



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA
SISTEMA DE UNIVERSIDAD ABIERTA Y EDUCACIÓN A DISTANCIA

SUA(y)ED
Filosofía / Letras

TELEDETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS ASOCIADAS
A INCENDIOS FORESTALES EN LA SIERRA NEVADA,
MÉXICO (1998-2017)

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA
JULIO CÉSAR GARCÍA SAMPAYO

ASESORA:

DRA. LILIA DE LOURDES MANZO DELGADO.

CIUDAD UNIVERSITARIA CDMX, FEBRERO, 2019





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mis padres: Eva y Pedro, los cuales confiaron en mí a pesar de los innumerables errores que he cometido.

“...Cuando no quede un árbol,
cuando ya todo sea asfalto y asfixia
o malpaís, terreno pedregoso sin vida,
esta será de nuevo la capital de la muerte.
En ese instante renacerán los volcanes.
Vendrá de lo alto el gran cortejo de Lava.
El aire inerte se cubrirá de ceniza.
El mar de fuego lavará la ignominia,
se hará llama la tierra y lumbre el polvo.
Entre la roca brotará una planta.
Cuando florezca volverá la vida
a lo que convertimos en desierto de muerte...”.

José Emilio Pacheco. La fábula del tiempo: antología poética.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera particular a la Dra. Lilia de Lourdes Manzo Delgado, la cual siempre estuvo al pendiente de mi trabajo, por sus consejos y paciencia, y sobre todo por la dedicación y atención que me brindó durante todo el transcurso de la realización de la tesis. ¡Muchas gracias!

Al Dr. José López García por incluirme en el proyecto “Evaluación de los cambios de cobertura forestal en Áreas Naturales Protegidas” y por proporcionarme el lugar y equipo para realizar mi trabajo.

A los miembros del jurado: Dr. José López García, MTRO. José Manuel Espinoza Rodríguez, MTRO. Enrique Muñoz López y Lic. Melissa Díaz Herrera, por las observaciones y consejos mencionados para mejorar el trabajo.

Gracias al apoyo económico del proyecto PAPIIT “Evaluación de los cambios de cobertura forestal en Áreas Naturales Protegidas”.

A los compañeros de la Facultad que me brindaron su amistad, pues con ella fue más agradable mi estancia en la universidad.

A Susana por el apoyo moral y los buenos consejos.

**TELEDETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS ASOCIADAS A INCENDIOS FORESTALES EN LA
SIERRA NEVADA, MÉXICO (1998-2017)**

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 MARCO DE REFERENCIA	3
Antecedentes	3
1.2 Problematización	4
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo general	8
1.4.2 Objetivos particulares	8
1.5 Marco teórico y conceptual	8
1.5.1 Factores que originan los incendios forestales.....	9
1.5.2 Definición de bosque y densidad de cobertura forestal	11
1.5.3 Bases físicas de la percepción remota	12
1.5.4 Índices espectrales para detectar áreas quemadas.....	24
CAPÍTULO 2. ÁREA EN ESTUDIO.....	26
2.1 Localización	26
2.2 Geología	27
2.3 Clima.....	28
2.4 Hidrografía.....	30
2.5 Suelos	31
2.6 Vegetación.....	33
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	38
3.1 Recopilación de registros oficiales de incendios forestales.....	38
3.2 Descarga y preprocesamiento de imágenes Landsat	38
3.3 Generación de índice de área quemada BAI	41
3.4 Validación de los polígonos de áreas quemadas.....	45
3.5 Cartografía de áreas quemadas	48

3.5 Análisis comparativo de áreas quemadas y cambio de densidad de cobertura forestal	51
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	54
4.1 Validación de polígonos de áreas quemadas	54
4.2 Frecuencia anual de áreas quemadas	61
4.3 Distribución espacial de áreas quemadas	62
4.4 Cambios en la densidad de cobertura forestal asociada a incendios forestales.....	70
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN	75
CAPITULO 6. CONCLUSIONES.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	81

INTRODUCCIÓN

En México, los incendios forestales ocasionan afectaciones importantes a la cubierta vegetal y diversos elementos del ambiente como el agua, el suelo, el aire y la fauna silvestre. Entre las consecuencias más serias se encuentra la deforestación, que deja el suelo expuesto a la erosión, a la vez que disminuye la capacidad de retención e infiltración del agua hacia el subsuelo y la recarga de mantos freáticos.

Además, los incendios forestales ocasionan serias consecuencias económicas que presentan gran dificultad para su valoración; por ejemplo en el periodo de 1983-1990 en el Distrito Federal se tuvo un costo de reforestación, renuevo y productos forestales que ascendieron casi a los 14,000 millones de pesos (Rodríguez Trejo, 1996). Debido a los costosos métodos que implican realizar cartografía de incendios forestales y a su relativa lentitud, la teledetección se muestra como una excelente alternativa para monitorear las superficies quemadas (González-Alonso *et al.*, 2007), así mismo la cartografía de dichas áreas afectadas son una fuente de información estratégica para mejorar las tareas de gestión en dichas superficies afectadas (De Santis y Vaughan, 2009).

La Sierra Nevada Río Frío, ubicada al oriente de la ciudad de México, es un área de gran importancia biogeográfica por su diversidad biológica, alto valor paisajístico y por los servicios ecosistémicos que proporciona, entre los que destaca la captación de recursos hídricos (López López, 2004). Una manera de conservar la diversidad biológica y paisajística es el establecimiento de Áreas Naturales Protegidas (ANP), destacando entre ellas el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas, ubicado en lo que se denomina Sierra Nevada Río Frío. Sin embargo, en los últimos años, los incendios forestales se han convertido en un fenómeno frecuente en la Sierra Nevada Río Frío e inclusive el ANP, motivo por el cual han sido considerados una amenaza para la disminución de la cubierta forestal y reducción de los servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas forestales (López López, 2004).

En este contexto, se considera conveniente establecer un monitoreo sistemático de los incendios forestales y las superficies afectadas por el fuego en la Sierra Nevada Río Frío que permita evaluar el papel que ha desempeñado el fuego en este lugar, pues se sabe que el fuego es un factor ecológico natural de gran importancia en algunos ecosistemas, pues este elemento es capaz de determinar la estructura y funcionalidad de los mismos, ya que el fuego es uno de los factores principales capaces de destruir comunidades vegetales, pero también es un elemento que propicia su renovación (Granados y López, 1998).

Una alternativa para ello es utilizar técnicas de percepción remota e imágenes de satélite para analizar su distribución y severidad, permitiendo así identificar los lugares en los cuales posiblemente los incendios han causado un cambio de densidad en la cobertura forestal de la Sierra Nevada Río Frío.

CAPÍTULO 1 MARCO DE REFERENCIA

Antecedentes

La variabilidad en la incidencia de incendios forestales en el país ha sido relacionada con diversas condiciones climáticas, teniéndose años con registros relativamente bajos y años con ocurrencia muy alta, tal es el caso del año 1998, en el cual se tuvieron más de 14,000 incendios los cuales afectaron casi un millón de ha (CONAFOR, 2013). Otros años con gran cantidad de incendios forestales han sido 2005, 2008 y 2011, pues tan solo en estos tres años la sumatoria total ascendió a más de 30,000 incendios (CONAFOR, 2012).

Tan solo en el año 2012 se afectaron más de 956,000 ha, donde algunos de los estados del centro de México estuvieron en los primeros lugares por el número de incendios registrados, el Estado de México tuvo el primer lugar (22,419), la Ciudad de México ocupó el tercer lugar (1,373) y Michoacán el cuarto lugar (1,211). En cuanto a la superficie afectada, la mayoría de los estados de la parte central del país no ocuparon los primeros lugares, pero, si tuvieron un número importante de ha afectadas, en el Estado de México se tuvieron en ese año 9,283 ha afectadas, para Michoacán se tuvieron, 11,840 ha, Puebla 10,900 ha, Ciudad de México 4,415 ha, Hidalgo 476 ha (CONAFOR, 2012). Esto no sólo se traduce en un gran daño para la cubierta vegetal y la biodiversidad que habita estos ecosistemas, sino también en la reducción de servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas forestales y que beneficia a la población mexicana, así como pérdidas económicas en las labores de reforestación.

Según el plan de manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas, una de las amenazas a la vegetación de este lugar son los incendios forestales, los cuales son provocados en su mayoría por las prácticas agropecuarias que llevan a cabo los pobladores de los alrededores, estas quemas no sólo se realizan cerca del Área Natural Protegida sino en gran parte de la Sierra Nevada Río Frío, debido a este motivo se decidió analizar toda esta área y no solo el Área Natural Protegida. Una de estas prácticas es la quema de pastos que realizan los ganaderos para propiciar que surja el renuevo o el pelillo como es conocido, con el cual se alimenta el ganado. Los incendios forestales han

sido uno de los factores que han afectado a la vegetación de la Sierra Nevada Río Frío, en la cual se ha presentado una disminución de su cobertura forestal, esta pérdida tiene serias consecuencias, puesto que afecta la retención y filtración de agua hacia mantos freáticos, además que afecta la biodiversidad existente en el lugar. Esto se puede convertir en un problema grave puesto que este sitio es considerado como importante en cuanto a la generación de bienes y servicios ambientales que benefician a la población del centro de México (López López, 2004).

Los estudios llevados a cabo en la detección de superficies afectadas por incendios son numerosos, entre estos se pueden encontrar trabajos que utilizan índices espectrales y técnicas de discriminación (unitemporales y multitemporales) (De Santis y Vaughan, 2009). En este sentido, se puede mencionar que diversos estudios han demostrado la buena aplicabilidad de la teledetección en la identificación de superficies quemadas (Opazo y Rodríguez-Verdú, 2007; Martin y Chuvieco, 1998; Bastarrika y Chuvieco, 2006), solo por mencionar algunos trabajos. En el contexto nacional se pueden mencionar los trabajos de Manzo Delgado y López García (2006), en donde utilizaron datos del sensor MODIS para detectar las superficies quemadas en el sur de México. También se pueden mencionar el trabajo de Jiménez Escudero (2017), en el cual utiliza datos de los satélites Landsat para la detección de áreas quemadas en el norte del país y de Cruz López (2018) en el cual usa datos satelitales para estimar las emisiones de quema por biomasa.

1.2 Problematización

Si bien los ecosistemas forestales son perjudicados por un gran número de factores, existen algunos que los afectan de una manera severa debido a que destruyen grandes áreas de estos paisajes en un tiempo muy corto; algunos de ellos son la tala clandestina de bosques, el cambio de uso del suelo y los incendios forestales (Rodríguez Trejo, 2014). Es importante mencionar que no todos los incendios son peligrosos pues para algunos tipos de vegetación representan ciertos beneficios, mientras que para otro tipo de vegetación puede resultar catastrófica su presencia, además debe mencionarse que la velocidad y la intensidad con la que se desarrolle un incendio forestal, está determinado por diversas

condiciones que se presentan en los bosques y que éstas a su vez varían, en la extensión de los distintos ecosistemas forestales. En este sentido, los incendios forestales son un elemento significativo dentro del funcionamiento de estos ecosistemas; éste es considerado como un agente de cambio puesto que el fuego tiene una gran diversidad de funciones y efectos para los distintos tipos de vegetación (Flores Garnica y Rodríguez Trejo, 2006).

Al ser el fuego un elemento natural en los bosques, tiene una importancia intrínseca, puesto que este permite el reciclaje de nutrientes al dejar una capa de cenizas después del incendio, en algunas especies propicia la germinación de semillas, reduce la cantidad de combustibles forestales que podrían propiciar la aparición de incendios de mayores dimensiones, entre otros; debido a esto, las comunidades vegetales han creado una serie de adaptaciones para poder reponerse de los efectos del fuego respondiendo a un régimen de incendios que ayuda a definir los impactos del fuego en los paisajes forestales teniendo dos conceptos fundamentales: la frecuencia del incendio y su intensidad; por lo tanto, las alteraciones en este régimen de incendios son las que causan las distintas perturbaciones en los diferentes ecosistemas forestales (Flores Garnica, 2009).

Puesto que en México se estima que las causas que generan los incendios forestales son en su mayoría de origen antrópico (99%) y de este porcentaje la mayoría es provocado por actividades agropecuarias en las cuales se pueden mencionar actividades como: quema de pastizales (CENAPRED, 2007), se puede inferir que este régimen de incendios naturales tiene una gran alteración, pues tan sólo se considera que el origen de los incendios forestales por causas naturales es de 1%.

Es también importante mencionar que el impacto de los incendios es diferente en los diversos ecosistemas forestales puesto que se pueden tener distintos efectos tanto como negativos y positivos en bosques templados, selvas y vegetación de zonas áridas. Según Rodríguez Trejo 1996., el tipo de vegetación que más se ven afectados por el fuego, son los bosques caducifolios y selvas, puesto que en este bosque el fuego provoca que se desarrollen plagas que dañan a este tipo de vegetación y además propicia que estos tipos

de bosques se transformen en matorrales secundarios disminuyendo así su servicio ambiental.

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), es la institución encargada de desarrollar, favorecer e impulsar las actividades productivas de conservación y restauración forestal; además, participa en la formulación de planes, programas y en la aplicación de políticas de desarrollo forestal sustentable (CONAFOR, 2015). Esta institución tiene una gran cantidad de datos referentes a incendios forestales, tales como estadísticas de número de incendios al año, número de ha afectadas, así como planes de control y prevención de los incendios forestales.

De manera complementaria, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) tiene a su cargo el programa de alerta temprana para localizar los incendios con datos satelitales, con resolución espacial de 1000 m, desde el año 1998 (Ressl *et al.*, 2009). La Conabio envía la ubicación de los incendios a la CONAFOR (Ressel y Cruz, 2012) como una contribución importante para la toma de decisiones sobre el control y eliminación de incendios.

Los esfuerzos que realizan la CONAFOR y la Conabio en materia de incendios han sido de gran relevancia; sin embargo, en la actualidad se cuenta con muy poca información sobre la representación espacial y temporal de áreas quemadas, por lo que se creyó necesario realizar una cartografía de áreas quemadas de mayor detalle del área en estudio, utilizando imágenes Landsat.

1.3 Justificación

Al ser los incendios forestales un fenómeno con una expresión territorial, puesto que las causas que los provocan y sus efectos tienen una manifestación espacial, son un tema de estudio que compete a la geografía pues es una disciplina que se enfoca en el análisis de variables con dimensiones territoriales. Además, algunas de las aportaciones de la misma pueden estar enmarcadas en el análisis del riesgo de incendios y de las consecuencias que estos provocan (Chuvieco *et al.*, 1998).

