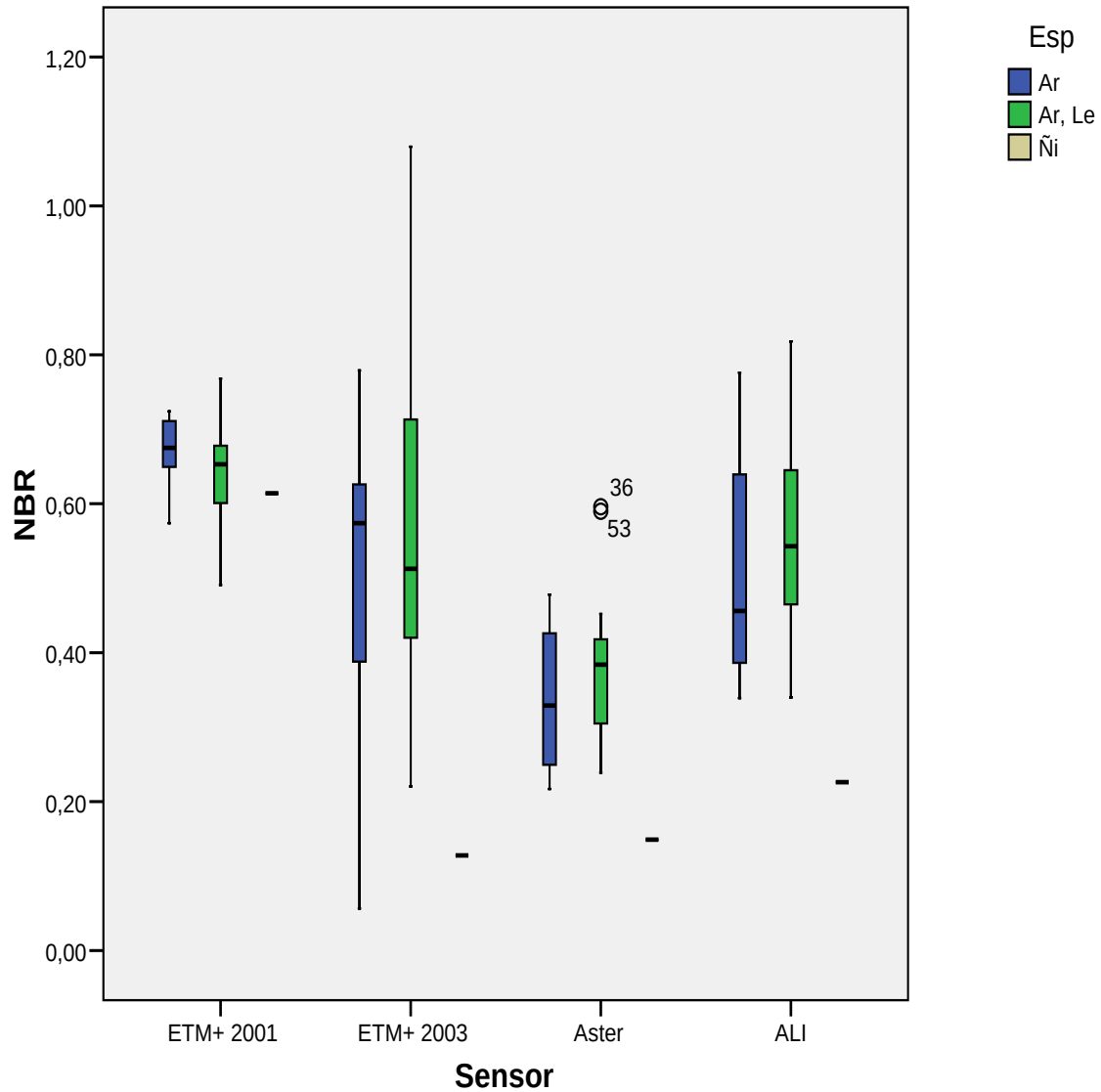
Los índices espectrales fueron graficados mediante diagramas de cajas para representar los estadígrafos de posición y dispersión para las especies presentes en las zonas afectadas por el incendio forestal. Mediante un análisis visual se puede apreciar que los Rodales afectados por el incendio correspondiente a especies arbóreas se han recuperado más que los ROIs de especies arbustivas, como en este caso son los rodales de Ñirre.

Figura 23. Diagrama de caja de los NDVI por especie de los rodales afectados por el incendio.



En ambos gráficos de los índices NDVI y NBR se observa una gran dispersión de valores para la escena del sensor ETM+ del año 2003, lo que permite comprobar lo que se aprecia en los resultados de índices e imágenes de diferencias de NDVI y NBR respecto a la heterogeneidad de la severidad del daño del incendio forestal.

Figura 24. Diagrama de caja de los NBR por especie de los rodales afectados por el incendio.



4.5.2. Diseño de Experimento.

Los índices espectrales fueron evaluados mediante un diseño de experimento correspondiente a un Análisis de varianza de dos factores (Sensor y Especie) completamente al azar. Los resultados fueron los siguientes:

4.5.2.1. Rodales de Araucaria.

Cuadro 11. Análisis de varianza para índices espectrales de rodales de *Araucaria Araucana* ANOVA(a)

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
NDVI	Inter-grupos	1,920	3	0,640	60,425	0,000
	Intra-grupos	0,466	44	0,011		
	Total	2,386	47			
NBR	Inter-grupos	0,649	3	0,216	11,221	0,000
	Intra-grupos	0,848	44	0,019		
	Total	1,496	47			

a Especie = Araucaria

Los resultados permiten constatar lo observado en los gráficos de cajas, respecto a las diferencias significativas en los índices espectrales NDVI y NBR. Respecto a las pruebas de contraste de comparación de medias, se aplicaron las pruebas de Duncan y Tukey con un 95% de confiabilidad, lo que entregó los siguientes resultados:

Cuadro 12. Resultados pruebas de contraste de comparación de medias de Duncan y Tukey NDVI(b).

Sensor	N	Subconjunto para alfa = .05			
	1	1	2	3	4
HSD de ETM+ 2003 Tukey(a)	12		0,338		

Duncan(a)	Aster	12			0,4526	
	ALI	12				0,586
	ETM+ 2001	12	0,874			
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
	ETM+ 2003	12		0,338		
	Aster	12			0,452	
	ALI	12				0,586
	ETM+ 2001	12	0,874			
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 12,000.

b Especie = Araucaria

Lo interesante de la comparación de grupos homogéneos es que muestra la tendencia lógica de recuperación de la vegetación, en una secuencia cronológica correspondiente a que el menor NDVI corresponde a la imagen ETM+ del 2003 (post-incendio), luego, un NDVI de 0,45 correspondiente a la ASTER del año 2007, después un NDVI de 0,58 en la imagen ALI del año 2010, y obviamente el mayor valor corresponde a la situación pre-incendio con un NDVI de 0,87 en la imagen ETM+ del año 2001.

En el siguiente cuadro, se observan los resultados para NBR, permitiendo comprobar lo mencionado por otros autores, que señalan que el NBR no es tan sensible para la detección de áreas quemadas, pero en este caso, se puede deber principalmente a la diferencia de años entre el incendio y la primera imagen post-incendio que se tuvo disponible.

Cuadro 13.Resultados pruebas de contraste de comparación de medias de Duncan y Tukey para el **NBR(b)**

Sensor		N	Subconjunto para alfa = .05		
		1	1	2	3
HSD de Tukey(a)	Aster	12		0,340	
	ETM+	12			0,497
	2003	12			0,510
	ALI	12			
	ETM+	12	0,669		
	2001	12	0,669		
Duncan(a)	Sig.		1,000	1,000	0,996
	Aster	12		0,340	
	ETM+	12			0,497
	2003	12			0,510
	ALI	12			
	ETM+	12	0,669		
	2001				
	Sig.		1,000	1,000	,817

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 12,000.

b Especie = Araucaria

4.5.2.2. Rodales de Araucaria y Lenga.

Cuadro 14. Análisis de varianza para índices espectrales de rodales de *Araucaria Araucana* y *Nothofagus pumilio*.

ANDEVA (a)

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
NDV I	Inter- grupos	3,074	3	1,025	161,082	0,000
	Intra- grupos	0,509	80	0,006		
	Total	3,582	83			
NBR	Inter- grupos	0,836	3	0,279	14,835	0,000
	Intra- grupos	1,503	80	0,019		
	Total	2,339	83			

a Especie = Araucaria, Lenga

Cuadro 15. Resultados pruebas de contraste de comparación de medias de Duncan y Tukey
NDVI(b)

Sensor		N	Subconjunto para alfa = .05			
		1	1	2	3	4
HSD de Tukey(a)	ETM+ 2003	21		0,348		
	Aster	21			0,500	
	ALI	21				0,658
	ETM+ 2001	21	0,864			
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
	ETM+ 2003	21		0,348		
	Aster	21			0,500	
	ALI	21				0,658
	ETM+ 2001	21	0,864			
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
	ETM+ 2003	21		0,348		
	Aster	21			0,500	
	ALI	21				0,658
Duncan(a)	ETM+ 2003	21		0,348		
	Aster	21			0,500	
	ALI	21				0,658
	ETM+ 2001	21	0,864			
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
	ETM+ 2003	21		0,348		
	Aster	21			0,500	
	ALI	21				0,658
	ETM+ 2001	21	0,864			
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
	ETM+ 2003	21		0,348		
	Aster	21			0,500	
	ALI	21				0,658

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 21,000.

b Especie = Araucaria, Lenga

Cuadro 16. Resultados pruebas de contraste de comparación de medias de Duncan y Tukey para el **NBR(b)**

Sensor		N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	1	2
HSD de Tukey(a)	Aster	21		0,375
	ALI	21	0,567	
	ETM+ 2003	21	0,572	
	ETM+ 2001	21	0,644	
	Sig.		0,274	1,000
	Duncan(a) Aster	21		0,375
	ALI	21	0,567	
Duncan(a)	ETM+ 2003	21	0,572	
	ETM+ 2001	21	0,644	
	Sig.		0,090	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 21,000.

b Especie = Araucaria, Lenga

4.5.2.3. Análisis de Conglomerados Jerárquicos.

Todas las bandas espectrales y los índices obtenidos fueron evaluados mediante Análisis de conglomerados jerárquicos. Las firmas promedios de los ROIs, obtenidas en cada imagen procesada de los sensores son las siguientes:

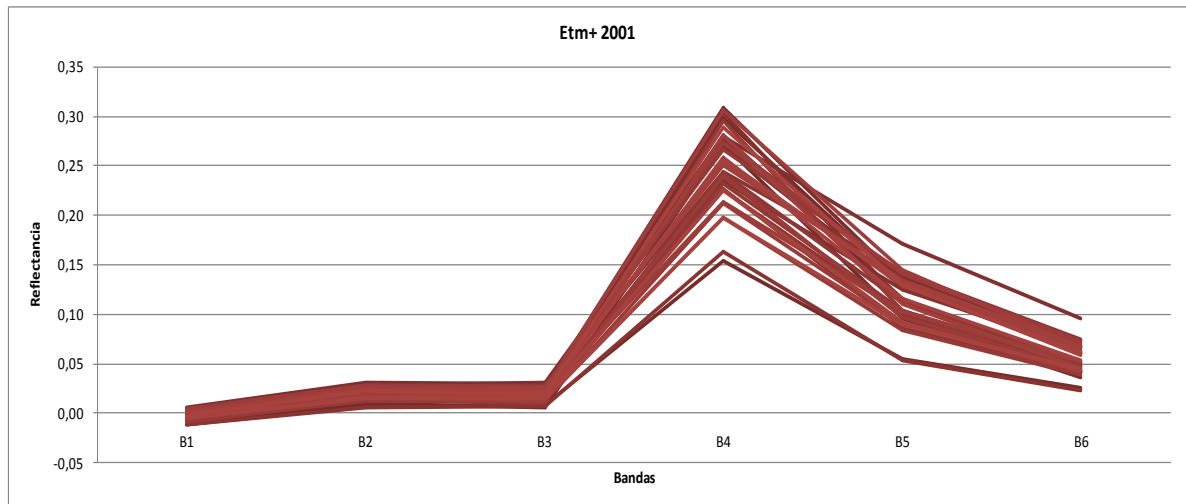


Figura 25. Firmas espectrales de la imagen Etm+ 2001

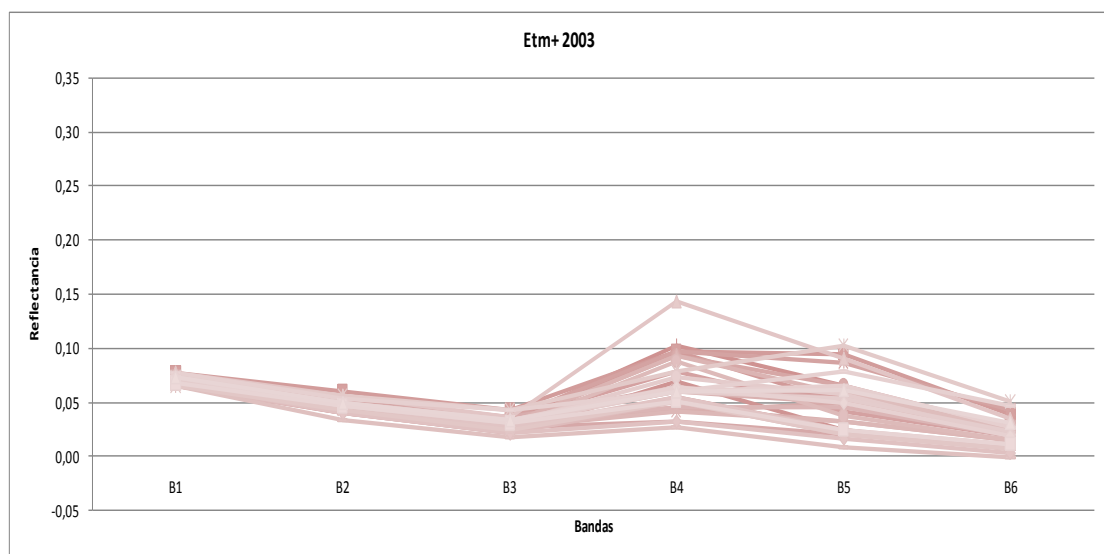


Figura 26. Firmas espectrales de la imagen Etm+ 2003

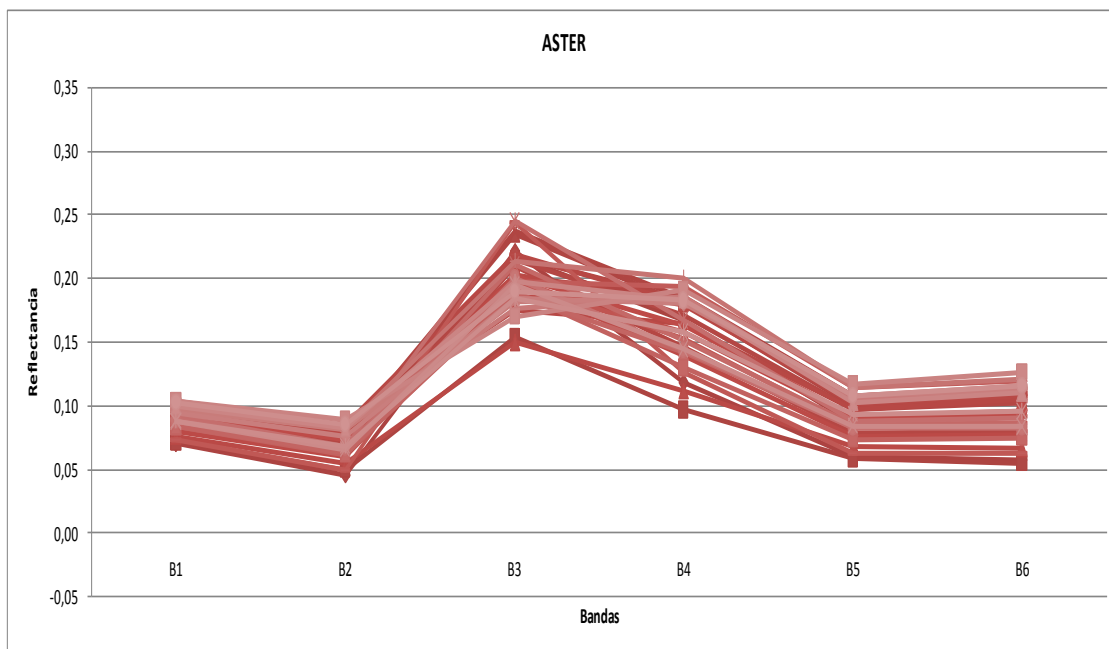


Figura 27. Firmas espectrales de la imagen Aster 2007

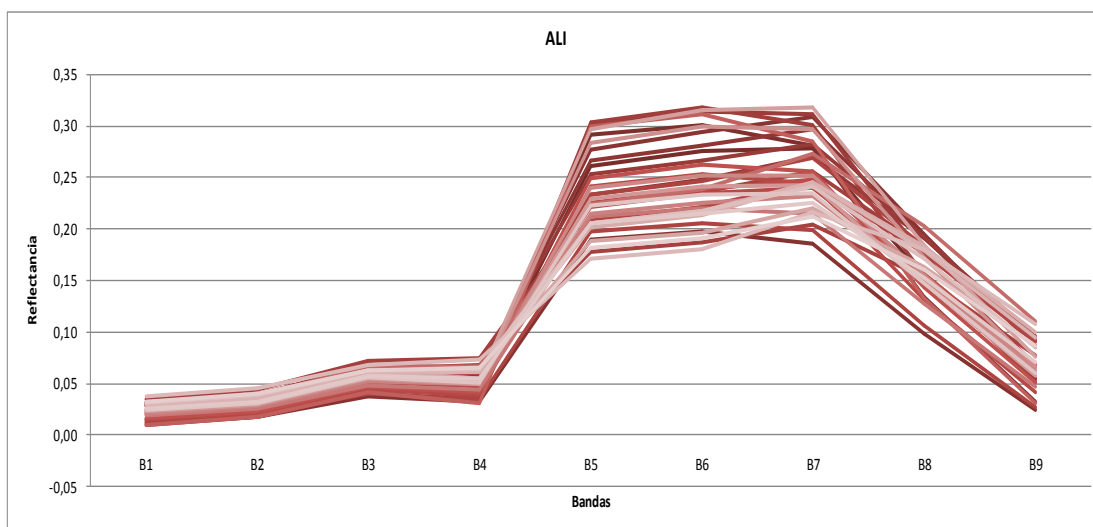


Figura 28. Firmas espectrales de la imagen ALI 2010

El análisis de conglomerados jerárquicos permitió identificar aquellos sectores que fueron más afectados por el incendio forestal. Los conglomerados obtenidos fueron los siguientes:

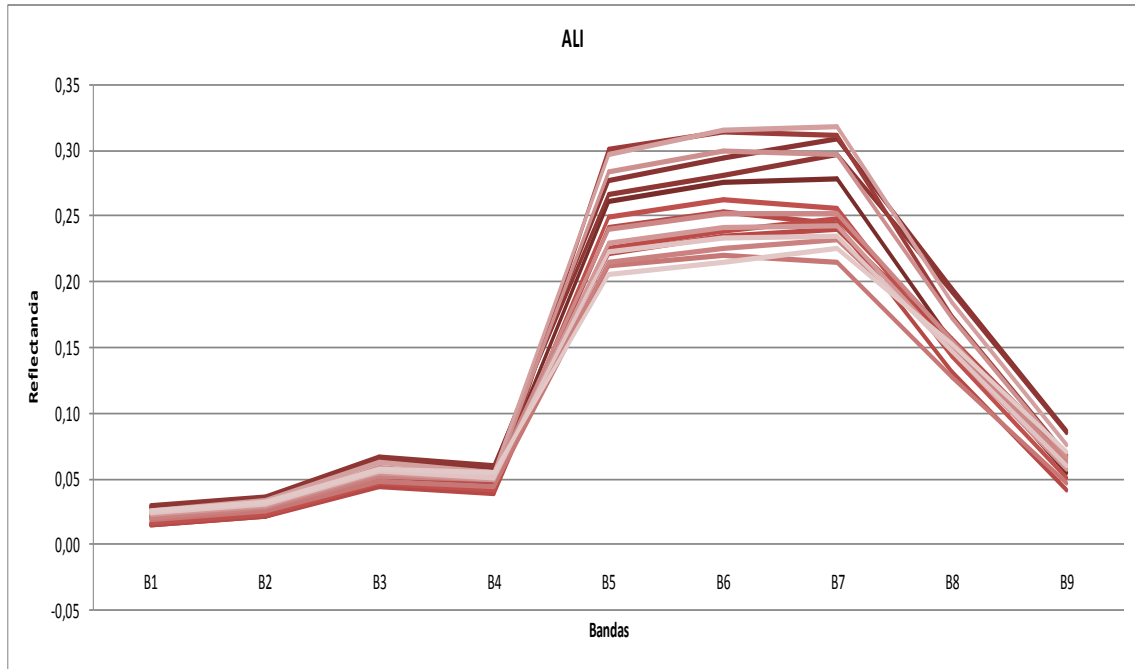


Figura 29. Conglomerados de índices espectrales de la imagen Sensor ALI 2010 Conglomerado 1