La salud de los ecosistemas forestales representa una enorme cantidad de bienes y servicios para el ser humano, los cuales son fundamentales para su desarrollo; entre estos servicios se pueden mencionar la captura de bióxido de carbono, la protección del suelo ante los agentes erosivos, la captación de agua y su posterior filtración a los mantos freáticos, la estabilidad climática, esparcimiento y recreación humana, mantenimiento de la biodiversidad, entre otros (CONANP, 2011). Estos bienes y servicios que los ecosistemas forestales proporcionan se han considerado a lo largo del tiempo como un recurso natural renovable; sin embargo, cuando los daños que se provocan en ellos son muy serios, la recuperación de estos puede resultar sumamente difícil y, en ocasiones, hasta imposible (Rodríguez Trejo, 2014).

En el caso de la Sierra Nevada Río Frío, al ser un lugar que genera una gran cantidad de bienes y servicios ambientales, uno de gran importancia es la retención y la captación de agua para recargar los mantos freáticos que abastecen el valle de México, además de otros valles colindantes del estado de Puebla, Morelos y Tlaxcala; cuya capacidad de retención y filtración depende en una gran medida de la cubierta vegetal y del suelo (López López, 2004); por lo tanto, al ser los incendios forestales un factor que puede contribuir a la degradación de ambos elementos, una de las consecuencias es la disminución de la capacidad de retención de agua.

Debido a ello, se considera necesario hacer estudios que permitan identificar las áreas de vegetación que han sido más afectadas por incendios para proponer acciones que permitan mejorar sus condiciones en estas zonas. En este contexto, sería de gran utilidad contar con la representación cartográfica de las áreas quemadas derivadas de los incendios forestales, pues esta información ayudaría a ubicar las áreas de mayor afectación, permitiendo así realizar evaluaciones rápidas de los efectos que el fuego ha ocasionado en la cubierta vegetal del área en estudio a lo largo del tiempo, además de proporcionar información para diversos usuarios interesados en la identificación de zonas vulnerables a incendios forestales, así como la zonificación y delimitación de áreas sensibles al fuego. Asimismo, la representación espacial de las áreas quemadas es de gran utilidad para analizar otros aspectos, como la dispersión del fuego en diferentes

condiciones topográficas, contribuyendo con esto a mejorar los planes de acción en el control de incendios forestales.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar un análisis espacial y temporal de las áreas quemadas asociadas a incendios forestales en la Sierra Nevada Río Frío, para el periodo 1998-2017.

1.4.2 Objetivos particulares

1. Detectar las áreas quemadas asociadas a incendios forestales utilizando el índice BAI con imágenes Landsat, en un periodo de 19 años (1998-2017).
2. Elaborar la cartografía, caracterizar y cuantificar las áreas quemadas para el periodo mencionado.
3. Evaluar el efecto de los incendios forestales en la densidad de cobertura forestal.

1.5 Marco teórico y conceptual

Debido a las problemáticas medioambientales que han surgido en el mundo en las últimas décadas, estos temas han adquirido una importancia central en los debates teóricos del uso que se le está dando a los recursos que nos proporcionan grandes servicios ambientales; hoy en día, debido a las exigencias socioeconómicas de la población, se obligan a las diferentes disciplinas relacionadas con el tema medioambiental a buscar un desarrollo sostenible y equilibrado, que permita perdurar el bienestar humano y la conservación de la naturaleza. Al ser la geografía una disciplina que se dedica al estudio de las relaciones entre la sociedad y el sistema natural en una dimensión espacio-temporal, en las temáticas relacionadas con problemas medioambientales se inserta y contribuye realizando el estudio de las estructuras espaciales del paisaje, así como la evaluación del potencial para el aprovechamiento económico, además de realizar las propuestas que

permitan respetar las condiciones naturales y el desarrollo de la población (Arcía Rodríguez, 1994).

Para realizar este estudio, en donde se busca primordialmente detectar y estimar las superficies quemadas y posteriormente analizar si en dichas áreas quemadas se ha presentado una pérdida de densidad de cobertura forestal, se usará el enfoque de la geografía cuantitativa, el cual tiene el interés por el espacio geográfico y su delimitación guiada por sus aspectos generales, está basado en la observación y las mediciones que le permiten llegar a condiciones generalizables, que posteriormente permitan explicar situaciones particulares, este enfoque da un gran interés a las técnicas instrumentales como los Sistemas de Información Geográfica. El objetivo de la utilización de estas mediciones y observaciones es la búsqueda de soluciones simples, soluciones que permitan resolver problemáticas concretas que representen las bases necesarias para la mejora de la calidad de vida de las personas (Buzai, 2015).

1.5.1 Factores que originan los incendios forestales

Los incendios forestales se definen como una propagación libre del fuego en la vegetación forestal. Para que este fuego se origine se requieren de ciertos elementos que propicien su aparición, estos elementos se enmarcan en el llamado “triángulo del fuego”, que está conformado por combustibles, calor y oxígeno. Si alguno de estos tres elementos faltaran no sería posible la aparición del incendio forestal (Rodríguez Trejo, 2014).

Para que comience un incendio forestal se necesita de una fuente de ignición, esta fuente de ignición puede tener dos orígenes, naturales o antropogénicos. Los primeros están caracterizados por ser poco frecuentes y de alta intensidad, cuyas causas más comunes son las erupciones volcánicas, los rayos, la escasez de lluvia y las altas temperaturas. En cuanto al origen antropogénico, pueden ser desde simples descuidos, actividades de campismo como el uso de fogatas, presencia de cazadores furtivos o bien las quemas agrícolas y pecuarias; estas últimas son las que ocasionan el mayor número de incendios forestales en el país, especialmente en las áreas de pastoreo donde se acostumbra

quemar los zacatones y pastos naturales viejos para que los pastos verdes broten de una forma más apresurada, pues este es utilizado como forraje; en la misma situación se presentan las zonas agrícolas, donde se quema de la vegetación natural, con la finalidad de implementar algún tipo de cultivo, o bien con la práctica del sistema de tumba, roza y quema (Rodríguez Trejo, 2014).

Tipos de incendios forestales

La manifestación de incendios forestales se puede presentar en diferentes tipos, los cuales se clasifican en tres tipos, según el estrato del bosque que se queme: subterráneos, superficiales y de copa. En los incendios subterráneos, el fuego se produce en las capas orgánicas del suelo forestal y se desarrollan prácticamente sin llamas, con un avance lento pero muy persistente, estos incendios resultan ser muy destructivos para el suelo; no son muy comunes en el país. Los incendios superficiales, son los que tienen mayor presencia en el país, se desarrollan sobre el suelo forestal, consumiendo los combustibles forestales compuestos por ramas secas, hojarasca, hierbas, renuevo, troncos, etc., una de las características es que tienen una rápida propagación. El tercer tipo de incendios es el que se presenta en las copas de los árboles, éste es poco frecuente en México, estos son causados por incendios del tipo superficial y tienen la característica de desplazarse de una copa de árbol a otra con gran rapidez, en estos incendios el viento juega un papel importante en el incremento del fuego, pues este elemento aviva las llamas de tal forma que puedan alcanzar el follaje (Rodríguez Trejo, 2014).

Régimen de incendios

Se podría mencionar de la forma más simple, que un régimen de incendios, es el conjunto de elementos tales como la frecuencia la intensidad y estacionalidad con la que se presenta el fuego (González Tagle *et al.*, 2007). Por ejemplo para los bosques de *Pinus hartwegii*, se estima que de forma natural la presencia promedio de incendios no supera los diez años y que la media está en torno a los cinco años, en este sentido se puede mencionar que la ocurrencia de incendios de origen humano supera enormemente a la natural (Rodríguez Trejo, 2001). Se menciona que en las partes más elevadas del país en

donde el *Pinus hartwegii* marca el límite altitudinal para los árboles, el exceso de fuego puede propiciar la eliminación del estrato arbóreo, dando paso al desarrollo de pastos (Rodríguez Trejo, 2001).

Sin embargo se menciona también la importancia que la presencia del fuego tiene en los ecosistemas forestales, ya que para especies como el *Pinus hartwegii* que libera su semilla en el invierno y si la cual cae en una localidad que fue quemada y que tenga pocas probabilidades de volverse a quemar, esta semilla se verá beneficiada con el enriquecimiento del suelo propiciado por el lecho de cenizas que se generó después del incendio, pero si por el contrario vuelve a ocurrir un incendio cuando ya haya surgido una plántula, esta se perderá (Rodríguez Trejo, 2001).

Anomalías climáticas

Debido a diversas anomalías climáticas como El Niño Oscilación del Sur (ENOS), el cual puede provocar largos periodos de sequías, existen diversas zonas en el país que pueden ser muy vulnerables a los incendios forestales (Muñoz *et al.*, 2005). Estos largos periodos de sequía propician las condiciones necesarias para que los materiales depositados en el suelo provenientes del estrato arbóreo, arbustivo y herbáceo, tales como hojarasca, ramas, troncos, etc., conocidos como materiales combustibles pierdan humedad, los cuales se convierten en las fuentes principales para que un incendio aparezca (Wong y Villers, 2006). En México una de las temporadas de sequía más severas se tuvo en los años 1997-1998, la cual fue propiciada por el ENOS, debido al cual, la formación de lluvias intensas en los meses de verano se inhibe, en estos años se presentan una gran cantidad de incendios forestales; además, debido a la falta de lluvia, se tuvieron grandes pérdidas en el país en agricultura, ganadería, pesca y silvicultura (Magaña, 2001).

1.5.2 Definición de bosque y densidad de cobertura forestal

Según la FAO un bosque es toda aquella tierra que se extiende por más de 0.5 ha (ha) y que está dotada de árboles de una altura superior a 5 metros y una cubierta de dosel de más del 10 por ciento o bien de árboles que sean capaces de alcanzar dicha altura, estos

lugares se caracterizan por la presencia de árboles y por la ausencia de otros usos de la tierra, tales como zonas agrícolas y urbanas, son incluidas también áreas con árboles jóvenes que aún no han alcanzado dicha altura pero que pueden llegar a alcanzarla, las áreas que están desprovistas temporalmente de vegetación a causa de talas por ordenación forestal o bien causas naturales también son incluidas en la categoría de bosque, de estas se espera que se regeneren en un lapso de 5 años.

Se pueden incluir también en esta categoría las áreas de agricultura migratoria que hayan sido abandonadas y que presenten una regeneración de árboles que alcanzan o puedan alcanzar una cubierta de dosel del 10% o bien una altura de cinco metros. En este sentido se excluye como un bosque formaciones de árboles en sistemas de producción agrícola, como pueden ser las plantaciones de frutales y los sistemas agroforestales que tengan cultivos bajo una cubierta de árboles, con excepción del sistema “Taungya”, en el cual se siembran cultivos solamente en los primeros años de la rotación forestal (FRA, 2010).

El dosel, es la parte conocida como copas de los árboles, las cuales constituyen un hábitat único en los bosques, dicho dosel puede presentar una densidad la cual es considerada como una variable que permite conocer la situación en la que se encuentran los bosques, en este sentido la densidad de dosel forestal o densidad de cobertura forestal es considerada como una unidad de medida del área ocupada por el dosel de los árboles en una zona determinada, la cual se mide en términos del área cubierta por el follaje por hectárea (ha) o área basal por hectárea (Erives-Beltrán *et al.*, 2014).

1.5.3 Bases físicas de la percepción remota

Se puede definir a la teledetección o percepción remota como la técnica que permite obtener información a distancia de la superficie terrestre y de los objetos que están sobre ella. Para poder obtener dicha información deben de existir tres elementos básicos, un sensor, un objeto y un flujo de energía que hará que exista una interacción entre los dos primeros elementos, esta interacción permitirá al sensor identificar al objeto.

Este flujo energético proviene principalmente del Sol, el cual es la fuente principal de energía del planeta, pero también puede provenir del mismo objeto como energía térmica, o bien este flujo energético puede provenir del sensor (Chuvienco, 2002). Se puede ver que existen tres formas principales de obtener información a partir de un sensor remoto las cuales son: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión (figura 1). En el ámbito de la teledetección, la primera forma de adquisición de la información es una de las más importantes, debido a que proviene del Sol.

Esta energía solar ilumina la superficie terrestre y las distintas cubiertas u objetos que yacen en la superficie reflejan esta energía la cual es captada por el sensor remoto; en esta interacción entre el flujo energético reflejado por la superficie terrestre y el captado por el sensor, se encuentra la atmósfera, la cual absorbe y dispersa una parte de la señal original (Chuvienco, 2002).



Figura 1. Elementos en la adquisición de información en teledetección. Fuente: Calvache Ulloa (2004).

Como se mencionó anteriormente, una de las fuentes de información de un sensor remoto es la radiación electromagnética; esta energía radiante se puede describir

mediante su longitud de onda o frecuencia. Por lo general, se establecen una serie de divisiones en donde la radiación electromagnética tiene un comportamiento semejante. Dicha organización de longitudes de onda o frecuencia se les suele llamar bandas y a esta organización de bandas se denominan espectro electromagnético (figura 2), el cual comprende desde las longitudes de onda más cortas y más energéticas (rayos gamma, ultra violeta, rayos X) que suelen medirse en micrómetros ($\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$) o bien en nanómetros ($\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$), hasta longitudes de onda muy largas y menos energéticas (micro-ondas) que pueden medirse tanto en mm y cm como en metros (Chuvienco, 2002).

Menciona Chuvienco (2002) que en el campo de la teledetección se destacan una serie de bandas espectrales, las cuales son las que más usualmente se utilizan para analizar la superficie terrestre, éstas son:

- Espectro visible (0.4-0.7 μm). Esta parte del espectro electro-magnético se denomina así debido a que es la única región que puede ver el ojo humano. En este intervalo se encuentran los colores primarios azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm).
- Infrarrojo cercano (NIR 0.7-1.3 μm). Esta región del espectro electro-magnético es de gran utilidad para la discriminación de masas vegetales y concentraciones de humedad, además ofrece una gran información acerca de las condiciones en las cuales se encuentra la vegetación. Esta región en particular es de gran utilidad para la detección de las superficies quemadas.
- Infrarrojo medio (1.3-8 μm). Esta región es particularmente interesante, ya que en ella se mezclan la energía emitida por la superficie terrestre y la energía reflejada proveniente del Sol. Se encuentra subdividida en dos bandas; la primera se denomina infrarrojo de onda corta (SWIR) por sus siglas en inglés y la cual se sitúa entre (1.3 a 2.5 μm). Dicha banda resulta de gran utilidad para la estimación del contenido de humedad en el suelo y en la vegetación. La segunda banda se encuentra aproximadamente en los 3.7 μm , esta banda es especialmente útil para detectar focos de calor que pueden estar asociados a incendios.

- Infrarrojo térmico o lejano (8-14 μm). Esta banda detecta el calor proveniente de la superficie terrestre.

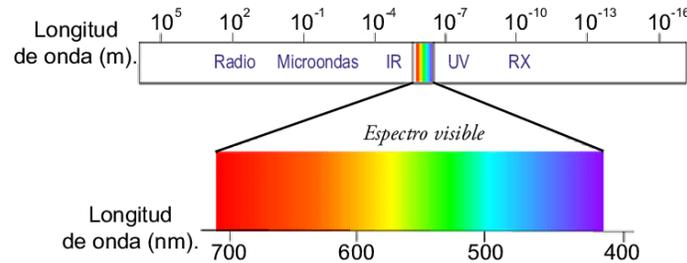


Figura 2. Espectro electro-magnético. Fuente: Quirós Rosado (2014).

Actualmente, existen una gran variedad de satélites que captan esta información y la almacenan, para posteriormente ser distribuida a diversas antenas receptoras en el mundo, para este estudio se utilizaron los datos de los satélites Landsat 5, 7 y 8 para la aplicación del índice espectral y obtención de las superficies quemadas en el área de estudio, productos del sensor MODIS para el ajuste del umbral del índice BAI y algunas imágenes del sensor ASTER para la validación de los resultados. Por ellos se da una breve explicación de cada uno de estos elementos.

Satélites Landsat

La familia de satélites Landsat (Tabla 1), forma parte de un proyecto de la agencia espacial norteamericana que nació a finales de la década de los sesenta, tuvo el objetivo principal de la observación de los recursos de la Tierra, el primero de estos satélites fue nombrado ERTS, (Earth Resource Technology Satellite), el cual fue lanzado en julio de 1972. Posteriormente, en el segundo lanzamiento de estos satélites en 1975, se les nombraría como Landsat.

Los primeros tres satélites Landsat se encontraban a una altura orbital de 917 km, realizaban 14 órbitas diarias, lo que les permitía regresar a la misma posición a los 18 días (su resolución temporal era de 18 días), estos tres primeros satélites fueron dotados de cuatro instrumentos de observación, el sensor *Multispectral Scanner* (MSS) y tres cámaras de vídeo, el sensor MSS disponía de 4 Bandas espectrales, dicho sensor fue diseñado para

la detección de masas vegetales, recursos hídricos y mineros. Después la NASA lanzó los satélites Landsat 4 y 5, y a los cuales hicieron varias modificaciones, tales como la reducción de la altura orbital a 705 km, además se mejoró su resolución temporal a 16 días (Chuvieco, 2002).

Estos satélites fueron dotados con varios instrumentos de observación, de los cuales el que interesa más describir es el sensor *Thematic Mapper* (TM), puesto que de este sensor se obtuvieron las imágenes de los años 1998 al 2002. Dicho sensor fue diseñado directamente para la cartografía temática, tuvo varias mejoras tales como el aumento de la resolución espacial, la cual pasó de 79 a 30m, también la resolución espectral fue incrementada, ya que este captaba la señal de 7 bandas.

Después en 1999, la NASA lanza el satélite Landsat 7, fue dotado del sensor *Enhanced Thematic Mapper plus* (ETM+), el cual tuvo grandes mejoras, tales como la adición de una banda pancromática de 15m de resolución espacial, además de un aumento en la resolución espacial de la banda térmica a 60m (Chuvieco, 2002). Sin embargo, en mayo del 2003 se presentó una falla en el corrector de líneas escaneadas (SLC) por sus siglas en inglés, lo que provocó que las imágenes de este sensor presentaran franjas de datos inválidos denominados "gaps", originadas por un patrón en zig-zag a lo largo de la trayectoria de tierra del satélite ocasionadas por la falta de operatividad de dicho mecanismo (USGS, 2018).

Lanzado el 11 de febrero del 2013, el Landsat 8 es equipado con dos sensores el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). Aunque las bandas del sensor OLI tienen una similitud con las bandas del antecesor ETM+, éste fue mejorado en algunos aspectos, tales como la incorporación de nuevas bandas una de ellas es un canal profundo en la región del azul con una longitud de onda de 0.43-0.45 μm la cual fue diseñada específicamente para realizar investigaciones de recursos hídricos, la otra banda que se incorporó fue un nuevo canal en el infrarrojo para la detección de nubes cirrus. En cuanto al sensor TIRS, este capta la información de la región del infrarrojo térmico pero en dos bandas a diferencia de sus antecesores que lo hacían en una sola banda (USGS, 2018).

Tabla 1. Distribución de bandas espectrales de los sensores TM, ETM+ y OLI (USGS, 2018).

SENSOR	TM	ETM+	OLI
BANDA 1	0.45-0.52 μm	0.45-0.52 μm	0.43-0.45 μm
BANDA 2	0.52-0.60 μm	0.52-0.60 μm	0.45-0.51 μm
BANDA 3	0.63-0.69 μm	0.63-0.69 μm	0.53-0.59 μm
BANDA 4	0.76-0.90 μm	0.76-0.90 μm	0.64-0.67 μm
BANDA 5	1.55-1.75 μm	1.55-1.75 μm	0.85-0.88 μm
BANDA 6	10.40-15.50 μm	10.40-15.55 μm	1.57-1.65 μm
BANDA 7	2.08-2.35 μm	2.08-2.35 μm	2.11-2.29 μm
BANDA 8		0.52-0.90 μm	0.50-0.88 μm
BANDA 9			1.36-1.38 μm
BANDA 10			10.60-11.19 μm
BANDA 11			11.50-12.51 μm

Sensor MODIS

MODIS es un sensor que se encuentra a bordo de los satélites Terra, lanzado el 18 de diciembre de 1999 y Aqua el cual fue lanzado en mayo del 2002. Estos satélites tienen una órbita heliosíncrona cuasi-polar, se mantienen a una altura de 708 y 705 km respectivamente; el satélite Terra mantiene una órbita descendente de norte a sur, pasando por el ecuador a las 10:30 am, mientras que el satélite Aqua mantiene una órbita ascendente pasando por el ecuador a la 1:30 pm. Estos satélites monitorean la totalidad de la superficie de la Tierra cada uno o dos días dependiendo de la latitud en la que se encuentren (García-Mora y Mas, 2011a).

El sensor MODIS fue dotado de una alta resolución radiométrica (12 bits), al igual que una alta resolución espectral (36 bandas) estas se encuentran en un intervalo de longitud de onda que va de los 0.4 μm a los 14.4 μm . Las primeras 19 bandas se encuentran en la región del espectro electromagnético que va de los 0.4 a los 2.1 μm . las primeras siete bandas son utilizadas para aplicaciones terrestres, las bandas que van de la 8 a la 16 para observaciones oceánicas y de la 16 a la 19 se emplean para fines de mediciones

atmosféricas (Tabla 2), las bandas restantes se encuentran en la porción del infrarrojo térmico; la resolución espacial de este sensor depende de las bandas que se elijan, las bandas 1-2 tienen una resolución espacial de 250m, las bandas 3-7 tienen una resolución espacial de 500m y las bandas 8-36 tienen una resolución espacial de 1000m (García-Mora y Mas, 2011b).

Tabla 2. Usos principales y distribución de las 36 bandas espectrales del sensor MODIS. Fuente: (García-Mora y Mas 2011).

Uso principal	Banda	Longitud de onda	Uso principal	Banda	Longitud de onda
límite de tierra nubes y aerosoles	1	620-670 nm	Temperatura de la superficie /nubes	21	3.92-3.98 μm
	2	841-876 nm		22	3.92-3.98 μm
Propiedades de tierra nubes y aerosoles	3	459-479 nm		23	4.02-4.08 μm
	4	545-565 nm	24	4.43-4.49 μm	
	5	1230-1250 nm	Vapor de agua de nubes cirrus	25	4.48-4.54 μm
	6	1628-1652 nm		26	1.36-1.39 μm
	7	2105-2155 nm	Propiedades de las nubes	27	6.53-6.89 μm
Observación del océano/ Fitoplancton/ Biogeoquímica	8	405-420 nm		28	7.17-7.47 μm
	9	438-448 nm		29	8.40-8.70 μm
Observación del océano/ Fitoplancton/ Biogeoquímica	10	483-493 nm	Ozono	30	9.58-9.88 μm
	11	526-536 nm	Temperatura de la superficie y de las nubes	31	10.78-11.28 μm
	12	546-556 nm		32	11.77-12.27 μm
	13	662-672 nm	Altitud de las nubes	33	13.18-13.48 μm
	14	673-683 nm		34	13.48-13.78 μm
	15	743-753 nm		35	13.78-14.08 μm
	16	862-877 nm		36	14.08-14.38 μm
	Vapor de agua atmosférico	17	890-920 nm		
18		931-941 nm			
19		915-965 nm			

De este sensor se pueden obtener diversos productos, pero uno de los que fueron utilizados en este estudio para ajustar el umbral del índice BAI fue el producto MCD14ML (González *et al.*, 2007), el cual es una serie de datos combinados de los satélites Aqua y Terra que indican anomalías térmicas o puntos de calor; estos, por lo general, se deben a quemaduras agrícolas o incendios forestales.

Para identificar dichas anomalías térmicas este producto utiliza las bandas 21 ó 22, las cuales se encuentran en el intervalo de 3.92-3.98 μm , dicho intervalo cubre la región del infrarrojo medio y la banda 31 del infrarrojo térmico. La forma en la que detecta los puntos de calor es mediante la temperatura de brillantez de estas bandas. Dicho producto tiene una resolución espacial de 1 km, lo que quiere decir que un punto de calor puede ser la suma de varios incendios en un pixel de resolución espacial de 1 km, además cuenta con la información del nivel de fiabilidad de los puntos de calor registrados, el nivel radiativo del incendio y de su ubicación (García-Mora y Mas, 2011b).

El otro producto empleado fue el MCD64A1; este producto también consiste en una serie de datos combinados de los satélites Aqua y Terra, pero éste utiliza un índice de vegetación que es sensible a las superficies quemadas; dicho índice se deriva de las bandas 5 y 7 que se encuentran en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR), este producto tiene una resolución de 500 m y contiene la información de la fecha en días julianos en la que fue detectada la superficie quemada (LPDAAC, 2018).

Sensor ASTER

Este sensor se encuentra a bordo del satélite Terra, y está compuesto por tres subsistemas: VNIR, SWIR y TIR (Tabla 3), los cuales presentan una serie de características particulares. Una de las características más sobresalientes de este sensor es su alta resolución espacial, pues el subsistema VNIR tiene una resolución espacial de 15 m; debido a esta mayor resolución espacial será usado para la validación de los resultados obtenidos, además de su amplio rango espectral, ya que cuenta con 14 bandas que cubren la región del espectro visible hasta la del infrarrojo térmico. En cuanto al subsistema SWIR

tiene una resolución espacial de 30 m y el subsistema TIR una resolución espacial de 90 m. (ASTER User Handbook).

Tabla 3. Distribución de las bandas espectrales del sensor ASTER. Fuente: (ASTER User Handbook).

Subsistema	Banda	Longitud de onda	Resolución espacial
<u>VNIR</u>	1	0.52-0.60 μm	15m
	2	0.63-0.69 μm	
	3N	0.78-0.86 μm	
	3B	0.78-0.86 μm	
<u>SWIR</u>	4	1.60-1.70 μm	30m
	5	2.14-2.18 μm	
	6	2.18-2.22 μm	
	7	2.23-2.28 μm	
	8	2.29-2.36 μm	
	9	2.36-2.43 μm	
<u>TIR</u>	10	8.12-8.47 μm	90m
	11	8.47-8.82 μm	
	12	8.92-9.27 μm	
	13	10.25-10.95 μm	
	14	10.95-11.65 μm	

Propiedades espectrales de la vegetación

Como se mencionó anteriormente, la información que un sensor remoto obtiene procede del flujo electro-magnético proveniente del sol, que es reflejado, emitido o reflejado-emitido por las diferentes cubiertas y objetos de la superficie terrestre, debido a que la vegetación refleja este flujo electro-magnético de varias formas en las distintas longitudes de onda; es necesario describir brevemente el comportamiento espectral de dicha

cobertura, puesto que los índices espectrales que detectan las superficies quemadas están basados en dicho comportamiento espectral de la vegetación.

Detectar la radiancia que proviene de las masas vegetales presenta un gran número de dificultades, debido a que en este proceso influyen diversos factores, los cuales pueden estar relacionados con la reflectividad de las hojas de las plantas; esta reflectividad de las hojas depende en gran medida de los pigmentos, la estructura celular y del contenido de humedad (Chuvieco, 2002). Otro de los factores que intervienen en la radiancia que detecta el sensor son las características geométricas que presentan las plantas; en éstas se incluyen la forma de las hojas, la distribución que tienen en la planta y el área foliar. Y el tercer factor que se puede incluir en este proceso de detección, es la disposición geográfica, en la cual puede intervenir la pendiente, la orientación, las condiciones atmosféricas, etc., (Chuvieco, 2002).

Debido a una gran variedad de estudios realizados en la reflectividad de las hojas de las plantas se sabe que el comportamiento espectral varía dependiendo de las distintas especies (Gates *et al.*, 1965), pero, se establece una serie de patrones similares de reflectancia en todas ellas (figura 3), los cuales están marcados por una baja reflectancia en la región del espectro visible (0.4-0.7 μm), la cual es debida principalmente por la absorción de los pigmentos que se encuentran en las hojas (clorofilas, xantofila y caroteno), estos pigmentos absorben en la región situada entre los 0.445 μm , aparte la clorofila también presenta una segunda banda de absorción en el canal del rojo; entre estas dos bandas de absorción debida a estos pigmentos se presenta una banda intermedia en la banda del verde, en donde la absorción es más baja, lo que provoca que nuestros ojos puedan percibir la vegetación vigorosa en dicho color (Chuvieco, 2002).

El otro patrón que puede distinguirse es en la región del infrarrojo cercano (NIR), en donde se presenta una alta reflectancia, la cual se debe principalmente a la estructura celular de las hojas, puesto que algunos de los elementos que conforman esta estructura tales como la epidermis superior e inferior, parénquima en empalizada¹ y el mesófilo

¹ Principal tejido que realiza la fotosíntesis y proporciona alimento a la planta.

esponjoso² tienen dimensiones similares a las longitudes de onda de esta región del espectro electro-magnético, lo que provoca la reflectancia (Gates *et al.*, 1965). El siguiente patrón se distingue después de los 1.4 μm , en esta región del espectro el agua juega un papel primordial en la absorbanza de la planta; se incrementa, disminuyendo la reflectividad en la banda del SWIR, estos patrones indican que la vegetación se encuentra sana (Chuvienco, 2002).