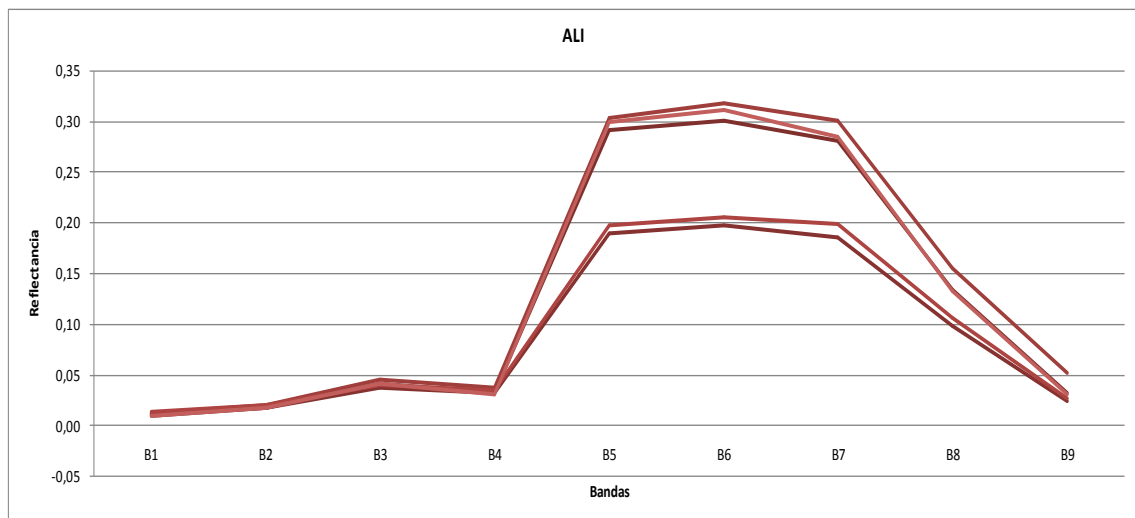


Figura 30. Conglomerados de índices espectrales de la imagen Conglomerado 2

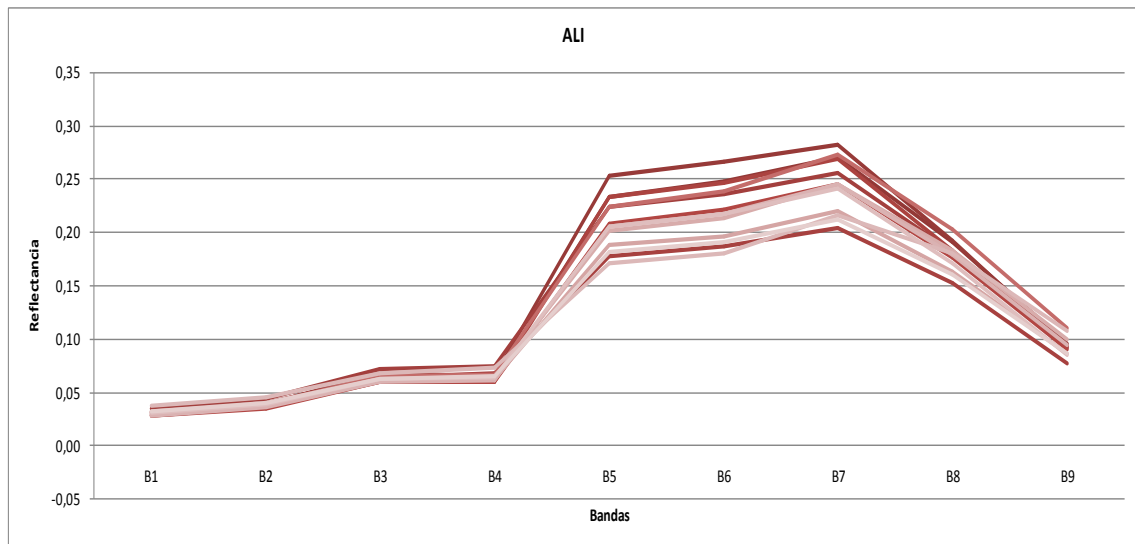


Figura 31. Conglomerados de índices espectrales de la imagen Conglomerado 3

Los resultados muestran que los conglomerados obtenidos, se lograron principalmente por las diferencias en las bandas del subsistema VNIR, principalmente en la reflectancia de la banda 3 y banda 4 donde los valores son menores a 0,05 en el conglomerado 2, similares a 0,05 en el conglomerado 1, y mayores a 0,05 en el conglomerado 3.

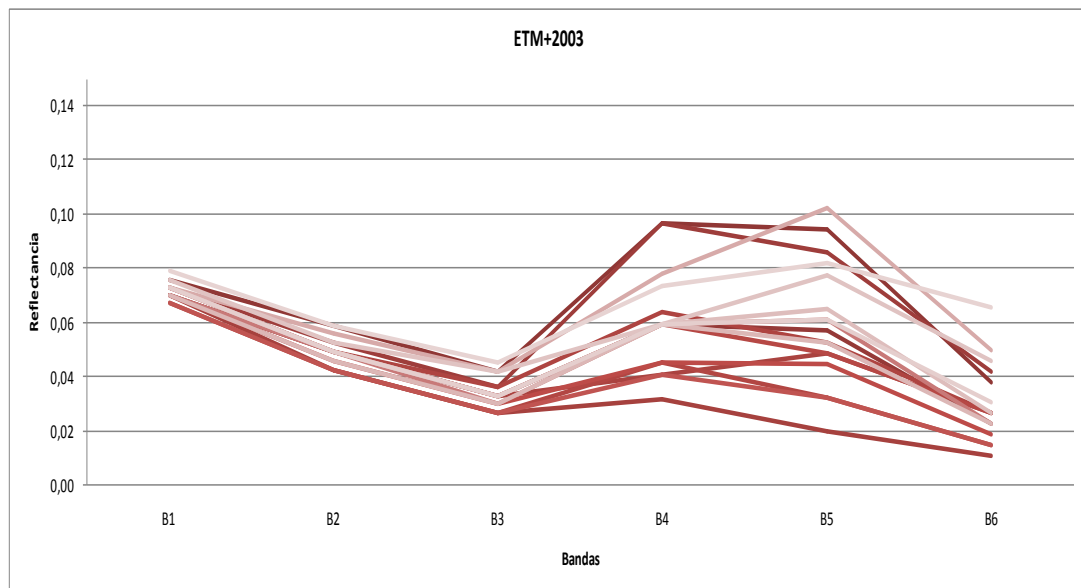


Figura 32. Conglomerados de índices espectrales de la imagen ETM+2003 Conglomerado 1

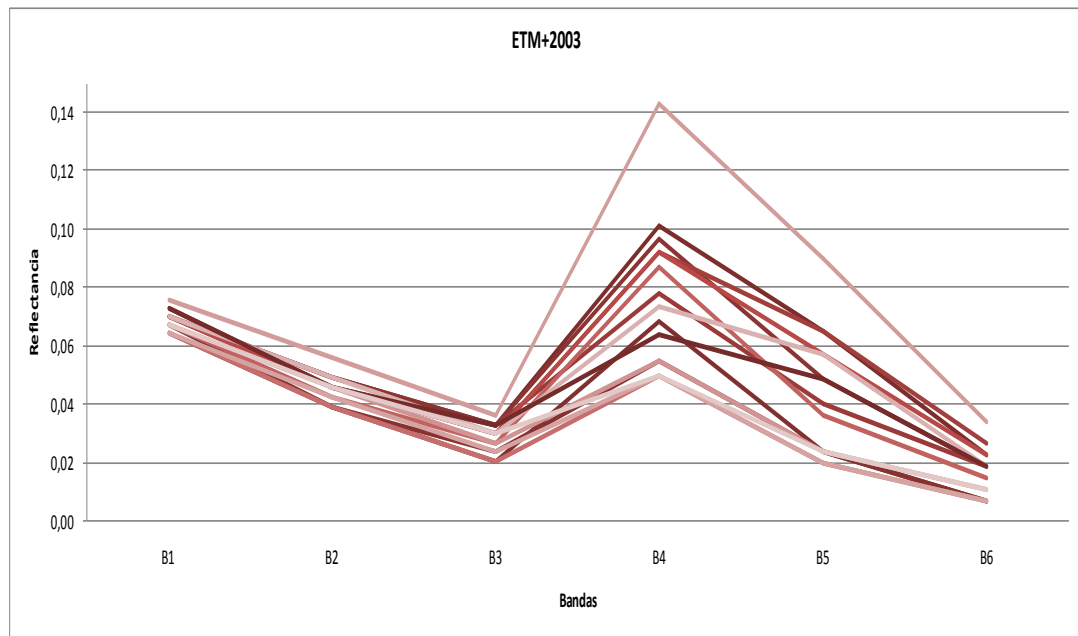


Figura 33. Conglomerados de índices espectrales de la imagen ETM+2003 Conglomerado 2

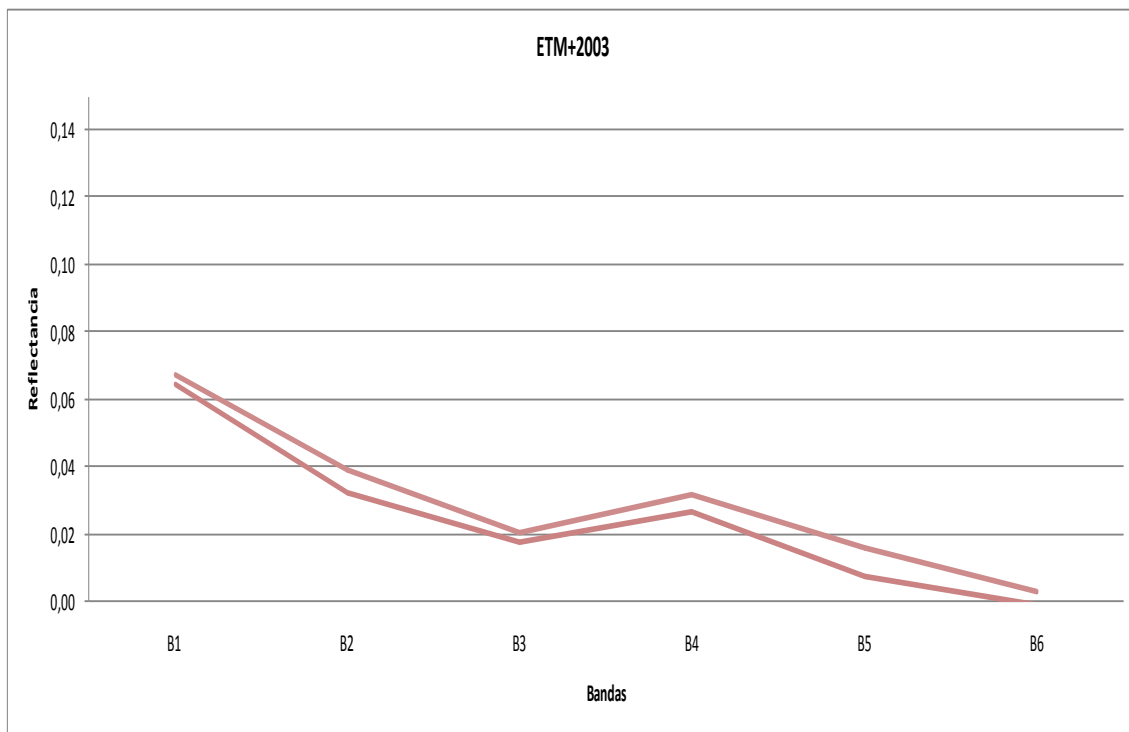


Figura 34. Conglomerados de índices espectrales de la imagen ETM+2003 Conglomerado 3

4.5.2.4. Muestreo de Áreas quemadas.

Se efectuó un muestreo sistemático en las áreas quemadas sobre la imagen ETM+ del 2003, con una grilla cuadrada de 250m^2 y se seleccionaron todas aquellas unidades muestrales que estuviesen completamente contenidas dentro de las áreas quemadas de la fotointerpretación de áreas quemadas. La distribución espacial y la localización de las 103 unidades muestrales obtenidas fue la siguiente:

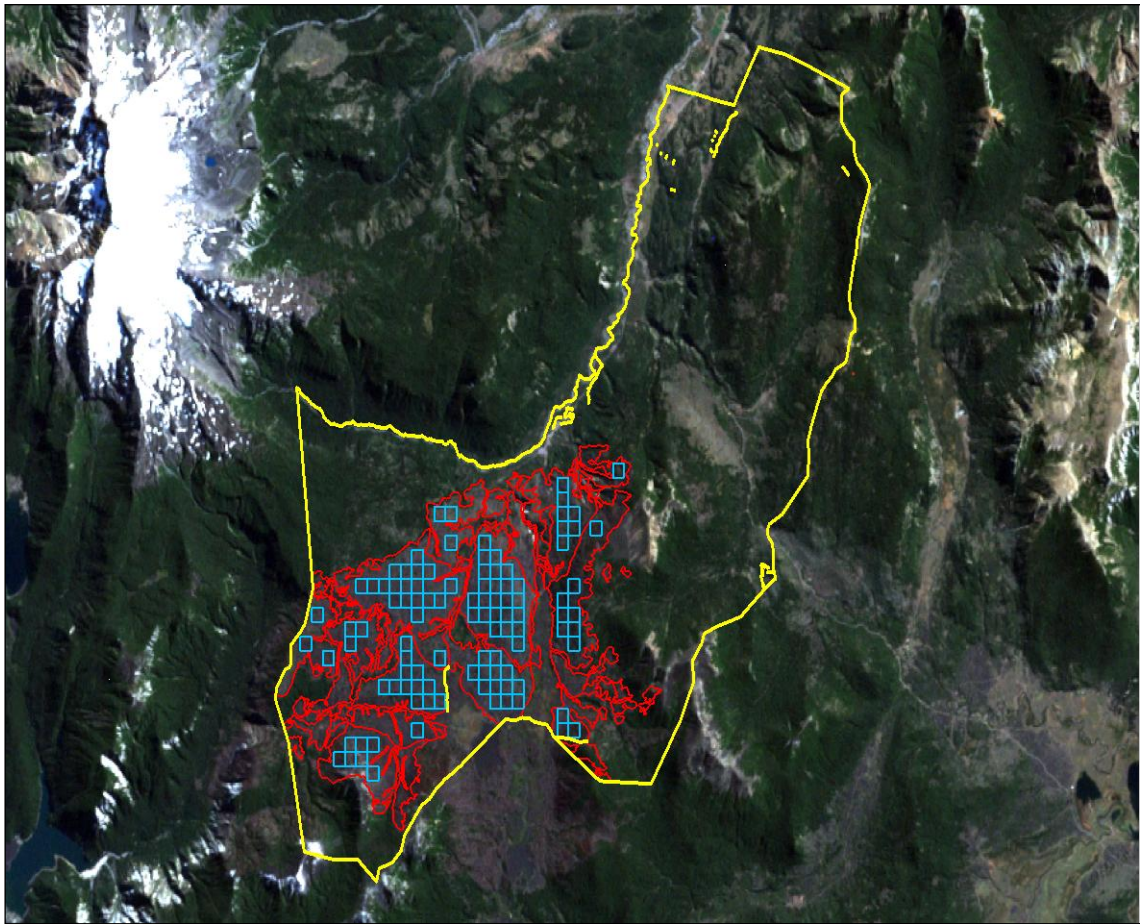


Figura 35. Distribución espacial y localización de las 103 unidades muestrales sobre áreas quemadas.

La superficie quemada corresponde a 2307,3 hectáreas, de las cuales, con las 103 unidades muestrales de 6.25 hectáreas cada una, se realizó el muestreo de 643.7 hectáreas, correspondientes al 27.9% del incendio en el Predio.

Mediante las unidades muestrales se obtuvieron las firmas espectrales y los índices espectrales NDVI, NBR, BAI, NDWI y NMDI con los estadígrafos calculados mediante aproximación al Muestreo aleatorio simple que se presentan en la Cuadro 17:

Cuadro 17. Estadígrafos descriptivos para los índices espectrales NDVI, NBR, NDWI y NMDI, Calculados mediante muestreo aleatorio simple.

Variable	Promedio	Desv.est	C.V.%	E. Muestreó	Lim.Inf	Lim.Sup
B1	0.0775	0.0038	4.9421	0.9659	0.0699	0.0851
B2	0.0549	0.0050	9.0772	1.7740	0.0450	0.0647
B3	0.0454	0.0068	14.9451	2.9209	0.0319	0.0589
B4	0.0769	0.0180	23.4494	4.5829	0.0411	0.1127
B5	0.0914	0.0233	25.5446	4.9924	0.0451	0.1376
B7	0.0567	0.0206	36.4161	7.1172	0.0157	0.0976
NDVI	0.2505	0.0844	33.6876	6.5839	0.0831	0.4179
NBR	-0.1740	0.1963	-112.7905	-22.0437	-0.5633	0.2153
BAI	92.6361	34.7660	37.5296	7.3348	23.6780	161.5942
NDWI	-0.0755	0.1217	-161.2041	-31.5057	-0.3170	0.1660
NMDI	0.3918	0.1198	30.5823	5.9770	0.1541	0.6294

A continuación se realizó un análisis de conglomerados de K-medias para determinar 4 grupos de firmas espectrales y las estadísticas descriptivas de los índices espectrales para analizar diferencias significativas entre los índices obtenidos. Los conglomerados de firmas espectrales son los siguientes (Figuras 36, Figuras 37, Figuras 38, Figuras 39):

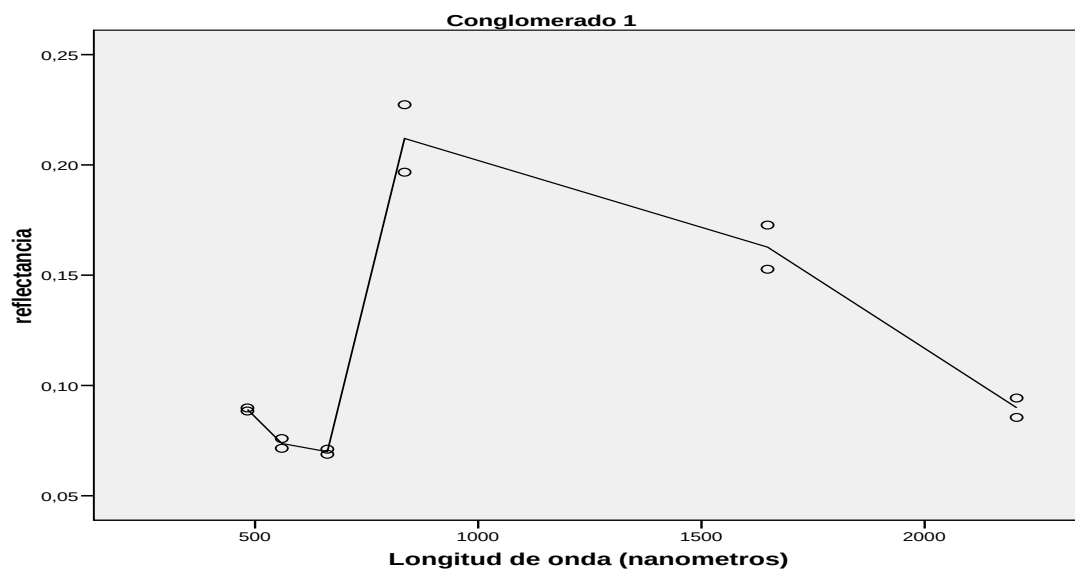


Figura 36. Conglomerados de firmas espectrales Conglomerado 1.

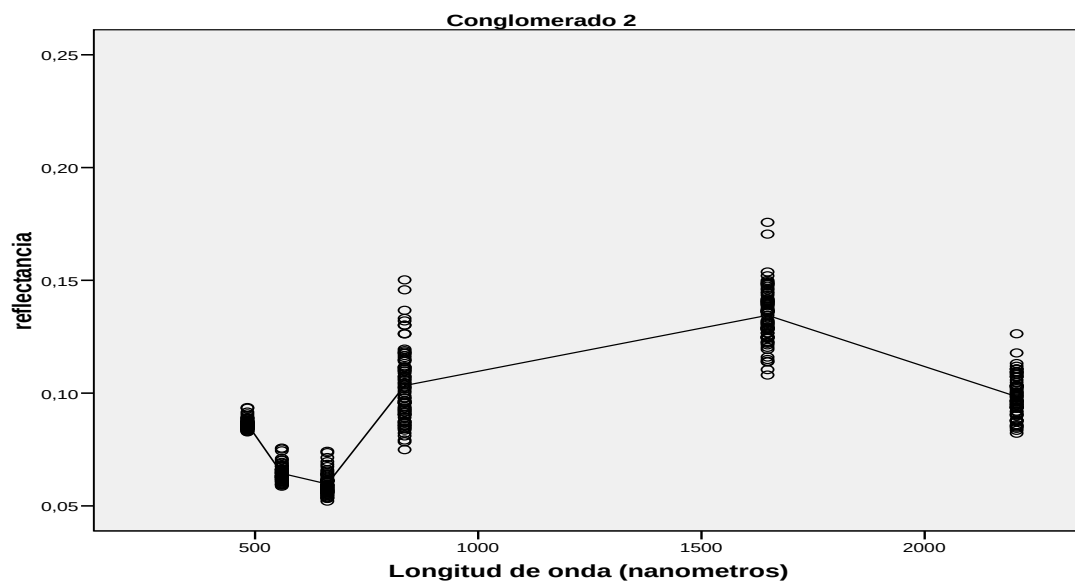


Figura 37. Conglomerados de firmas espectrales Conglomerado 2.

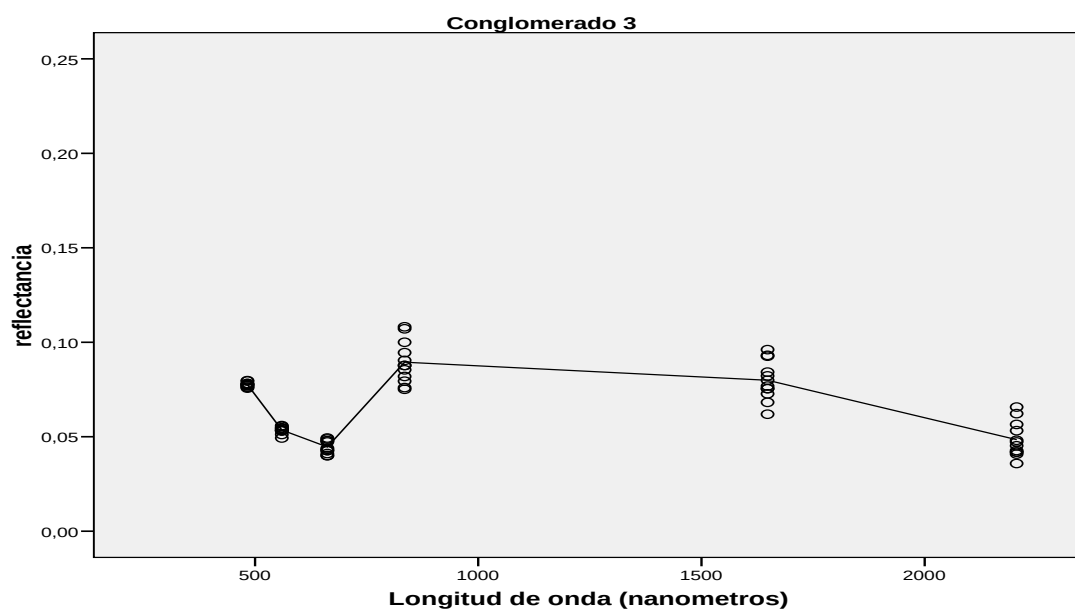


Figura 38. Conglomerados de firmas espectrales Conglomerado 3.