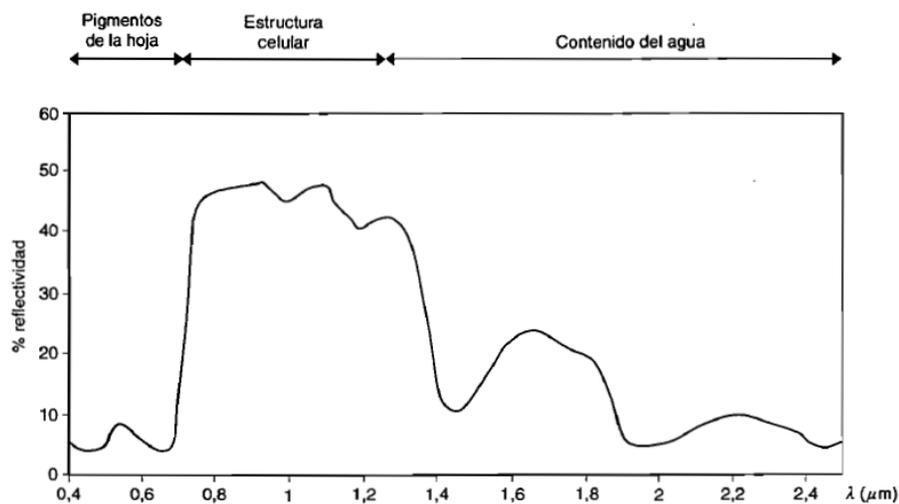


Figura 3. Comportamiento espectral de la vegetación sana. Fuente: (Chuvienco, 2002).

El comportamiento espectral de la vegetación antes mencionado cambia cuando un incendio ocurre, este comportamiento espectral presenta ciertas características dependiendo el tiempo transcurrido después del incendio, pues estas cubiertas evolucionan de forma diferente en el corto y largo plazos, en este comportamiento espectral se deben de tener en cuenta dos tipos de señales, una debida principalmente a la deposición del carbón, lo cual se debe a la combustión de la vegetación y otra señal debida al daño a la estructura celular de las hojas de las plantas, generalmente la primer señal dura poco tiempo y la segunda tiende a ser un poco más estable pero menos nítida (De Santis y Vaughan, 2009).

² Tejido que se encuentra entre ambas caras de las hojas.

Una de las características principales que se distinguen en el comportamiento espectral de la vegetación quemada (figura 4), es el aumento de reflectancia en la región del espectro visible, esto debido principalmente a la pérdida de los pigmentos de las hojas, en la región del NIR la reflectancia disminuye de una forma considerable debida al daño en la estructura celular de la hoja y en la región del SWIR la reflectancia aumenta por la pérdida del agua que se encontraba contenida en la estructura interna de las hojas (Pérez Cabello y De la Riva Fernández, 1998). Sin embargo en áreas recientemente quemadas con fuego intenso y en donde la vegetación fue afectada de forma severa y la predominancia de carbón y cenizas es significativa, la reflectividad en el canal del visible puede descender considerablemente, lo que puede resultar en confusión con otro tipo de áreas con baja reflectancia como pueden ser bosques de coníferas muy densos, humedales, cuerpos de agua, sombras, etc., (Pereira *et al.*, 1999).

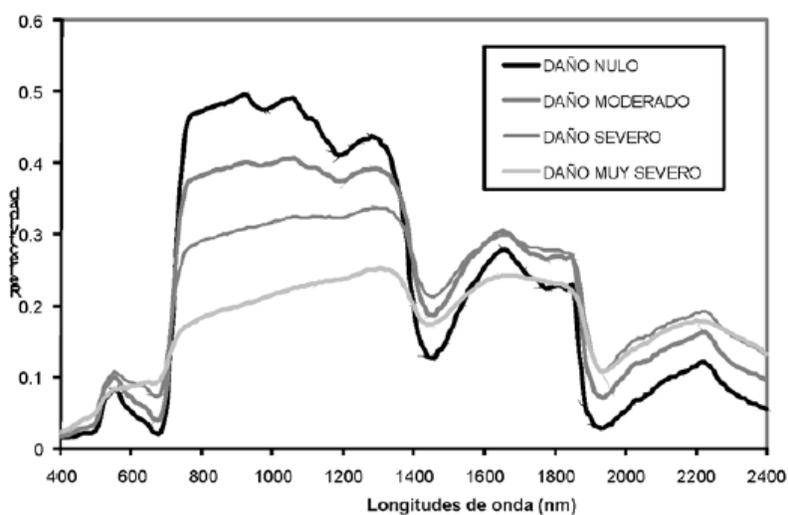


Figura 4. Comportamiento espectral de la vegetación quemada dependiendo del daño sufrido por el fuego. Fuente: (De Santis y Vaughan, 2009).

1.5.4 Índices espectrales para detectar áreas quemadas

Uno de los mayores retos de la teledetección en el ámbito del estudio de la vegetación, es la posibilidad de estudiar esta cobertura terrestre a partir de sus medidas de reflectividad con independencia de otros factores que puedan perturbar esta señal radiométrica, factores entre los cuales se encuentra la reflectividad del suelo (Gilabert *et al.*, 1997). O bien citando las palabras de Gilabert *et al.*, (1997) “para poder establecer una relación biunívoca entre la medida efectuada por teledetección y los parámetros biofísicos que caracterizan a una cubierta vegetal, es necesario derivar algún parámetro (magnitud secundaria) a partir de la reflectividad (magnitud primaria) que normalice la influencia de todos los otros factores perturbadores, de forma que idealmente, esta magnitud secundaria adopte el mismo valor para una cantidad de vegetación dada aunque esta se asiente sobre suelos con propiedades ópticas distintas o la medida se realice bajo condiciones atmosféricas distintas”.

Esta problemática se ha abordado con el diseño de los denominados índices espectrales o de vegetación, los cuales son parámetros calculados a partir de los valores de la reflectividad en las distintas longitudes de onda de las cuales se pretende obtener información acerca de la vegetación y que tienen también como objetivo disminuir las perturbaciones de otros elementos tales como el suelo y la atmósfera (Gilabert *et al.*, 1997). Se menciona que aproximadamente un 90% de la información referente a la vegetación se encuentra entre las bandas del rojo, la cual esta correlacionada con el contenido de clorofila y del infrarrojo cercano (NIR) la cual esta correlacionada con la estructura celular interna de la hoja, debido a esto la mayoría de índices de vegetación se restringen a estas dos bandas (Gilabert *et al.*, 1997).

Generalmente existen una gran variedad de índices espectrales cuya función principal es realzar la señal de la vegetación y los cuales han sido utilizados para la identificación de superficies quemadas, pero existen índices espectrales que han sido diseñados específicamente para realzar la señal producida por la vegetación quemada, entre estos se pueden mencionar el Burn Area Index (BAI), el Normalized Burn Ratio (NBR), Burn Area

Index modified (BAIm), etc., (De Santis y Vaughan, 2009). Para el caso de este trabajo se decidió utilizar el índice BAI con la finalidad de probar su eficacia en un ecosistema de bosques templados.

El índice BAI fue diseñado por Martin (1998) utilizando las regiones espectrales del rojo e infrarrojo cercano asumiendo que el diseño de un índice espectral adecuado para la discriminación de áreas quemadas debe estar definido en función de la proximidad espectral a valores de referencia que se consideren como característicos de zonas quemadas. Dicho índice se basa en la distancia establecida entre cada pixel y un valor espectral de referencia en el cual las áreas recientemente quemadas tienden a converger (Martin y Chuvieco, 1998). Este índice está definido de la siguiente forma:

$$BAI = \frac{1}{(pcRED - \rho RED)^2 + (pcNIR - \rho NIR)^2}$$

Dónde: $pcRED = 0.1$ y ρRED = reflectancia de cada pixel en la banda roja

$pcNIR = 0.06$ y ρNIR = reflectancia de cada pixel en la banda del infrarrojo cercano

CAPÍTULO 2. ÁREA EN ESTUDIO

2.1 Localización

La Sierra Nevada Río Frío es un alineamiento montañoso alargado con orientación N-S, está situada en el centro de México entre los Estados de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala; comprende desde el monte Tláloc en el norte hasta el volcán Popocatepetl en el sur teniendo una longitud de 70 km y un área de 1,227 km², pertenece a la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano y a la sub-provincia fisiográfica de Lagos y Volcanes del Anáhuac; sus coordenadas de ubicación son: 18° 54' 39" a 19° 33' 00" de Latitud N y 98° 48' 10" Longitud W.

Este lugar tiene una gran importancia ya que constituye un límite biogeográfico entre las regiones neártica y neotropical además de tener una gran riqueza natural y presencia de endemismos, dentro de este lugar se encuentra el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Zoquiapan el cual se delimita por encima de la cota de 3600 m (Arriaga *et al.*, 2000). Administrativamente, la Sierra Nevada Río Frío está integrada por parte de los territorios de ocho municipios del estado de México (Amecameca, Atlautla, Chalco, Chicoloapan, Ecatzingo, Ixtapaluca, Tepetlaxtloc, Texcoco y Tlalmanalco); diez municipios de Puebla (Atlixco, Calpan, Chiantzingo, Huejotzingo, San Felipe Teotlalcingo, San Nicolás de los Ranchos, San Salvador el Verde, Tianguismanalco, Tlahuapan y Tochimilco); dos de Tlaxcala (Calpulalpan y Nanacamilpa de Mariano Arista) y dos municipios de Morelos (Ocuituco y Tetela del Volcán). Siendo los municipios de Texcoco, Ixtapaluca, Tlahuapan, San Nicolás de los Ranchos, Atlautla y Amecameca los que ocupan una mayor superficie de la misma (Figura 5).

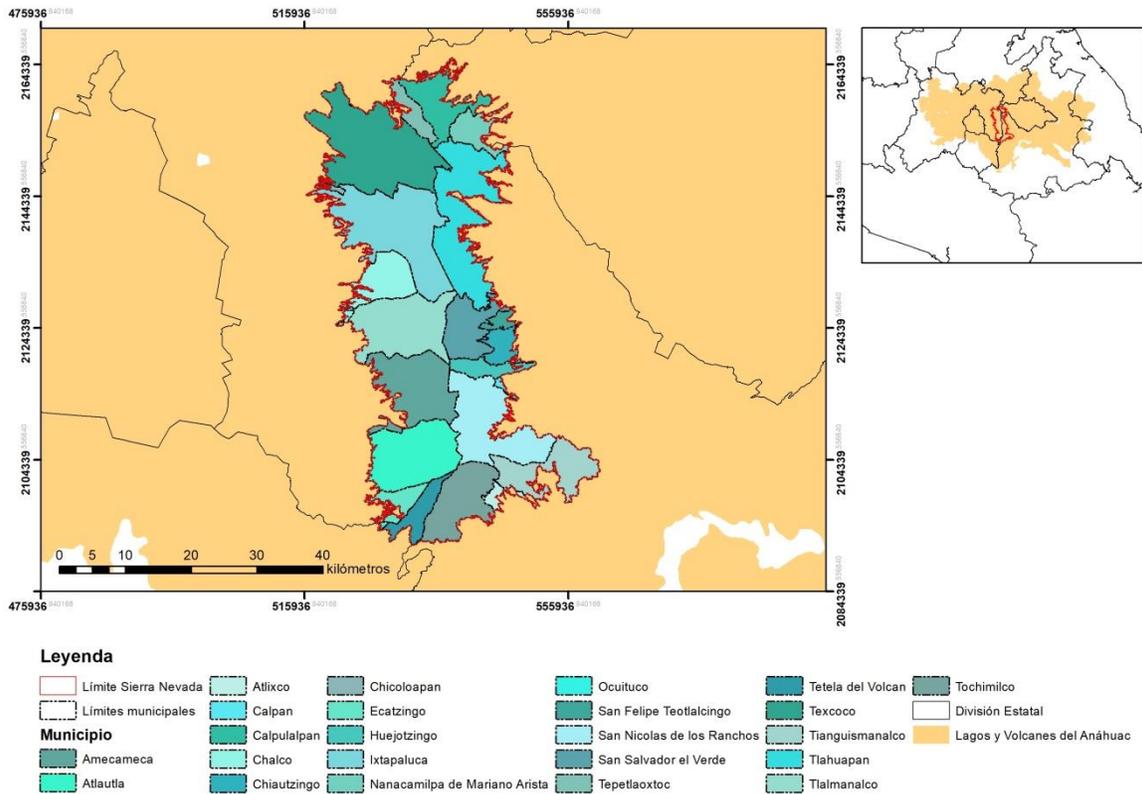


Figura 5. Municipios que integran la Sierra Nevada Río Frío. Fuente: INEGI 2017.

2.2 Geología

El volcán Popocatepetl es un estratovolcán de edad plio-cuaternaria que yace sobre un basamento de rocas metamórficas y sedimentarias, y que está formado por tres unidades (figura 6) de las cuales la primera corresponde al edificio volcánico del Popocatepetl, el cual está compuesto en su mayoría por lavas con una composición dasítica, andesítica y riolítica, la segunda unidad es el piedemonte del volcán y está compuesto en su mayoría por material piroclástico y materiales de acarreo; la tercera unidad está constituida por diversos volcanes monogenéticos los cuales se ubican al sur oeste del piedemonte (Muñoz, 2007). El volcán Iztaccíhuatl comienza su formación en el Oligoceno superior y Mioceno, esto debido a la fractura de Humboldt, durante el Plioceno el volcán arroja lavas andesíticas porfídicas de piroxena, las cuales terminaron por consolidar el macizo montañoso que yace al sur del volcán Popocatepetl. Autores como Mooser (1975) mencionan que el último periodo de actividad del Iztaccíhuatl se dio hace

aproximadamente unos 25,000 años; debido a esta datación de tiempo dicho autor le da una edad cuaternaria; en cuanto a las rocas que lo conforman, se pueden mencionar principalmente andesita y toba andesítica, aunque se pueden encontrar también aluvión, basalto, toba basáltica y brecha sedimentaria (Escamilla, 2007). En cuanto al cerro Tláloc se formó aproximadamente a finales del Mioceno, terminando su formación a principios del Pleistoceno, este monte es el producto de efusiones de lavas de andesíticas y dacíticas, aunque las lavas del edificio volcánico son porfídicas.

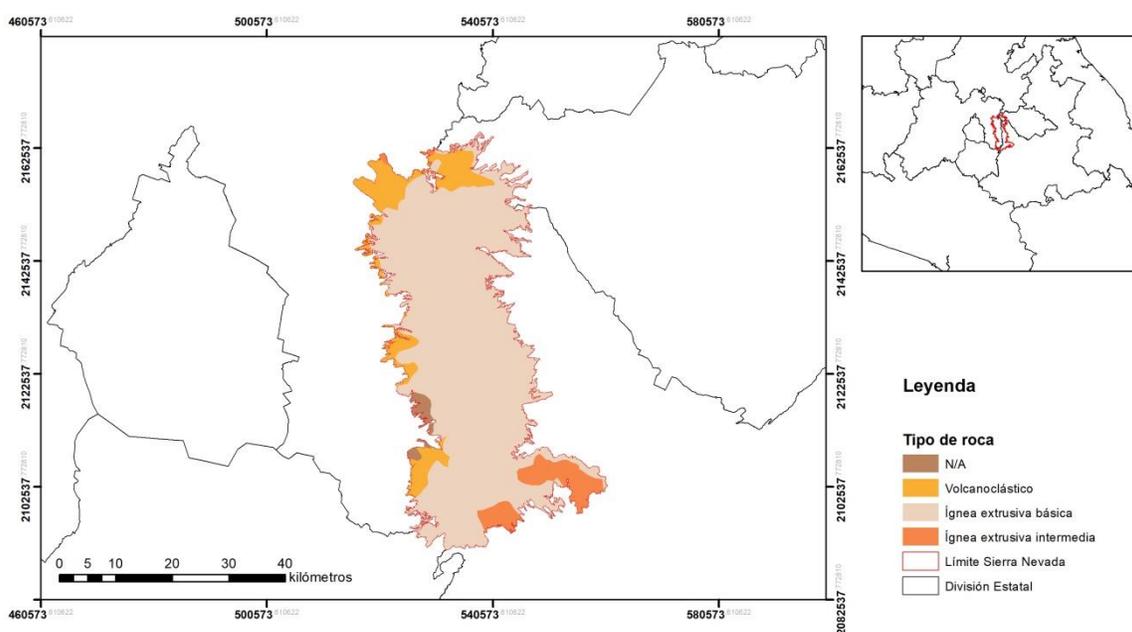


Figura 6. Tipos de rocas en la Sierra Nevada Río Frío. Fuente: INEGI 2017.

2.3 Clima

Debido a diversos factores en esta región se tienen varios climas, en general se puede decir que en las partes bajas de las montañas se tiene un clima del tipo templado húmedo (figura 7), este se extiende aproximadamente hasta los 3,000 msnm; sobrepasando esta altitud y hasta los 4,000 msnm se presenta un clima del tipo templado semifrío

subhúmedo, en el cual se tienen temperaturas medias de entre 5 y 12°C superando la cota de los 4,000 msnm el clima es del tipo frío con temperaturas medias de 5°C. y más allá de los 5,000 msnm se presenta el clima del tipo muy frío en donde las temperaturas son menores a los 0°C, aunque este tipo de clima solo se presenta en superficies reducidas en las cimas de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl (Escamilla, 2007). Como se mencionó anteriormente, se tienen varios subtipos climáticos en la región los cuales pueden hacer variar el régimen de lluvias y las temperaturas medias, por ejemplo en la zona de lomeríos de la parte occidental del cerro Tláloc se tiene un clima templado subhúmedo con una precipitación media anual de 700 mm, mientras que en las laderas montañosas del cerro se presenta un clima templado subhúmedo con precipitaciones que van de los 900 a los 1200 mm (Sánchez y López, 2003).

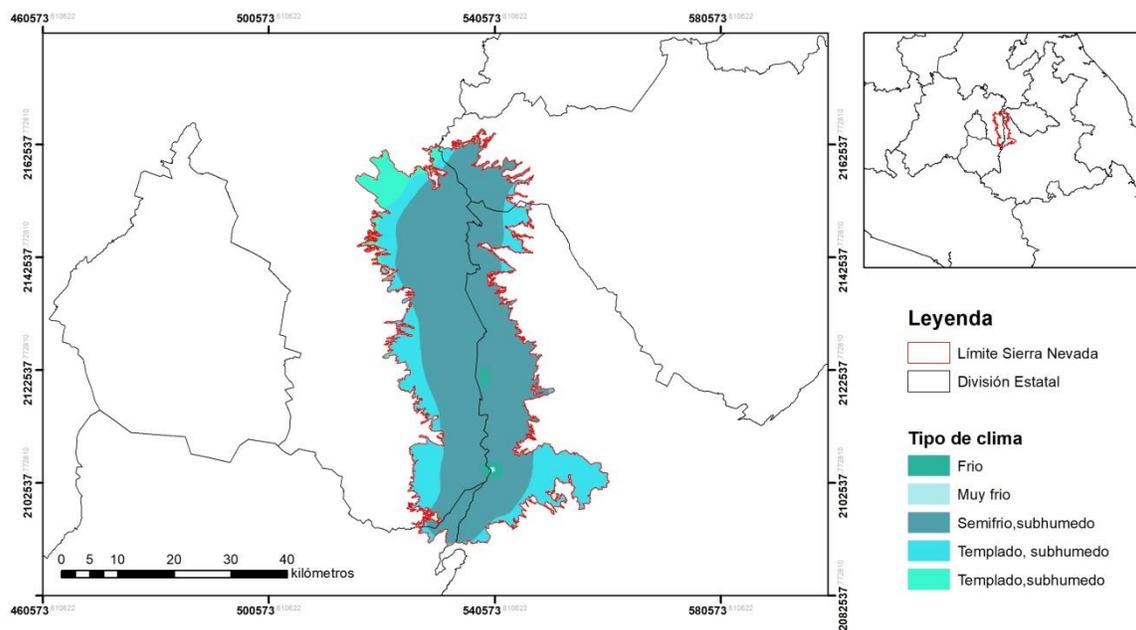


Figura 7. Tipo de clima en la Región Sierra Nevada Río Frío. Fuente: INEGI 2017.

2.4 Hidrografía

Uno de los mayores servicios ambientales que proporciona la Sierra Nevada Río Frío es la captación de agua para la recarga de mantos freáticos, agua que se genera principalmente de las abundantes lluvias que se presentan especialmente en la temporada lluviosa, puesto que dependiendo de la altitud los valores promedio pueden ir desde los 700 mm hasta los 1,200 mm anuales; en este lugar no existen los cuerpos de agua permanentes, en cambio son muy frecuentes los manantiales y cascadas, la mayoría del drenaje fluvial se realiza por arroyos intermitentes, las únicas corrientes de agua superficiales que se mantienen todo el año son el río Frío el cual desciende del monte Tláloc y el arroyo Aculco el cual desciende del Iztaccíhuatl; otra de las fuentes que genera corrientes superficiales en el área de estudio provienen del deshielo de los glaciares.

Este macizo montañoso constituye un enorme parteaguas al oriente de la ciudad de México, en donde la vertiente este del volcán Iztaccíhuatl, la vertiente sureste del monte Tláloc y la mayor parte del volcán Popocatepetl pertenecen a la cuenca del río Balsas, mientras que la vertiente oeste del volcán Iztaccíhuatl, la vertiente noreste, norte y oeste del monte Tláloc, pertenecen a la cuenca de México (Escamilla, 2007).

En la parte sur de la Sierra Nevada Río Frío los escurrimientos se dirigen al río Cuautla; en la parte este las corrientes de agua son captadas por la subcuenca del río Atoyac y en el sur de la Sierra Nevada Río Frío se dirigen hacia la subcuenca del río Nexapa, en cuanto a la parte norte de la Sierra Nevada Río Frío, los escurrimientos se dirigen hacia la parte lacustre de Chalco y Texcoco. Toda esta red hídrica ha abastecido a las comunidades que se asientan en las partes bajas de la Sierra Nevada Río Frío (figura 8), además estas corrientes tienen una gran importancia en el abastecimiento de agua para las actividades agrícolas (Hernández, 1988).

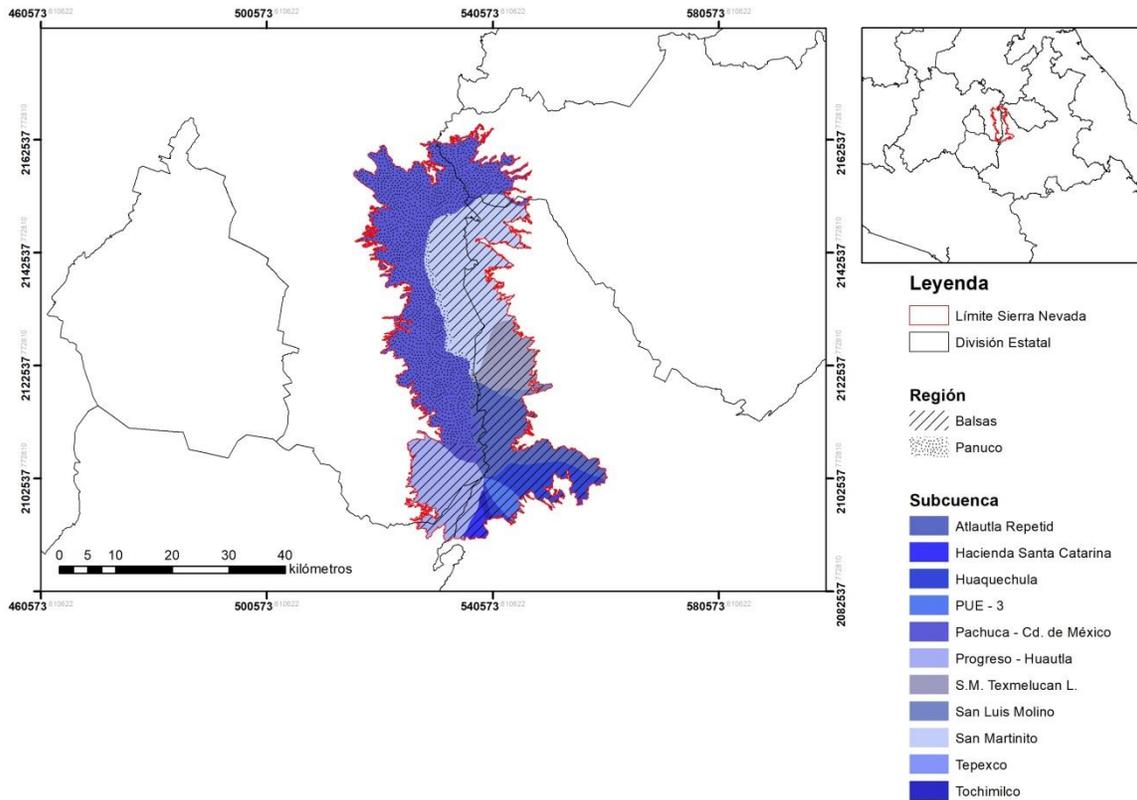


Figura 8. Límites de cuencas y subcuencas hidrológicas en la Sierra Nevada Río Frío. Fuente: INEGI 2017.

2.5 Suelos

El principal material parental que formó los suelos en el área de estudio está compuesto por rocas ígneas extrusivas de pómez, por la acumulación de cenizas volcánicas y por sedimentos, a lo largo del tiempo estos elementos tuvieron una múltiple superposición de capas, las cuales fueron sometidas a diversos procesos de intemperismo hídrico y eólico, dando origen a diversas unidades de suelo presentes en el área en estudio (figura 9) tales como:

Andosol; los cuales pueden ser tanto vítricos, húmicos mólicos y ócricos. Estos suelos tienen una gran cantidad de nutrientes, retienen una cantidad considerable de humedad y el cual es muy favorable para la recarga de mantos freáticos.

Regosol: estos suelos por lo general no tienen mucho contenido de nutrientes y materia orgánica.

Cambisol: son suelos bien desarrollados pero con poco contenido de nutrientes, aunque son una buena alternativa para el desarrollo forestal y la captación de humedad.

Entre el suelo, la topografía y la vegetación existe una estrecha relación que otorga ciertas características a los suelos, donde existen particulares asociaciones de vegetación y a determinada altura, el suelo puede presentar diversas características tanto de textura, contenido de materia orgánica, etc., por ejemplo, en asociaciones de bosques de oyamel a elevaciones de entre los 2,900 a 3,000 msnm el suelo puede contener entre un 8 al 11% de materia orgánica, mientras que en un bosque de pino entre alturas que van de los 3,400 a 3,800 msnm, el suelo puede presentar contenidos de materia orgánica de entre 2 al 8%, además de presentar algunos efectos de acción de intemperismo.

En las áreas de la Sierra Nevada Río Frío en donde la topografía presenta formas onduladas con pendientes moderadas como son el piedemonte, se presentan suelos bien desarrollados con texturas medias y gran contenido de materia orgánica, los cuales tienen un gran potencial para la producción agrícola; por ejemplo, al noroeste del Monte Tláloc en una zona de lomeríos cercana a la localidad de Santa Catarina del Monte, existen grandes zonas agrícolas en el piedemonte de esta formación montañosa. También al este del volcán Iztaccíhuatl, se han aprovechado estas pendientes moderadas para ubicar varias zonas agrícolas, algunas de ellas, cercanas a la localidad de San Andrés Hueyacatitla. Mientras que en áreas escarpadas se presentan suelos con menor desarrollo con un gran contenido de arena, los cuales tienen una gran capacidad de retener humedad (Escamilla, 2007).