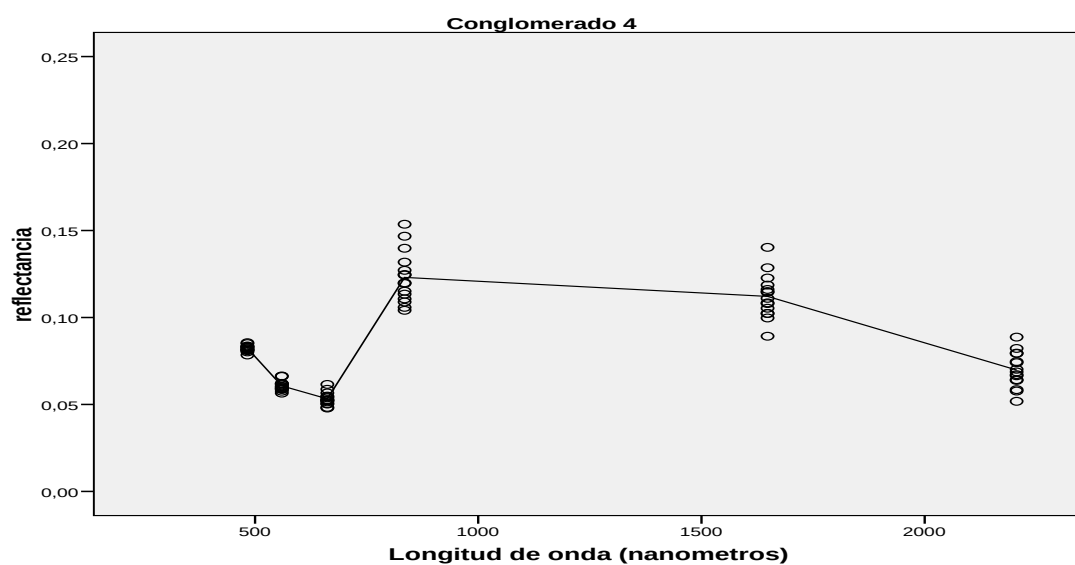
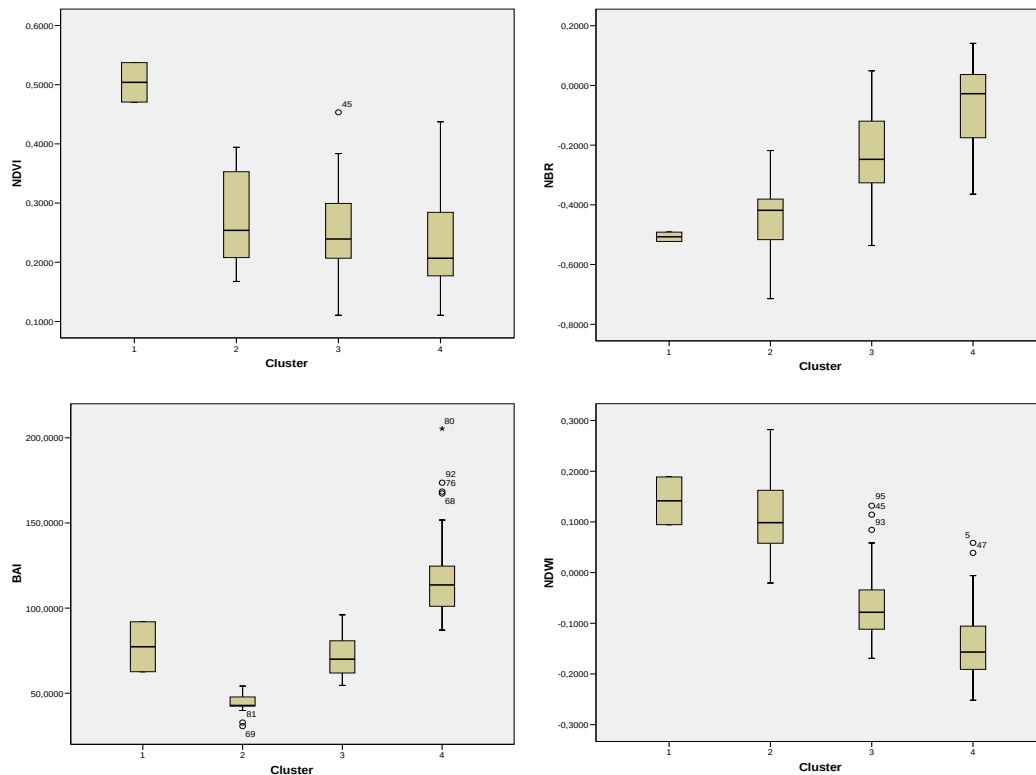


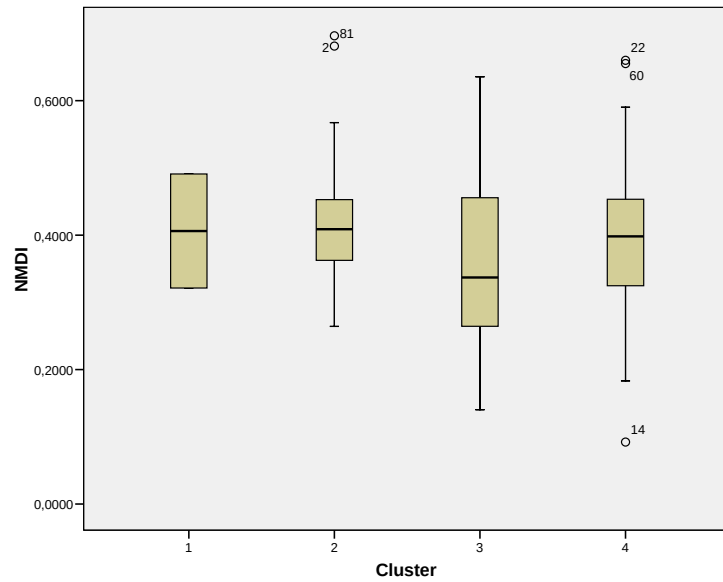
Figura 39. Conglomerados de firmas espectrales Conglomerado 4.

4.5.2.5. Análisis de Varianza de índices espectrales

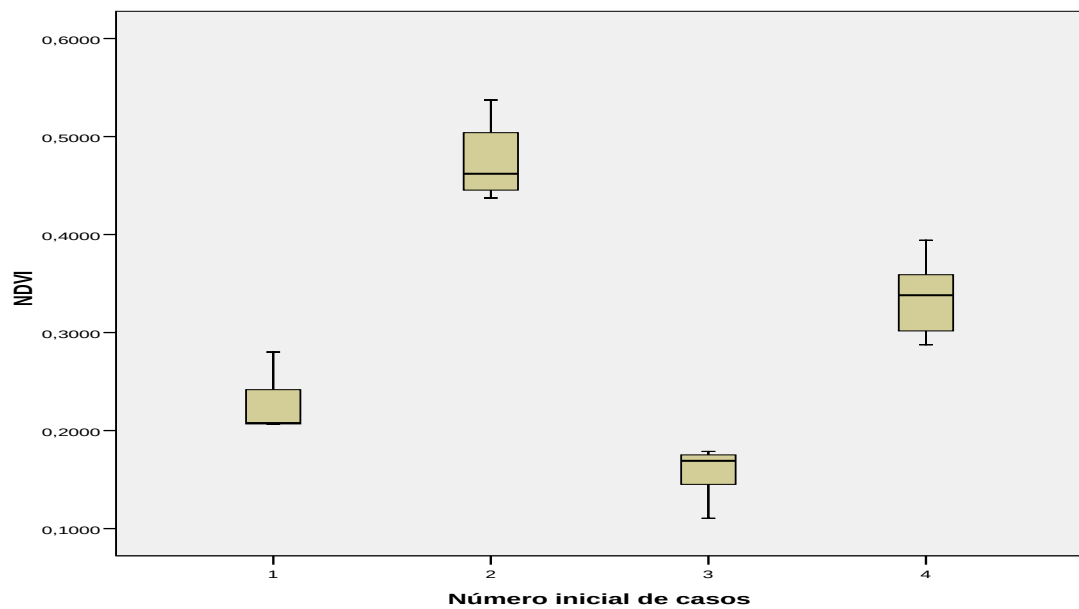
Mediante Análisis de Varianza de índices espectrales por conglomerados de firmas se identificaron diferencias significativas en los índices espectrales, a excepción del NMDI. Sin embargo, las comparaciones de promedios post-hoc mediante la prueba de Tukey no fueron suficientemente claras, salvo para el índice BAI. Los gráficos de cajas incluyen la mediana, los percentiles 25 y 75 y la caja que contiene el 50% de los datos centrales. Los valores extremos aparecen simbolizados con un asterisco y los valores atípicos simbolizados con un círculo (que corresponde a valores distanciados $\pm 2,698$ unidades de desviación típica con respecto a la media). Los siguientes gráficos proporcionan información sobre la dispersión y el grado de asimetría de los índices espectrales:

Figuras 40. Diagrama de cajas de los índices espectrales calculados por conglomerados.