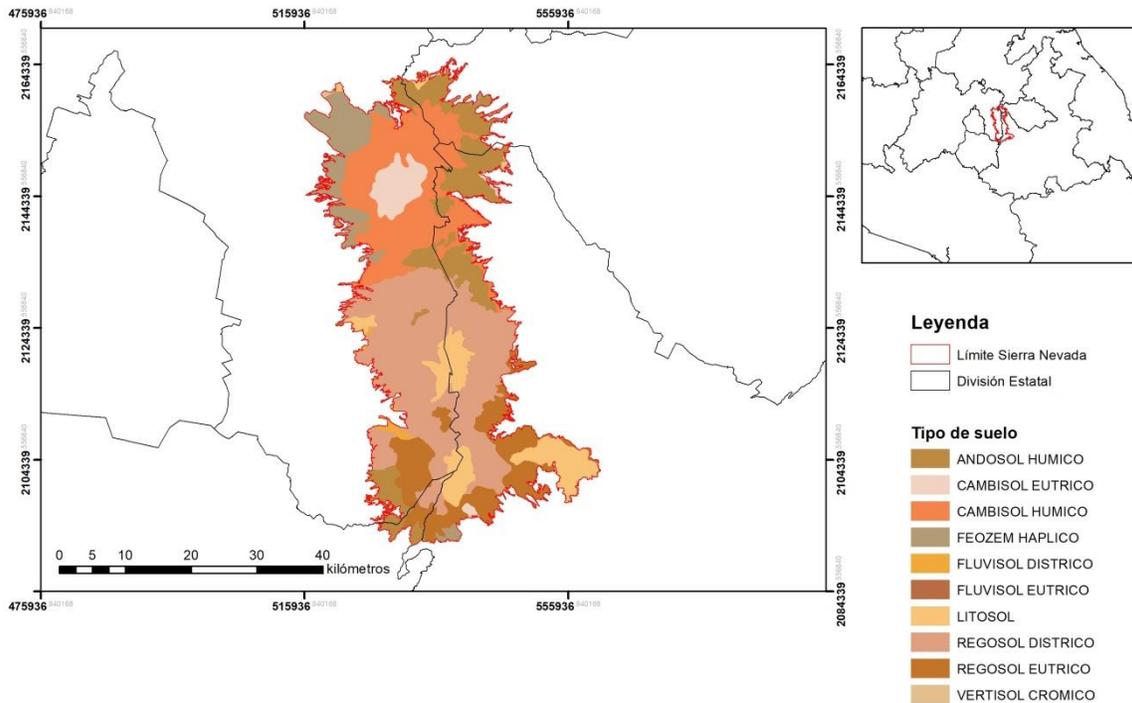


Figura 9. Tipos de suelos en la Sierra Nevada Río Frío. Fuente: INEGI 2017.

2.6 Vegetación

Algunos autores como Velázquez e Islebe (1995), citados por Muñoz (2007), mencionan que la vegetación de estas formaciones montañosas están condicionadas por diversos factores entre los cuales se pueden mencionar los climáticos y topográficos, pero también intervienen factores como los relacionados con la actividad volcánica como es el caso de los alrededores del volcán Popocatepetl, ya que los productos de la actividad volcánica tales como cenizas, gases y lava pueden alterar las condiciones ecológicas de sus laderas (Muñoz 2007). Estos factores adicionales pueden hacer que la distribución altitudinal de la vegetación no sea del todo igual a las montañas cercanas que carecen de actividad volcánica, como en este caso sería el Iztaccíhuatl y el cerro Tláloc (Muñoz, 2007). Debido a esto se da primero una breve descripción de la vegetación en los alrededores del volcán Popocatepetl.

Menciona Muñoz (2007), que los límites altitudinales de las diferentes franjas de vegetación en esta parte de la Sierra Nevada Río Frío se relacionan con la desigual distribución de nieve en las laderas norte y sur del volcán, con la distinta acumulación de ceniza en las laderas y con la presión ejercida por la actividad antrópica sobre el bosque. Estos diversos factores dieron lugar a la identificación de distintos estratos de vegetación los cuales se dividen en tres (Muñoz, 2007). Piso de piedemonte; el cual se encuentra por debajo de los 2,500 msnm y está formado en su mayoría por bosques de encinos en donde se pueden mencionar especies como *Quercus crassipes*, *Quercus castanea*, *Quercus laeta* y *Quercus centralis*, además se pueden mencionar otras especies como el pirul, el garambullo y el madroño; este estrato de vegetación es el que más se ve afectado por la presión antrópica, debido a esto es el que presenta una menor densidad de cobertura (Muñoz, 2007).

Posteriormente se encuentra el estrato medio o de transición el cual se encuentra entre los 2,500 a los 3,200 msnm, en este estrato se pueden encontrar diversas especies de pináceas como el oyamel (*Abies religiosa*), *Pinus montezumae*, *Pinus leiophylla* y el *Pinus pseudostrobus*, además de estas especies se encuentran también encinos como el *Quercus rugosa* y *Quercus mexicana*, entre otros; también se encuentran otras especies como el aile y el cuauchichie, debido a esta variedad de especies este estrato es considerado como un bosque mixto, esta parte del bosque también sufre una fuerte presión antrópica debida a la explotación de madera (Muñoz, 2007).

Después se encuentra el estrato montano el cual se sitúa entre los 3,200 y 3,400 msnm. Ahí la predominancia es de bosque de oyamel pero que también se puede encontrar mezclado con diferentes especies de pinos como el *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae*, *Pinus leiophylla* y el *Pinus pseudostrobus*, en esta estrato de vegetación los encinos y madroños se encuentra solo de forma secundaria, esta parte del bosque sufre de una menor presión antrópica pero puede ser afectada por tala o bien por incendios forestales (Muñoz, 2007).

Superando los 3,400 msnm y hasta los 3,900 msnm se encuentra el estrato superior, en donde se tiene un bosque mono específico de *Pinus hartwegii* y en donde la presión antrópica suele ser muy baja. Posteriormente se encuentra el estrato de la pradera alpina o zacatonal el cual se extiende hasta los 4,400 msnm; este se encuentra poblado por gramíneas altas y amacolladas en donde las especies principales que se encuentran son: *Muhlenbergia macroura*, *Muhlenbergia quadridentata*, *Festuca tolucensis*, *Festuca amplissima* y *Calamagrostis tolucensis* (Muñoz, 2007).

De forma similar que la anterior formación montañosa, en los alrededores del volcán Iztaccíhuatl la distribución de diferentes tipos de vegetación se conforma en tres estratos o pisos, en el primer estrato que se extiende hasta los 2,800 msnm la vegetación característica son bosques de quercus o encinares, los cuales son sumamente característicos de zonas montañosas en el país. Posteriormente, se encuentra el piso medio que va de los 2,800 a hasta los 3,400 msnm donde se encuentran los bosques de oyamel (*Abies religiosa*) así como bosques mixtos, en el cual se presentan especies como *Pinus spp*, *Abies religiosa* y *Alnus jorullensis*, después desde los 3,400 hasta los 4,000 msnm está el piso de bosque de *Pinus hartwegii*, el cual constituye el último piso forestal, por encima de ese, se encuentra el piso de zacatonales o praderas de alta montaña, en donde se presentan gramíneas amacolladas, las cuales hacen que este piso presente un aspecto bastante homogéneo (Escamilla, 2007).

El cerro Tláloc el cual se localiza al norte de la Sierra Nevada Río Frío, el primer piso se encuentra desde los 2,750 hasta los 2,950 msnm, las especies de vegetación que conforman los bosques de esta parte son los encinos y en la parte más baja se encuentra dominada por una franja de encinar arbustivo, los arbustos se presentan principalmente en laderas con una pendiente pronunciada y en barrancas, en cuanto a las especies de encino que se pueden mencionar están el *Quercus Rugosa* y *Quercus laurina*; de forma similar que las especies arbustivas, las arbóreas también tienden a crecer en laderas con pendientes pronunciadas (Sánchez y López, 2003).

En el siguiente piso el cual se extiende desde los 2,900 hasta los 3,200 msnm se encuentra constituido por bosque mixto, el cual se conforma por especies como *Abies religiosa*, *Quercus laurina*, *Arbutus xalapensis*, *Cupressus lusitanica*, entre otras. Aunque dentro de este bosque mixto se pueden presentar algunas asociaciones de bosques uniespecíficos de *Cupressus lusitanica* (Sánchez y López, 2003). Posteriormente, se encuentra el piso conformado por bosque de oyamel el cual se extiende desde los 3,100 hasta los 3,500 msnm, una de las características de la localización de esta especie es que se encuentran principalmente en las barrancas y cañadas de las laderas del cerro Tláloc (Sánchez y López, 2003).

El tercer piso que marca el límite de presencia arbórea en la parte norte de la Sierra Nevada Río Frío está conformado por bosque de pino, éste se extiende desde los 3500 hasta los 3,900 msnm, la especie que domina este estrato arbóreo es el *Pinus hartwegii* el cual tiende a crecer en lugares con pendientes moderadas a fuertes. El último piso de vegetación se encuentra de los 3,900 hasta los 4,100 msnm, en la cima del cerro, esta parte está constituido por praderas de alta montaña en la cual se localizan especies como *Agrostis tolucensis*, *Alchemilla procumbens*, *Calamagrostis intermedia*, entre otras (Sánchez y López, 2003). En cuanto a los usos del suelo en la Sierra Nevada Río Frío son en su mayoría el forestal, recreación, turismo, ganadería y agricultura (figura 10).

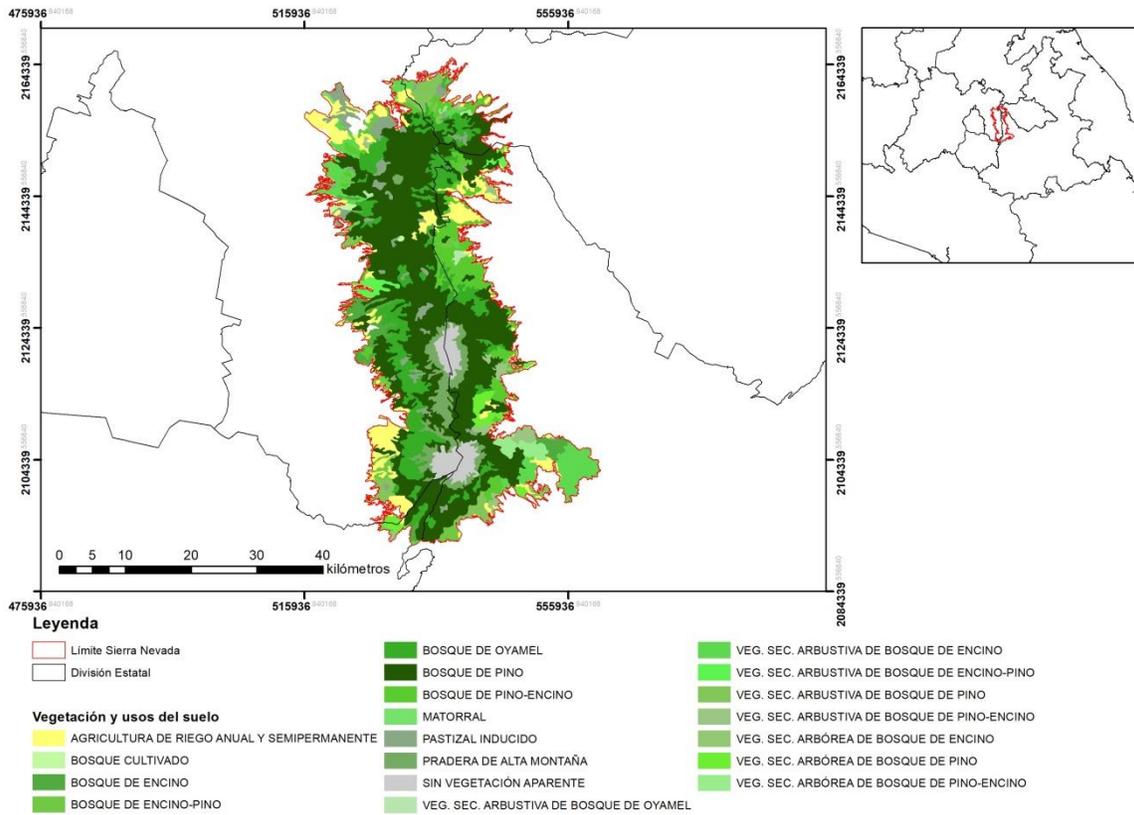


Figura 10. Tipos de Vegetación y usos del suelo en la Sierra Nevada Río Frío. Fuente: INEGI 2017.

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Recopilación de registros oficiales de incendios forestales

Se revisaron las estadísticas de incendios forestales de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Con la finalidad de identificar los años con una mayor frecuencia de incendios forestales en el área de estudio y así poder establecer un periodo de importancia para realizar la cartografía multitemporal, con el propósito de contemplar la disponibilidad de imágenes satelitales de la constelación de satélites Landsat. Otra fuente de información que fue requerida fueron los productos (MCD14DL) o puntos de calor y el producto (MCD64 A1), estos productos, aparte de servir como un registro oficial de incendios forestales, ayudarían al ajuste del índice espectral utilizado para la identificación y delimitación de las áreas quemadas (González-Alonso *et al.*, 2007).

3.2 Descarga y preprocesamiento de imágenes Landsat

Se descargaron del servidor LandsatLook Viewer 95 imágenes de los satélites Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI. Path 26 Row 47, con las cuales se abarcó un periodo de tiempo de 19 años (1998-2017). La elección de las imágenes se basó en que tuvieran una presencia de nubes menor al 20%, para poder visualizar de una manera óptima el área en estudio. Se llevó a cabo un pre-procesamiento de las mismas para poder aplicar el índice espectral adecuado que permitiera la identificación y delimitación de las áreas afectadas por incendios.

Dentro de este pre-procesamiento se llevó a cabo una corrección radiométrica la cual tiene como finalidad corregir pixeles incorrectos debidos a fallos en el sensor o bien a interferencia, existen una serie de técnicas que transforman los niveles digitales (ND) de las imágenes de satélite, dentro de estas técnicas se encuentran tratamientos de las imágenes que incluyen problemas derivados de malos funcionamientos en los sensores o bien para obtener magnitudes físicas que se requieren para obtener datos (Chuvienco, 2002).

En el caso de este estudio fue necesario convertir los ND de la imagen original a valores de reflectancia; la cual es la relación entre la energía incidente y la reflejada, los valores de la reflectancia se encuentran entre 0 y 1, los valores más cercanos a cero indican una superficie muy absorbente, mientras que los más cercanos a 1 indican una superficie muy reflectora (Chuvienco, 2002).

Esta magnitud física tiene una gran importancia en el análisis de áreas quemadas, puesto que la estructura celular de una hoja sana presenta diferentes valores de reflectancia en las diferentes longitudes de onda y los cuales son alterados por el fuego. La corrección geométrica ya no fue necesaria, pues las imágenes descargadas tienen un nivel de procesamiento L1, el cual incluye la corrección geométrica. Dicho lo anterior se procedió a realizar tal transformación de ND a valores de reflectancia, con ayuda del software ENVI 5.2, con lo cual se tuvieron disponibles las imágenes satelitales en valores de reflectancia. Y para las imágenes de los canales térmicos se transformaron los valores de ND a temperatura de brillo.

Una de las problemáticas en la realización de este estudio, fue la obtención de las suficientes imágenes satelitales que abarcaran en lo posible la temporalidad elegida, puesto que muchas de las imágenes tenían un gran porcentaje de la superficie cubierta por nubes, lo que imposibilitaría la aplicación de los índices espectrales, por lo que fue necesario buscar la mayor cantidad de imágenes libres de nubes. Gran parte de estas imágenes provendrían del sensor ETM+ solo que las imágenes adquiridas por este sensor implicaría otro problema a ser resuelto, este es un fallo que se presentó en el corrector de líneas escaneadas (SLC) por sus siglas en inglés (figura 11), el 31 de mayo de 2003; el cual provocó que las imágenes de este sensor presentaran franjas de datos inválidos denominados “gaps”, originadas por un patrón en zig-zag a lo largo de la trayectoria de tierra del satélite ocasionadas por la falta de operatividad de dicho mecanismo (USGS, 2018).

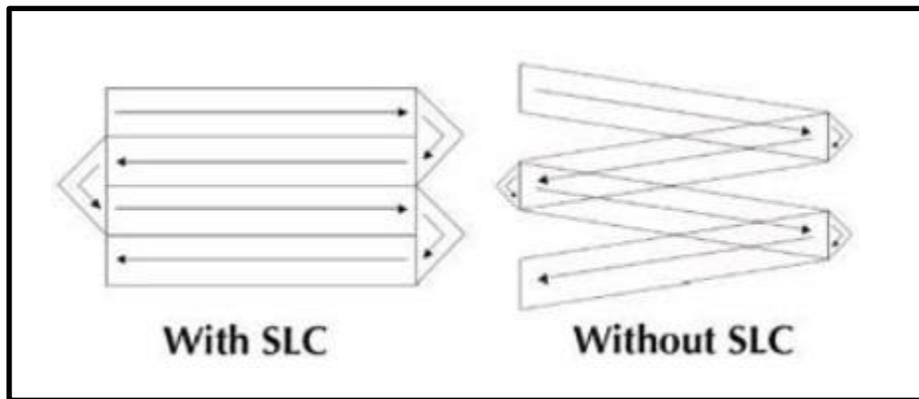
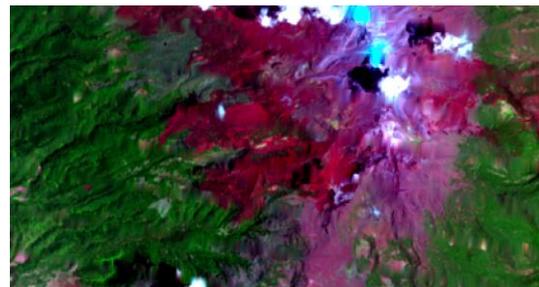
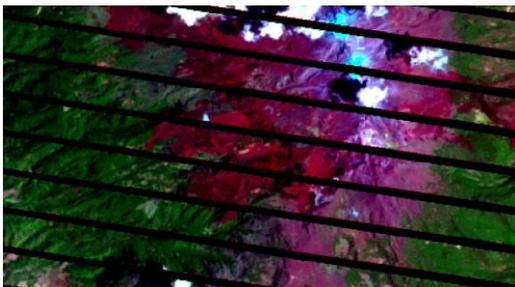


Figura 11. Representación de fallas en el corrector de líneas escaneadas (SLC off) en el satélite Landsat 7 ETM+. Fuente: USGS, 2018.

Debido a que ese bandeo representa información perdida, el proceso que se utilizó consistió en el mejoramiento visual de las imágenes para su interpretación (figuras 12 y 13); se utilizó la extensión gap fill del software ENVI 5.2 el cual calcula los valores de los pixeles vecinos y rellena estas bandas negras en función de los cálculos efectuados (USGS, 2018). Este proceso está basado en el fenómeno de la auto-correlación espacial, el cual menciona que las variables geográficas presentan una fuerte asociación en función de su cercanía. En este caso la variable sería la radiancia que proviene de ciertas áreas de la superficie, dichas áreas estarán relacionadas positivamente con radiancias de parcelas vecinas. Debido a esto, este proceso estima los valores de ND de los pixeles vecinos para “rellenar” las bandas de pixeles perdidos (Chuvieco, 2002).



Figuras 12 y 13. Imagen Landsat 7 ETM+ con la falla SLC off (izquierda). Imagen Landsat 7 ETM+ corregida (derecha).

Como se había mencionado anteriormente fue necesario adquirir dos productos que apoyarían al ajuste de los umbrales del índice y a la validación. El primero de ellos fue adquirido en el servidor del Sistema de Información de Incendios para el Manejo de Recursos (FIRMS) por sus siglas en inglés, del cual se descargó el producto MCD14DL este consiste en una serie de datos en formato SHP conocidos como puntos de calor, los cuales fueron descargados del servidor EARTHDATA, este producto consiste en una serie de registros de anomalías térmicas, los cuales muestran la ubicación y la fecha de puntos de calor asociados a fuego (FIRMS, 2018).

El segundo producto es el MCD64 A1, el cual consiste en una serie de datos combinados de los sensores Aqua y Terra del satélite MODIS, los cuales contienen información de áreas quemadas por pixel en una resolución espacial de 500 m además de tener la fecha en días julianos en la que fueron registradas las áreas quemadas. Esta información fue obtenida del servidor del USGS de la NASA.

Antes de la aplicación del índice, se procedió a realizar una máscara a las imágenes satelitales con la finalidad de dejar únicamente coberturas de vegetación (bosques, pastizales, vegetación secundaria y praderas de alta montaña), esto debido a que uno de los objetivos de este estudio es realizar la estimación de la superficie total quemada de vegetación en un periodo de tiempo de 19 años (González-Alonso *et al.*, 2007). Esta máscara se construyó con la información vectorial del uso de suelo y tipo de vegetación del INEGI serie 5, información que fue obtenida del servidor de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

3.3 Generación de índice de área quemada BAI

Posteriormente, se procedió a aplicar el índice espectral para la identificación de las áreas quemadas. En general se podría decir que los índices espectrales son combinaciones de bandas espectrales (distintas longitudes de onda del espectro electromagnético) que son registradas por los sensores remotos, y tienen la función principal de realzar ciertas señales o respuestas espectrales de las distintas cubiertas en la superficie de la Tierra, así

como el de disminuir los efectos provocados por la atmósfera, o bien dicho de otro modo, se trata de imágenes que son calculadas por medio de operaciones algebraicas a partir de distintas bandas espectrales; existe una gran variedad de índices espectrales para la discriminación de áreas quemadas, pero el que fue utilizado en este caso fue el índice BAI (Burn Area Index); el cual se basa en la distancia establecida entre cada pixel y un valor espectral de referencia en el cual las áreas recientemente quemadas tienden a converger (Martin y Chuvieco, 1998). Este índice está definido de la siguiente forma:

$$BAI = \frac{1}{(pcRED - \rho RED)^2 + (pcNIR - \rho NIR)^2}$$

Dónde: $pcRED = 0.1$ y ρRED = reflectancia de cada pixel en la banda roja

$pcNIR = 0.06$ y ρNIR = reflectancia de cada pixel en la banda del infrarrojo cercano

El cómputo de dicho índice espectral se realizó con el software ENVI 5.2, mediante la herramienta Band Math, la cual es una herramienta de procesamiento de imágenes y con la cual se pueden asignar variables a las bandas de una imagen satelital. Para la delimitación de las superficies quemadas identificadas con el índice antes mencionado, era necesario establecer un umbral que separara los pixeles pertenecientes a superficies quemadas y no quemadas, pero, debido a que este índice espectral depende mucho de la radiometría de cada imagen la cual se puede ver afectada por diversas condiciones atmosféricas y por lo cual el intervalo dinámico del mismo puede variar considerablemente de un año a otro no se recomendaba establecer un umbral fijo que separara los pixeles quemados de los no quemados para todas las imágenes (Martin y Chuvieco, 1998); esta situación es la que se presentó en este trabajo, puesto que el intervalo de años analizado es muy amplio (19 años).

Por lo tanto se decidió ajustar el umbral del índice por medio de un análisis visual de las imágenes con una composición de falso color, este proceso consiste en asignar los valores de reflectancia de una banda concreta a uno de los tres colores primarios (rojo, verde y azul), de tal forma que si los valores de reflectancia de una banda son muy elevados, esta

tendrá el color que se le aplique (Pérez Cabello y De la Riva Fernández, 1998). Una de las combinaciones que más se recomiendan para la detección de superficies quemadas, es la 7, 4, 3; en dicha combinación de falso color se asigna la banda 7 (SWIR) al canal rojo, la banda 4 (NIR) al canal verde y la banda 3 (segmento rojo del espectro visible) al canal azul (figura 14).

Con este método es posible observar las superficies quemadas en un color rojo escarlata y magenta (figura 15), que contrastan considerablemente de áreas de vegetación adyacentes que se observan en color verde, esto ocurre debido a que al ser afectada la vegetación por el fuego provoca un aumento de reflectancia en la longitud de onda perteneciente al SWIR, mientras que en las otras dos regiones del espectro (NIR y Rojo) se presenta una disminución de reflectancia (Pérez Cabello y De la Riva Fernández, 1998). De esta forma se identificaron las superficies quemadas y se eligieron los valores del umbral del índice BAI que permitirían la delimitación de las superficies quemadas separando los píxeles que pertenecían a superficies quemadas de las no quemadas.



Figura 14. Segmento de imagen Landsat TM 5 del 20 de febrero de 1998, con una composición de falso color (7, 4, 3) donde se aprecia parte de la cubierta forestal sin haber sido afectada por un incendio forestal.



Figura 15. Segmento de imagen Landsat TM 5 del 9 de abril de 1998, con la composición de falso color (7, 4, 3) en donde se aprecian las cicatrices de quemado en color rojo escarlata y magenta provocadas por un incendio forestal. Incluso con esta combinación de falso color es posible apreciar el fuego en color naranja-rojizo.

El resultado de la aplicación del índice a las imágenes Landsat fue otra imagen en escala de grises en la cual las superficies quemadas eran resaltadas de color blanco, por lo cual se podía diferenciar de otras coberturas, presentando dichas superficies valores del índice BAI muy elevados, aunque con ayuda de un análisis visual de la imagen en composición de falso color 7,4,3 se pudo observar que áreas con sombras que se forman debido a la topografía, también presentaban valores elevados del índice BAI como se puede observar en la siguiente imagen (figura 16), la cual es el resultado del cómputo del algoritmo y es el mismo segmento de la imagen anterior.

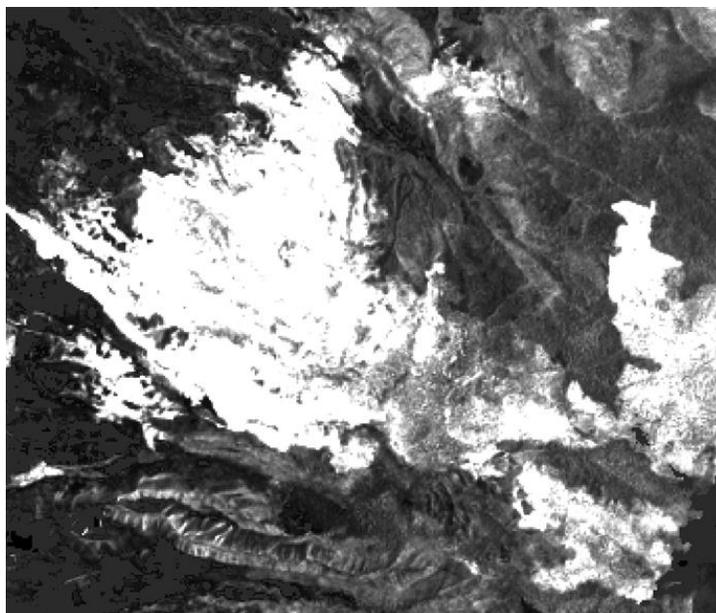


Figura 16. Aplicación del índice BAI a una imagen Landsat TM 5 del 9 de abril de 1998, las áreas más brillantes son superficies quemadas, lo que permite su identificación y separación de otras cubiertas que no fueron afectadas por incendios forestales.

3.4 Validación de los polígonos de áreas quemadas

Aplicado el índice BAI a las imágenes multiespectrales se obtuvieron a partir de estas otras imágenes en escala de grises en las cuales el índice ya había hecho una delimitación automática de las áreas quemadas, dichas superficies identificadas fueron convertidas a formato shape con el software ENVI 5.2, estas capas vectoriales contenían polígonos que demarcaban las áreas que posiblemente habían sido afectadas por incendios forestales, para asegurarse que estos polígonos fueran áreas quemadas, se emplearon los puntos de calor anteriormente mencionados y verificar si coincidían con los polígonos creados mediante el índice BAI (González-Alonso *et al.*, 2007), de igual forma fue utilizado el producto MCD64 A1, el cual fue sobrepuesto a las capas vectoriales creadas a partir del índice.

Otro criterio que se utilizó para asegurarse que los polígonos delimitados con BAI fueran áreas afectadas por fuego consistió en obtener la firma espectral de las superficies quemadas en las cuales sí caían puntos de calor y compararlas con la firma espectral de

superficies quemadas que no coincidieran con puntos de calor, además de obtener la firma espectral de esos mismos sitios pero de una imagen pre incendio para observar los cambios en el comportamiento espectral. Este último criterio utilizado, se basa en el comportamiento espectral de la vegetación que fue afectada por fuego, puesto que recordando lo mencionado con anterioridad, la vegetación quemada tendría que presentar una firma espectral con una reflectancia distinta a la de la vegetación sana debido a la deposición de carbón, al daño en la estructura celular de las hojas y a la pérdida de humedad (Martin y Chuvieco 1998; De Santis y Vaughan, 2009) y por lo tanto las firmas espectrales de dos áreas que fueron afectadas por fuego, tendrían que tener un comportamiento espectral similar.

Para realizar el análisis de la firma espectral de superficies quemadas se utilizó el software ENVI Classic 5.2, el cual permite construir la firma espectral por medio de imágenes satelitales, primero se identificaban las áreas quemadas que no presentaban puntos de calor en su interior y las áreas que sí los contuvieran, luego se buscaba una imagen pre incendio la cual no estuviera muy alejada a la fecha de quema, posteriormente, se realizó un enlace geográfico para tener la certeza que se trataba del mismo lugar y se procedía a obtener la firma espectral de dicha superficie en ambas imágenes (imagen pre incendio y la imagen post incendio).

En este sentido se esperaba tener dos tipos de comportamiento espectral de la vegetación quemada, dependiendo de la cercanía de la toma de la imagen post incendio a la fecha de la quema y de la intensidad que el fuego haya tenido, en la cual la señal del carbón y la ceniza serían más fuertes si la imagen fue tomada poco tiempo después del incendio, por lo que estos elementos producirían una absorción de energía muy fuerte causando bajos valores de reflectancia en el canal del visible, y un segundo comportamiento sería cuando la imagen satelital haya sido tomada varios días después de la fecha de quema, en la cual la ceniza y carbón han desaparecido a consecuencia de agentes físicos como la lluvia, pero que el daño a la estructura celular de la planta producido por el fuego permanece, y en el cual se presentarían una mayor reflectancia en el canal del visible, en los canales del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio se esperaba tener en las superficies quemadas

analizadas una baja reflectancia y un aumento de la misma respectivamente, en ambas situaciones (Pereira *et al.*, 1999; Martin y Chuvieco, 1998).