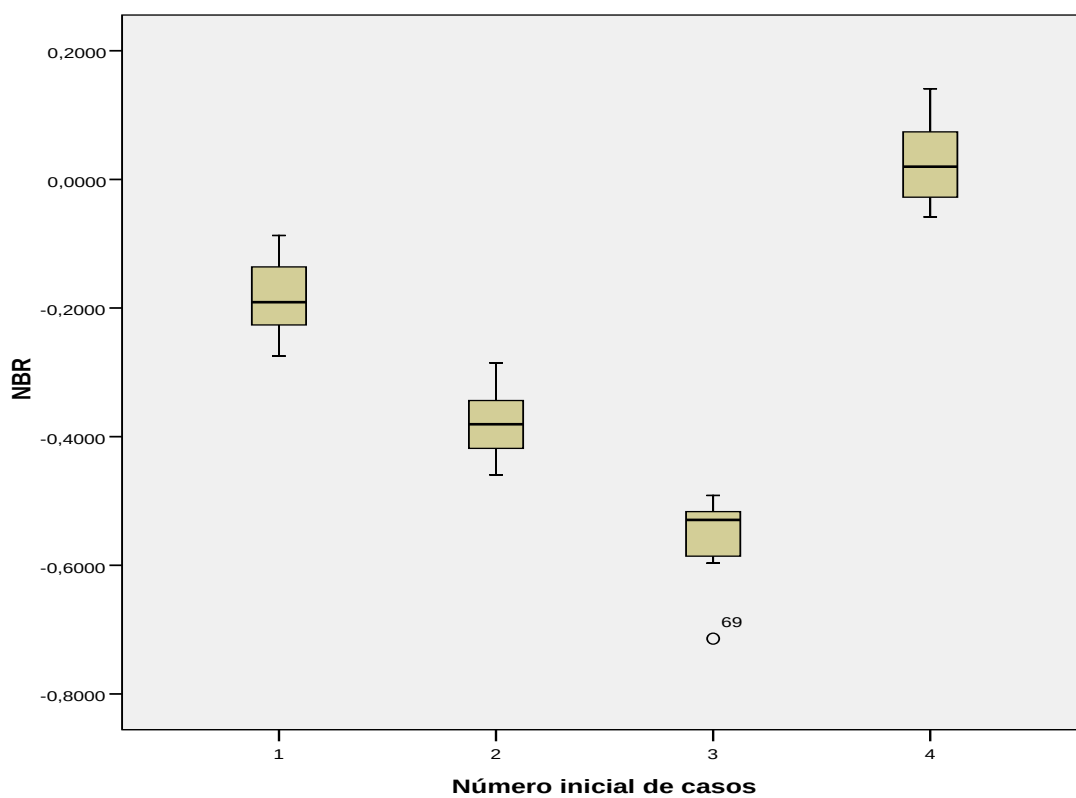




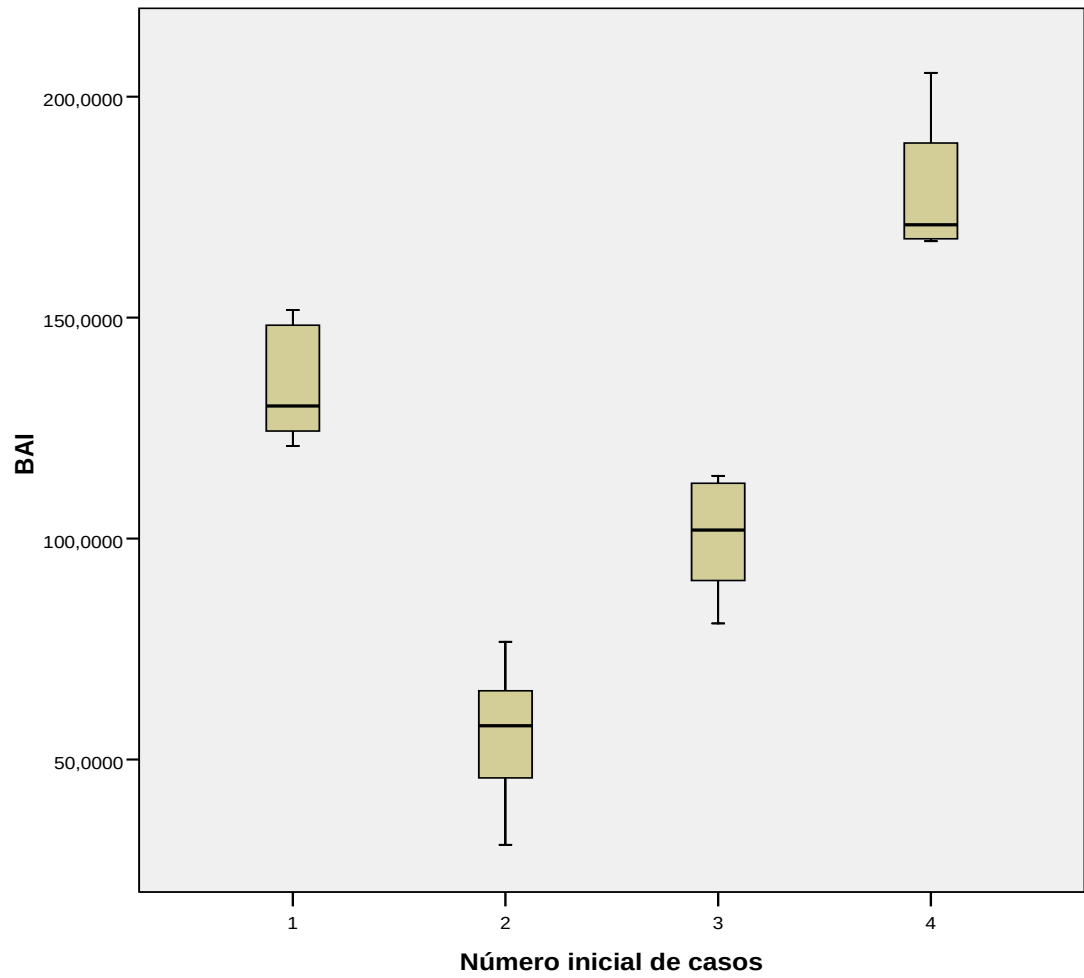
Posteriormente, se efectuó otro análisis de conglomerados de k-medias, pero a partir de cada índice espectral, para obtener una mejor discriminación de los resultados. Los Cuadros de estadísticas descriptivas y sus respectivos gráficos de cajas, se muestran en las siguientes páginas:



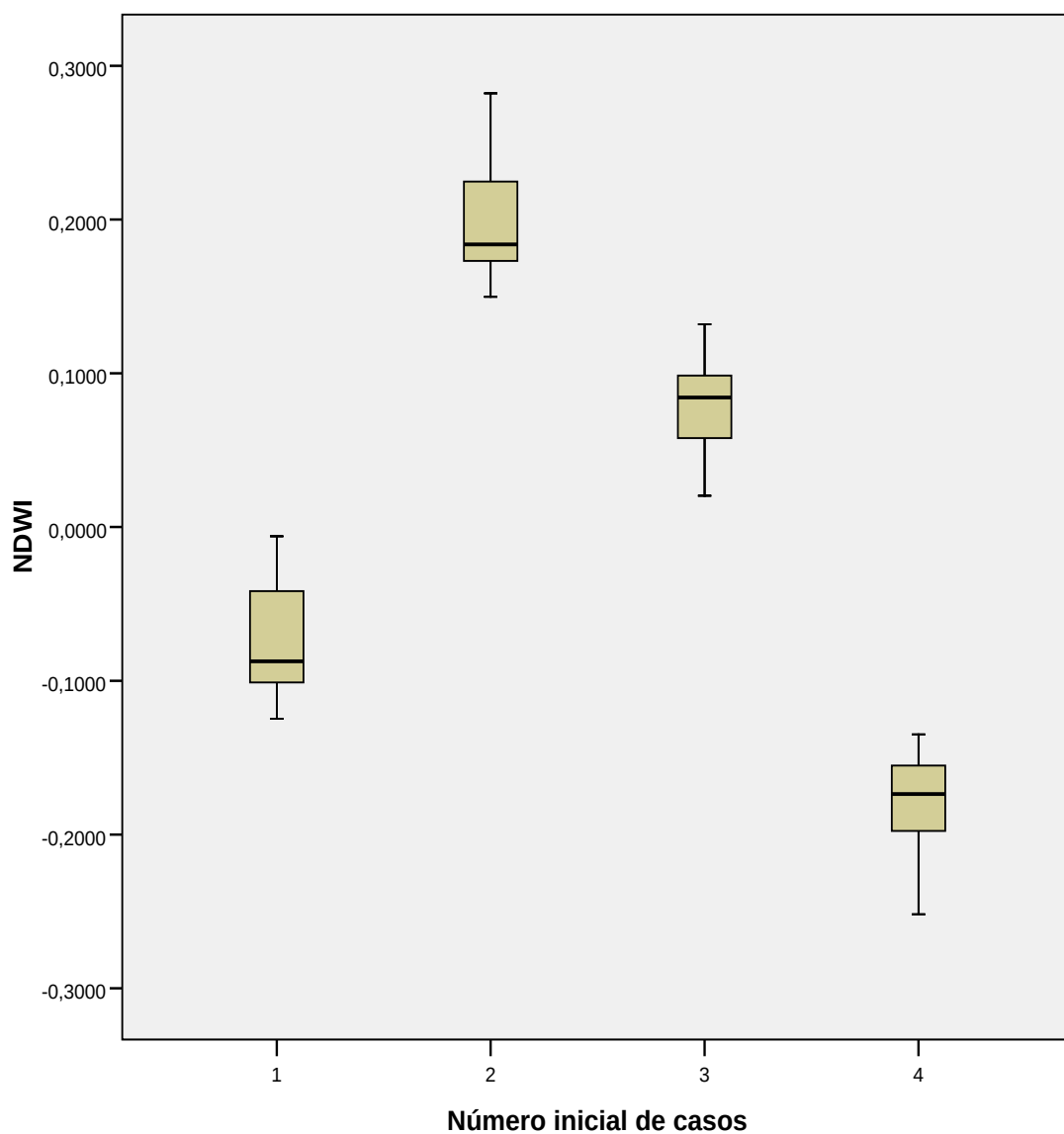
	Número inicial de casos			
	1	2	3	4
	NDVI	NDVI	NDVI	NDVI
Media	,2266	,4746	,1585	,3355
Mínimo	,2067	,4373	,1106	,2876
Máximo	,2801	,5372	,1788	,3942
Desviación típica	,0231	,0439	,0208	,0329
Percentil 05	,2068	,4373	,1106	,2887
Percentil 95	,2711	,5372	,1788	,3942



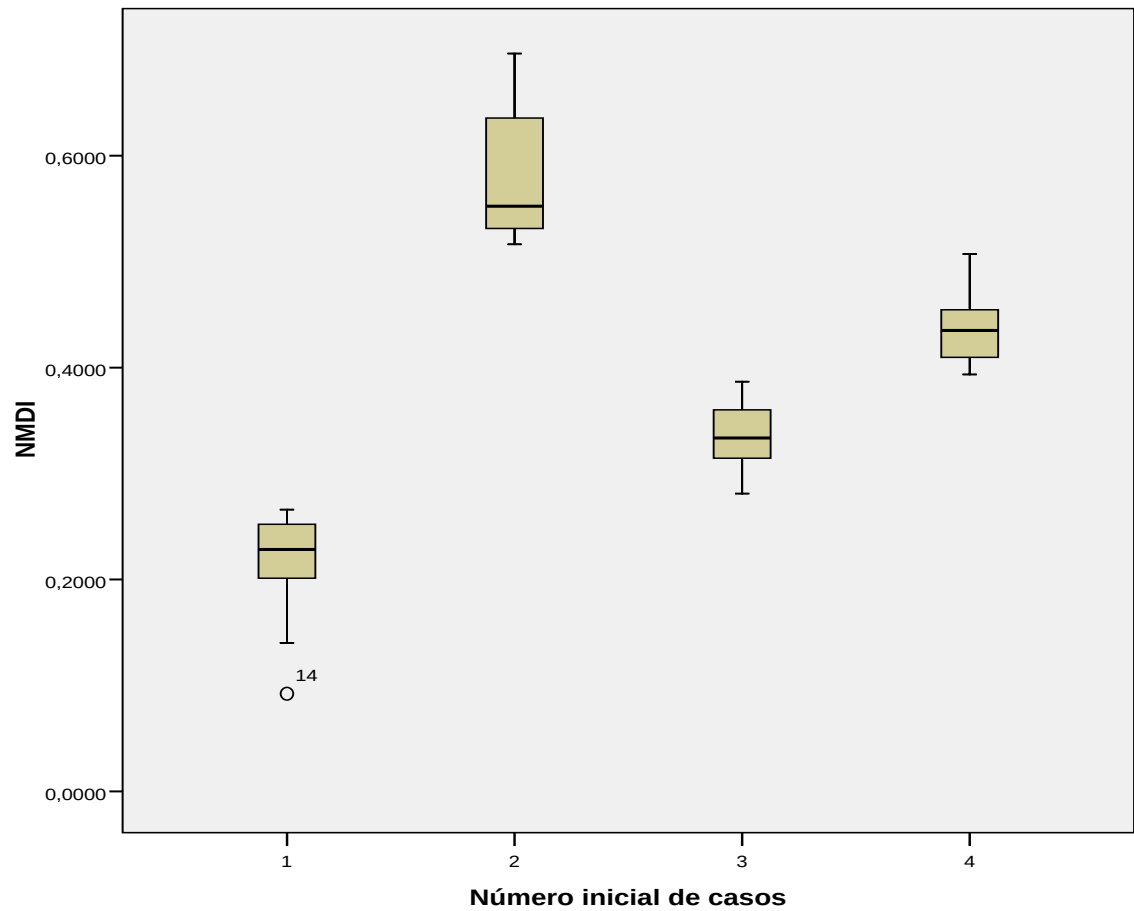
	Número inicial de casos			
	1	2	3	4
	NBR	NBR	NBR	NBR
Media	-,1853	-,3806	-,5586	,0212
Mínimo	-,2746	-,4595	-,7141	-,0584
Máximo	-,0873	-,2853	-,4914	,1410
Desviación típica	,0587	,0568	,0715	,0603
Percentil 05	-,2734	-,4582	-,7141	-,0566
Percentil 95	-,0873	-,2865	-,4914	,1232



	Número inicial de casos			
	1	2	3	4
	BAI	BAI	BAI	BAI
Media	134,4356	55,8405	100,0509	178,6775
Mínimo	120,9600	30,6900	80,8000	167,2900
Máximo	151,7100	76,6400	114,2000	205,4000
Desviación típica	12,1504	12,6584	10,7245	18,0275
Percentil 05	120,9600	32,7900	82,2200	167,2900
Percentil 95	151,7100	75,9100	114,2000	205,4000



	Número inicial de casos			
	1	2	3	4
	NDWI	NDWI	NDWI	NDWI
Media	-,0737	,2016	,0781	-,1781
Mínimo	-,1247	,1497	,0204	-,2519
Máximo	-,0060	,2821	,1320	-,1349
Desviación típica	,0354	,0500	,0342	,0294
Percentil 05	-,1247	,1497	,0204	-,2346
Percentil 95	-,0096	,2821	,1320	-,1365



	Número inicial de casos			
	1	2	3	4
	NMDI	NMDI	NMDI	NMDI
Media	,2167	,5777	,3370	,4373
Mínimo	,0922	,5163	,2811	,3935
Máximo	,2660	,6965	,3867	,5072
Desviación típica	,0463	,0601	,0315	,0301
Percentil 05	,0922	,5163	,2834	,3947
Percentil 95	,2660	,6965	,3866	,4909

Mediante estos resultados, se elaboró un árbol de decisiones en ENVI basado en las categorías estándares de clasificación de NDVI (denso, abundante y escaso), agregando los intervalos obtenidos en los conglomerados del índice BAI, ya que en el proceso preliminar éste

fue el índice que presentó diferencias estadísticas en las comparaciones de medias de conglomerados basados en firmas espectrales. El árbol de decisión se muestra en la Figura 41.

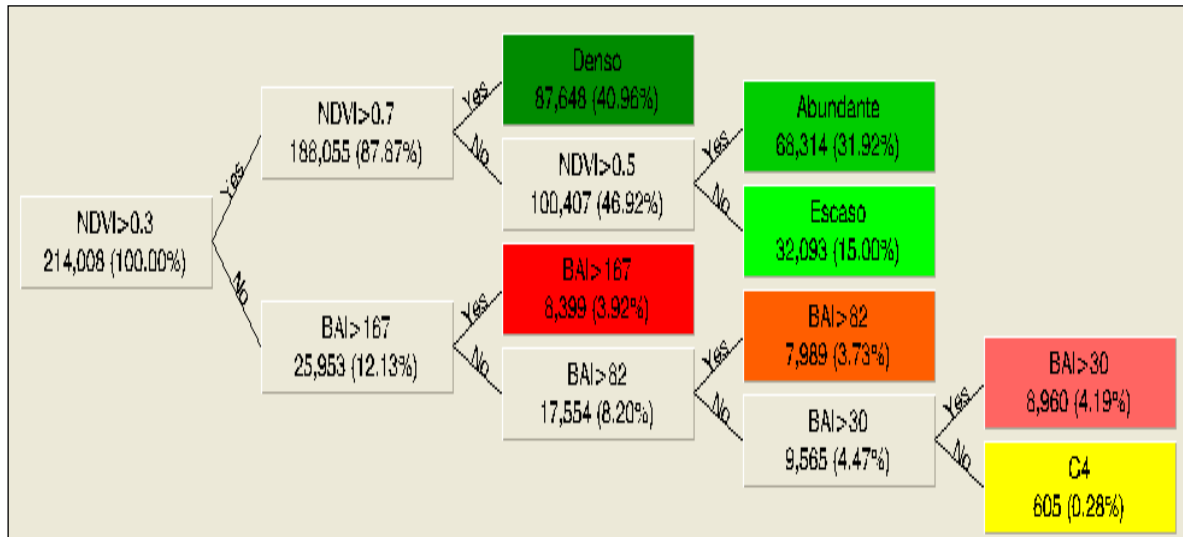
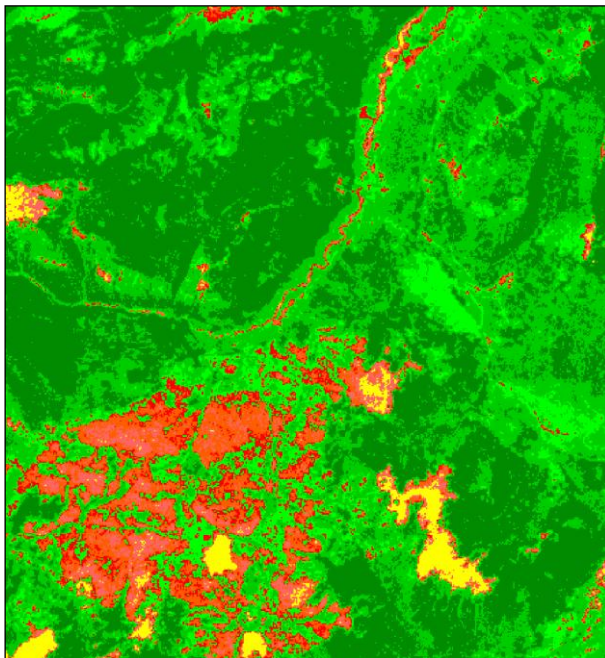


Figura 41. Árbol de decisiones 1 elaborado con rangos NDVI y BAI



Rangos NDVI y BAI	Color
0.75-1.00	Denso
0.50-0.75	Abundante
0.30-0.50	Escaso
0.167-0.30	Alto
0.082-0.167	Medio
0.030-0.082	Bajo
<0.030	No quemado

Adicionalmente, y a modo de comparación final, se elaboró un árbol de decisiones basadas exclusivamente en el NDVI con categorías estándares, más las categorías obtenidas mediante análisis de conglomerados de k-medias que permitieron obtener los límites 0.28, 0.20 y 0.11 para los sectores de áreas quemadas. El árbol de decisión se muestra en la Figura 42.

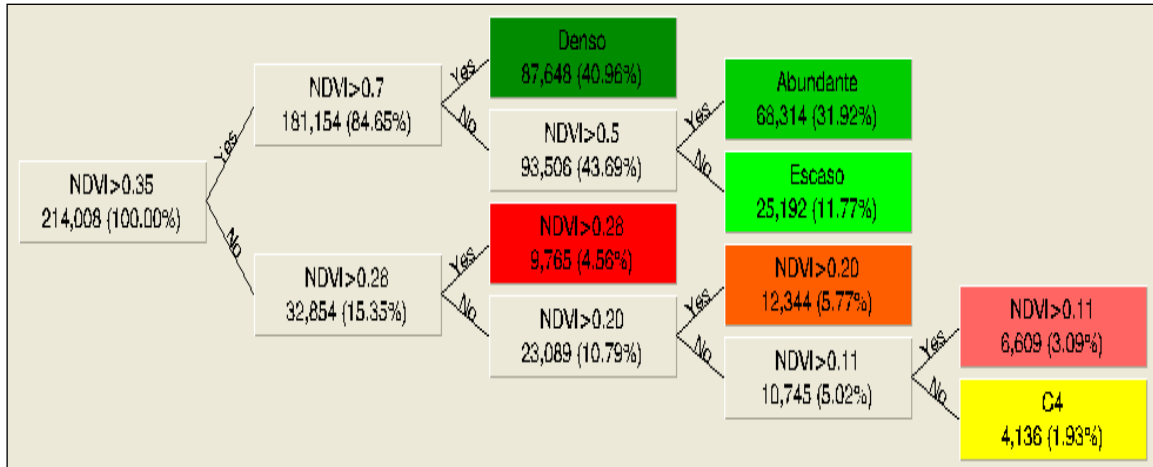
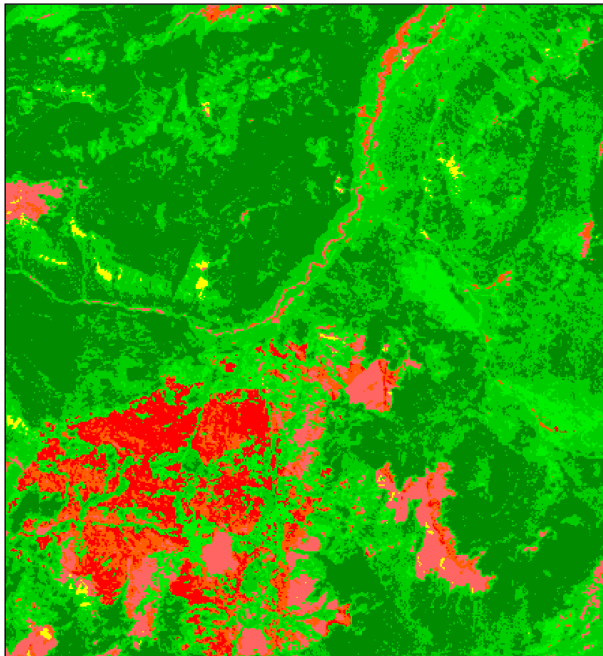


Figura 42. Árbol de decisiones 2 elaborado con rangos NDVI.



Rangos NDVI	Color
0.75-1.00	Denso
0.50-0.75	Abundante
0.35-0.50	Escaso
0.28-0.35	Alto
0.20-0.28	Medio
0.11-0.20	Bajo
<0.11	No quemado

4.6. Rodalización del Fundo La Fusta.

Mediante la rodalización del predio La Fusta, se encontró una gran superficie afectada por el incendio llegando está a 2.307,34 ha. De la totalidad de la zona afectada 443,54 ha, eran de bosques de Araucaria, 1.824,79 ha correspondían a bosques de Araucaria-Lenga y tan solo 39,00ha correspondían a matorrales de Ñirre.



Figura 43. Imagen de bosques de Araucaria-Lenga con severidad de daño Baja.



Figura 45. Imagen de bosques de Araucaria-Lenga con severidad de daño Medio.



Figura 45. Imagen de bosques de Araucaria-Lenga con severidad de daño Alto.

Rodalizacion del Predio la Fusta

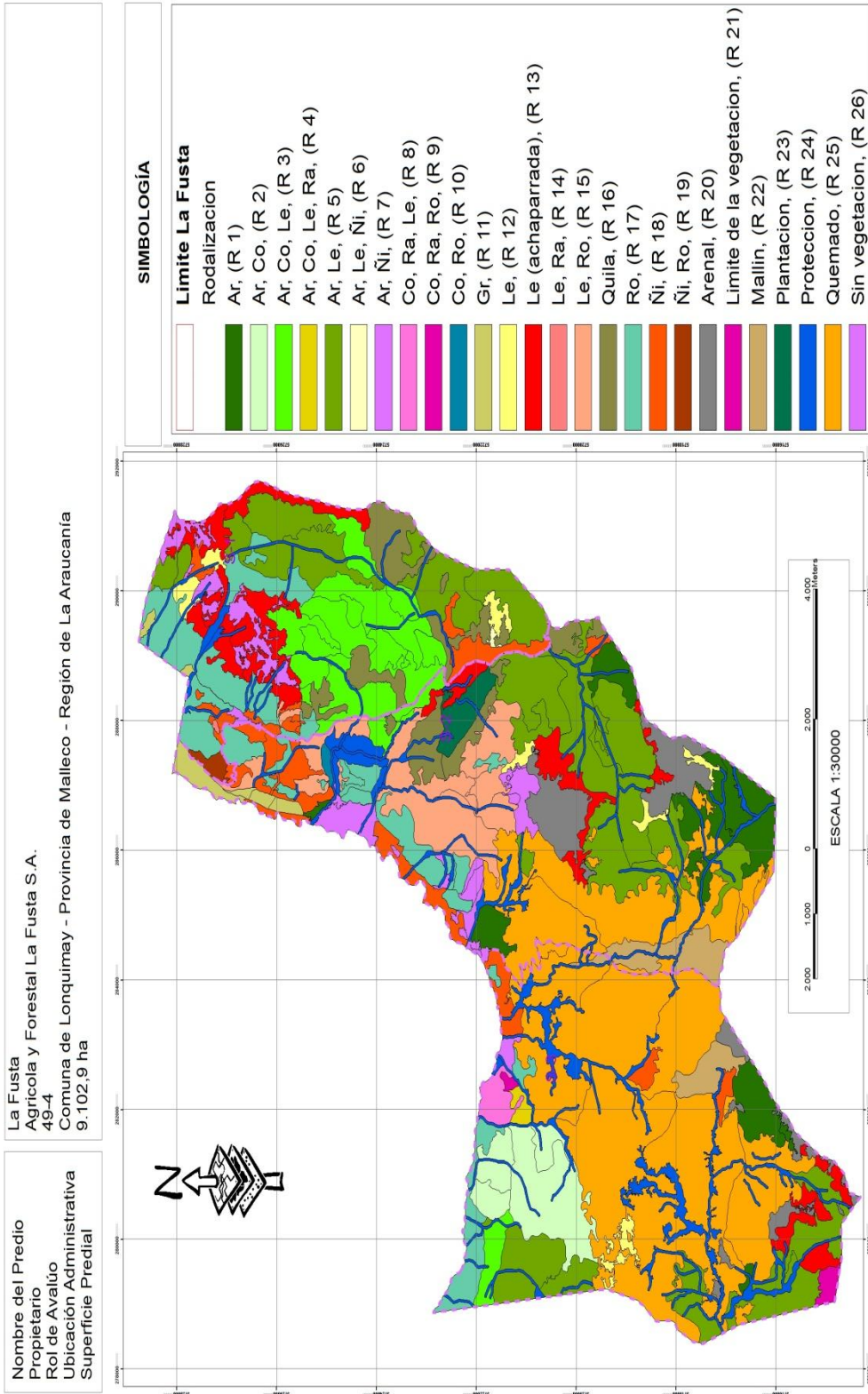


Figura 43. Rodalizacion del predio la Fusta.

5. CONCLUSIONES.

Según la cartografía realizada, la zona que fue afectada por el incendio estaba compuesta por bosques de Araucaria (443,54 ha) y Araucaria – Lenga (1.824,79 ha); en esta área también se pudieron identificar zonas aisladas de Ñirre (39,00 ha).

Se pudo identificar y clasificar las áreas quemadas, mediante el índice NBR y dNBR hasta dos años después del incendio.

La clasificación que entrega el dNBR de los años 2001-2003 indica que la superficie quemada con pérdida de vegetación es de 2431,15 ha y la clasificación obtenida mediante la cartografía es de 2307,37 ha. Finalmente, la superficie obtenida de la imagen posee un 95% de efectividad en relación con la obtenida mediante cartografía. La diferencia del 5%, se debe a que la cartografía se realizó 8 años después de ocurrido el incendio en donde algunas zonas con una intensidad de daño bajo, ya se habían recuperado.

Los resultados obtenidos para el NDVI abundante permitieron corroborar lo observado en el predio durante el control cartográfico, respecto a que en el año 2003, el 59% de la superficie afectada por el incendio estaba cubierta con formaciones vegetales abundantes. El año 2007, el 73% correspondía a NDVI abundante, y el 2010, el 69% de la superficie.

Las áreas con NDVI denso disminuyeron de un 80% en el año 2001, antes del incendio, hasta un 10% en el 2003, un 3% el año 2007, mostrando una leve recuperación en el año 2010, en un 10% de la superficie, que principalmente corresponde a vegetación densa que se ha recuperado paulatinamente.

Las áreas con formaciones vegetales con NDVI denso, afectadas por el incendio fueron reemplazadas por formaciones vegetales abundantes, permitiendo comprobar que se han recuperado significativamente más rápido que otros sectores afectados por el incendio.

Otros índices espectrales evaluados en este estudio, como el NDWI y NMDI por sí solos no resultaron apropiados para clasificar las áreas quemadas con los parámetros descritos en la literatura. Sin embargo, mediante criterios de clasificación combinados con NDVI.

6. RESUMEN.

En Chile, según registros de la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2009), la ocurrencia y daño histórico de incendios forestales entre los años 1964 y 2009, alcanza un total de 188.072 incendios forestales, los cuales afectaron una superficie de 2.073.453 de hectáreas a nivel nacional. Específicamente en la comuna de Lonquimay, donde se establece este estudio, entre los años 2001 y 2002 se detectaron cinco incendios forestales los que afectaron una superficie de 5.230,24 hectáreas de vegetación nativa.

Estos incendios ocasionan importantes pérdidas, tanto de la biodiversidad presente en la zona afectada, como también de vidas humanas en los trabajos de extinción.

En el presente estudio se evaluó el incendio que afectó al Parque Nacional Conguillio en el año 2002, el que afectó grandes superficies de bosques de *Araucaria araucana* (Mol.) Koch y *Araucaria araucana-Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser, además de otros predios colindantes con el parque, como La Fusta, en el que se centra este estudio. Este predio abarca una superficie de 9.108,4 ha, de las cuales 2.307,3 ha (25,3%) fueron afectadas por este siniestro.

Para este estudio se utilizaron imágenes ASTER, ALI e HYPERION, a las cuales se les aplicaron las correcciones geométrica, radiométrica y atmosférica. Luego, tomando las imágenes satelitales ALI e HYPERION, se delimitó la intersección geométrica de las imágenes y se corrigió la imagen ALI en base a la reflectancia con corrección atmosférica de HYPERION.

Para determinar los cambios ocurridos en la vegetación de la zona quemada, se caracterizó el sitio mediante imágenes satelitales Landsat ETM+ y ASTER, desde las que se obtuvieron las firmas espectrales y los índices de NDVI y NBR antes del incendio y diez años después de este.

Para complementar esta información, en el periodo 2010 se realizó una fotointerpretación del área de estudio, a partir de la que se elaboró un plano de uso actual, además de inventarios de estado de desarrollo con identificación de especies principales y parámetros generales de rodal.

7. SUMMARY.

In Chile, according to the registers of the National Forestry Corporation (CONAF, 2009), the occurrence and historical damage of wildfires between 1964 and 2009, it reached a total of 188,072 fires, which affected an area of 2,073,453 hectares at national level. Particularly in the city council of Lonquimay, which established this research between 2001 and 2002 were detected five forest fires that affected an area of 5230.24 hectares of native vegetation.

These fires cause meaningful losses of the present biodiversity in the affected area, as well as of the human lives in the work of extinction.

This research evaluates the fire that damaged the Conguillio National Park in 2002, which affected large areas of forest of *Araucaria araucana* (Mol.) Koch and *Araucaria araucana*-*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser. Also, it affected other properties adjacent to the park, such as La Fusta, which this research focuses. This land covers an area of 9108.4 ha, of which 2307.3 ha (25.3%) were affected by this incident.

For this research were used ASTER, ALI and Hyperion images, which geometric corrections, radiometric and atmospheric were applied. Then, taking the ALI and Hyperion satellite imagery, the area was delimited in which the images are superimposed and corrected ALI image based on the correction parameters of HYPERION.

To determine the changes occurred in the vegetation of the burned area was marked the site with satellite images Landsat ETM + and ASTER, from which they obtained the spectral signatures and the rating of NDVI and NBR before the fire, and ten years after this.

To complement this information, in the period 2010, a photo-interpretation of the study area was made, from which was elaborated a plane of current use, as well as inventories of state of development with identification of the main species and general parameters of the stand.

8. LITERATURA CITADA.

- Abrams, M. and Hook, S. 2001.** Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. ASTER Users Handbook. Segunda Edición. Jet Propulsion Laboratory (JPL)/California Institute of Technology. California, USA. 135 p.
- Avery, E. and Graydon B. 1992.** Fundamentals of Remote Sensing and airphoto interpretation. Macmillan Publishing Company. 5ª edición. 472 p.
- Ayesa, J y Lopez, C. 1998.** Laboratorio de Teledetección- SIG. Área de Investigación en Recursos Naturales. III curso “Teledetección Aplicada a la Evaluación de Recursos Naturales”. San Carlos Bariloche, 8 al 12 de Junio de 1998.
- CONAF/CONAMA/BRIF. 1999.** Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile. Informenacional con variables ambientales. Santiago, Chile. 89 p.
- Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L. (2009).** Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. Remote Sensing of Environment 113 (2009) 893–903.
- Chuvieco E. 1990.** Fundamentos de Teledetección Espacial. Colección Monografías y Tratados GER. Serie Geográfica y Ecología, Madrid, España, 449 pp.
- Chuvieco, E. 1996a.** Fundamentos de teledetección espacial. Tercera edición. Ediciones Rialp S.A Madrid, España. 452 p.
- Chuvieco, E. 1996b.** Empleo de imágenes de satélite para medir la estructura del paisaje: análisis cuantitativo y representación cartográfica. Serie Geográfica 6:131-147 p.
- Chuvieco, E. 1998.** El factor temporal, en la teledetección: evolución fenomenología y análisis de cambios. Revista de teledetección (España). 1 (10): 39-48 p.
- Chuvieco, E. 2002.** Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Editorial Ariel. Madrid, España. 586pp.
- Dengsheng, L., Mausel, P., Brondízio, E. y Moran, E. 2004.** Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. Forest Ecology and Management 198:149–167 p.

- Fernández, A. 2001.** Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ Satélite Landsat. Universidad de Valladolid. Área de ingeniería cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Valladolid, España. 37 p.
- González-Alonso, F; Huesca, M; Cuevas Gonzalo, J; Martínez, S; Gómez, J.A y De Miguel, E. (2009).** Utilización de imágenes hiperespectrales AHS-INTA para el estudio de zonas afectadas por incendios forestales. Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII congreso de la Asociación Española de Teledetección. Calatayud, 23-26 de septiembre de 2009, España. 305-308 p.
- Kaufmann, Y. J., A. E. Wald, L. A. Remer, B.-C. Gao, R.-R. Li, and L. Flynn, 1997.** The MODIS 2.1-mm Channel-Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 35, pp. 1286-1298.
- Key, C.H. & Benson, N.C. (2005).** Landscape assessment: remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In: D.C. Lutes et al. (Editors), FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System, Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report, RMRS-GTR-164-CD:LA1-LA51.
- Morales, L., y Parra, J. C. 1996.** Determinación del Índice de Vegetación a partir de parámetros físicos usando datos NOAA/AVHRR. VI Simposio Nacional de Física Experimental y Aplicada. Universidad de la Frontera, Temuco-Chile.
- Overgaard, SI; Isaksson, T; Kvaal, K; Korsæth, A.** Comparisons of two hand-held, multispectral field radiometers and a hyperspectral airborne imager in terms of predicting spring wheat grain yield and quality by means of powered partial least squares regression. JOURNAL OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY Volume: 18 Issue: 4 Pages: 247-261 DOI: 10.1255/jnirs.892.
- Pérez, C. y Sánchez, N. 2006.** Experiencias con imágenes ASTER en el control métrico y análisis multitemporal. Paperas of XII simposio internacional en percepción remota y sistema de información Geográfica. Cartagena de Indias, Colombia, 10 p.
- Segura, R y Trincado, G. (2003).** Bosque. Cartografía digital de la reserva nacional Valdivia a partir de imágenes satelitales Landsat TM. 24 (2): 43-52 p.
- Sobrino, J (2000).** Teledetección. Primera edición. Universitaria de Valencia. Valencia España. 257 p.
- Sriwongsitanon, N; Surakit, K; Thianpopirug, S.** Influence of atmospheric correction and number of sampling points on the accuracy of water clarity assessment using remote sensing application Source: JOURNAL OF HYDROLOGY Volume: 401 Issue: 3-4 Pages: 203-220 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.023

- Quintanilla, V y Castro, R. (1998).** Seguimiento de las cubiertas vegetales post-incendios forestales en la zona mediterránea costera de Chile. Serie Geográfica 7: 147-154 p.
- Wagner, A. (2004).** El uso de las imágenes ASTER para los estudios Territoriales Nor-orientales del estado del Rio Grande del Sur. Universidad Federal de Rio Grande del Sur. Centro Estatal de Investigación en Sensores Remotos y Meteorología. Curso de pos-graduación en sensores remotos, Porto Alegre, Brasil.