Habiendo hecho el proceso anterior era necesario comprobar el grado de precisión de la información espacial que se había creado mediante una imagen de mayor resolución espacial que permitiera identificar con mayor exactitud los límites de las áreas quemadas delimitadas (Morrisette *et al.*, 2006; Chuvieco *et al.*, 2008), para lo cual se emplearon las imágenes del sensor ASTER debido principalmente a que cuenta con una mayor resolución espacial que los sensores de los satélites Landsat. Para conocer la precisión de dicha información espacial se procedió a realizar la medición de la confiabilidad de las delimitaciones que se habían obtenido con el índice BAI, para esto se utilizó una matriz de confusión que permitió obtener la evaluación de la confiabilidad de la cartografía realizada de las superficies quemadas.

Esta evaluación de confiabilidad consiste principalmente en realizar una comparación de la información creada con alguna información de referencia que se considere muy confiable, la cual generalmente se obtiene de mapas temáticos, de muestreos en diversos sitios de verificación o de imágenes con una mayor resolución espacial (Mas *et al.*, 2003), en este sentido lo que se realizó fue una confrontación entre los polígonos delimitados con el índice BAI y polígonos digitizados mediante un análisis visual de imágenes ASTER que tenían una composición de falso color 1, 3N, 2, combinación que permitió identificar las superficies quemadas con un mayor detalle, estos polígonos creados a partir de las imágenes ASTER serían tomados como la información de referencia que representaría la “verdad” en terreno, por lo que la confrontación o el cruce de dichos polígonos permitirían evaluar la confiabilidad del mapa de áreas quemadas creado, obteniendo la precisión global, los errores de omisión y comisión, y el índice Kappa (Congalton y Green 1993; Manzo-Delgado y López, 2013).

Para hacer dicha validación se eligieron tres incendios del año 2003 identificados en una imagen ASTER con fecha del 01-mayo-2003 los cuales fueron digitizados mediante una interpretación visual, y el cruce de información se realizó con los polígonos obtenidos de

forma automática mediante el índice BAI a partir de una imagen Landsat con fecha del 17-mayo-2003; un incendio del año 2006 el cual fue identificado en una imagen ASTER con fecha del 03-marzo-2006, en la cual se realizó el mismo procedimiento que en la imagen del 2003, el cruce de información se aplicó a los polígonos obtenidos del índice BAI a partir de una imagen Landsat con fecha del 15-marzo-2006; y el último incendio se validó en una imagen ASTER con fecha del 24-abril-2009, siguiendo el mismo procedimiento, y el cruce de información fue con polígonos obtenidos a partir de una imagen Landsat con fecha del 15-abril-2009.

3.5 Cartografía de áreas quemadas

Una vez convertidas en formato vectorial las superficies delimitadas por el índice espectral, habiendo realizado la validación que se trataban de superficies quemadas y evaluado la confiabilidad del mismo, se procedió a realizar la cartografía multitemporal de las áreas quemadas, esto básicamente consistió en hacer una suma de los polígonos obtenidos por cada mes de cada año para que se obtuviera el total de superficie quemada anual del periodo de tiempo elegido (1998-2017), para lo cual se utilizó el software ArcGis 10.1, dicha suma de superficies se realizó mediante una combinación del conjunto de datos espaciales creados por mes en uno solo, para cada año analizado, este procesamiento permitió fusionar las superficies quemadas de los meses de mayor frecuencia (marzo-junio) en un solo archivo SHP, el cual contiene la sumatoria total de superficies quemadas para cada año (figura 17 y 18).

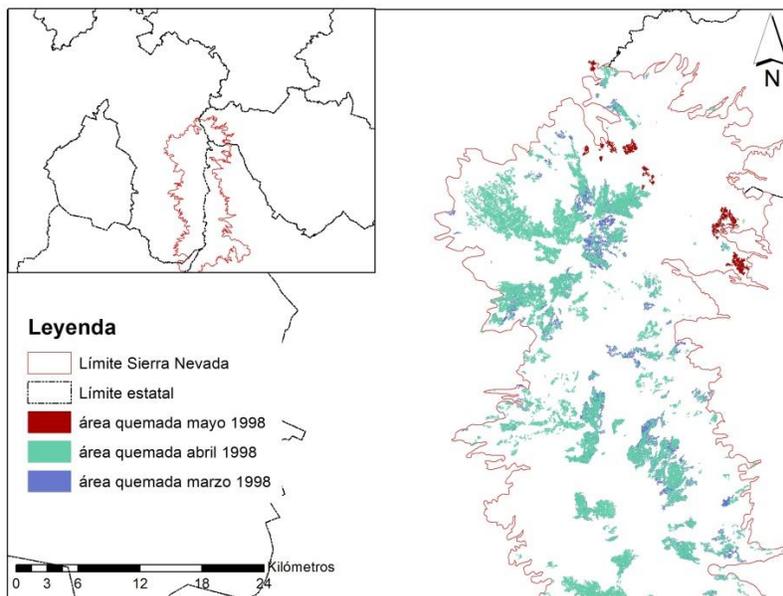


Figura 17. Suma de áreas quemadas.

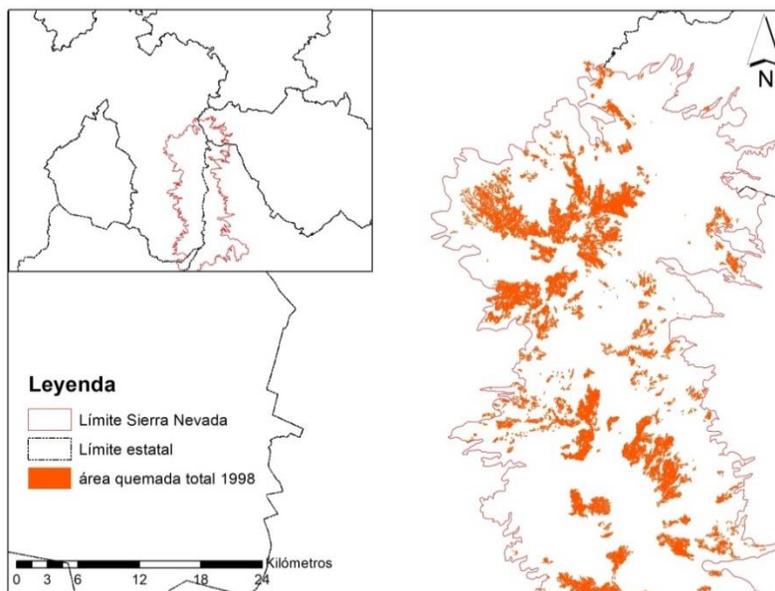


Figura 18. Total de áreas quemadas por año

El siguiente paso fue elegir la mínima unidad cartografiable en el mapa temático, el cual permitiera mostrar con claridad la distribución espacial de las áreas quemadas así como de la frecuencia de las mismas en el periodo de tiempo analizado, la definición de la mínima unidad cartografiable es de gran importancia porque en ésta se define si algún objeto será representado en el mapa final como un área, generalmente se menciona en la literatura que la unidad mínima cartografiable no sea menor a los 4 mm² (Lencinas y Siebert, 2009).

Primero se había hecho un mapa preliminar a escala 1:400,000 en el cual se mostraba toda la Sierra Nevada Río Frío, pero la unidad mínima cartografiable (UMC) a esa escala era de 200 ha, lo que dejaba fuera una gran cantidad de polígonos, por lo que se decidió hacer un mapa de áreas quemadas para cada formación montañosa a escala 1:150,000 con lo que las superficies quemadas más pequeñas podrían ser incluidas en el mapa temático, a esta escala cartográfica, la unidad mínima cartografiable admitía representar objetos de hasta 9 ha (figura 19), esto permitió incluir en la cartografía temática final áreas quemadas de dimensiones considerables, mientras que las inferiores a estas dimensiones sólo se cuantificarían y mencionaran en los resultados.

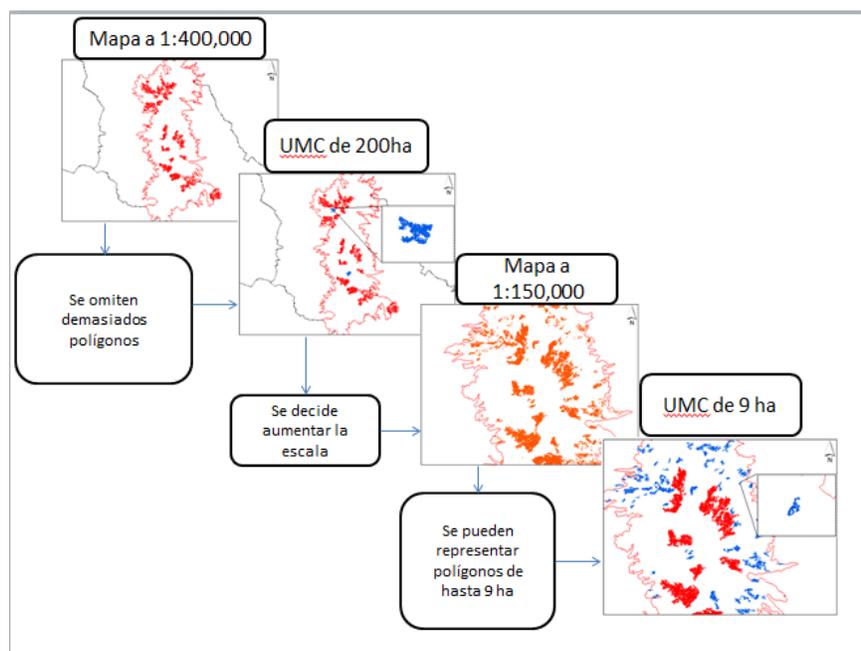


Figura 19. Elección de la escala y unidad mínima cartografiable.

3.5 Análisis comparativo de áreas quemadas y cambio de densidad de cobertura forestal

Para llevar a cabo este análisis comparativo se procedió a realizar un cruce de información vectorial entre los polígonos de áreas quemadas delimitadas mediante el índice BAI y una capa en formato SHP que fue proporcionada por el Dr. José López García del instituto de Geografía UNAM, la cual contiene la información de la densidad de cobertura forestal que presentaba la Sierra Nevada Río Frío en el año 1994 y la que presentaba en el año 2015, la información de la densidad de cobertura forestal esta etiquetada según cinco categorías las cuales van de una cobertura completamente cerrada (>75%) hasta la categoría de deforestado (<10%). Además contiene un índice que permite establecer una evaluación del tipo de cambio que se presentó en el área en estudio, dicho índice se puede dividir en dos categorías: pérdidas en donde se tienen cuatro grados de alteración las cuales van de una pérdida baja (1) a muy alta (4); e incremento en donde se tienen cuatro grados de recuperación los cuales van de bajo (8) a muy alto (5); por ejemplo si un polígono tenía en 1994 una densidad de cobertura cerrada (>75%) y en el año 2015 presentó una densidad semicerrada (51-75%) está se consideraría una pérdida baja (López-García, 2007), esta información permite observar si las áreas quemadas delimitadas coinciden con superficies que hayan presentado cambios de densidad de cobertura forestal. (Tabla 4).

Tabla 4. Información contenida en la capa vectorial de cambio de densidad de cobertura forestal (1994-2015). Fuente: López-García, 2007.

Categoría	Densidad de cobertura forestal	Índice de cambio		
		Tipo de cambio	Pérdida	Incremento
		Grado de cambio	Clave	
Cerrada	>75%	Baja	1	8
Semicerrada	51-75%	Media	2	7
Semiabierta	26-50%	Alta	3	6
Abierta	10-25%	Muy alta	4	5
Deforestado	<10%			

Teniendo esta información se procedió a unir en un solo archivo SHP ambas capas vectoriales (áreas quemadas y cambio de densidad de cobertura forestal) con el software ArcGis 10.1 y buscar por medio de consultas lógicas aquellos polígonos que hubieran sido afectados por incendios en varios años, que fueran mayores a 10 ha y que presentaran un cambio en su densidad de cobertura forestal. Con este tipo de búsqueda es posible aislar los polígonos que reunieran los requisitos deseados, ya que por medio de una expresión lógica dada al software este los separa del resto permitiendo así realizar el análisis, pues la organización de datos espaciales en un sistema vectorial crea una forma particular de pensar el espacio geográfico, la cual considera que las entidades espacializadas tienen atributos propios que les brindan una identidad (Buzai, 2013).

Habiendo aislado los polígonos de interés se procedió a evaluar la severidad del incendio para así conocer que intensidad tuvieron en dichas áreas de interés y en las cuales se hayan presentado cambios de densidad de cobertura (pérdida o incremento) puesto que se menciona que los incendios con una alta intensidad pueden llegar a eliminar gran parte o casi la totalidad de la cubierta forestal, propiciando una recuperación lenta de la vegetación (Botella-Martínez *et al.*, 2017).

La evaluación de la severidad del incendio comienza con el uso de otro índice espectral llamado Normalized Burn Ratio (NBR), este fue desarrollado por Hunt & Rock en 1989, el cual pretende estimar la severidad de los incendios forestales, mediante el empleo del contraste entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) ya que esta banda es sensible al contenido de agua en la vegetación y la banda en el infrarrojo de onda corta (SWIR) la cual es sensible a la detección de vegetación sin actividad fotosintética (Navazo-Arenas *et al.*, 2015). Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$NBR = \frac{(p_{i,IRC} - p_{i,SWIR})}{(p_{i,IRC} + p_{i,SWIR})}$$

Dónde: $p_{i,IRC}$ es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (NIR)

$p_{i,SWIR}$ es la reflectancia en la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR)

Para obtener la severidad del incendio es necesario establecer una medida cuantitativa del grado de cambio en las áreas quemadas que ocurrió desde el momento anterior al incendio hasta el momento posterior al incendio, para lo cual es necesario aplicar el índice NBR a una imagen post-incendio y a una imagen pre-incendio a la cual se le restará el resultado del NBR de la imagen post-incendio, esta operación se conoce como Delta NBR o dNBR (Difference Normalized Burn Ratio). El dNBR se calcula de la siguiente forma:

$$dNBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire}$$

La operación anterior da como resultado una imagen en escala de grises con un rango de valores continuos, los cuales oscilan entre -2000 a +2000 DNBR, las áreas que se encuentran quemadas caen en valores de entre +100 a +1300, de estos se pueden establecer umbrales que muestran los diferentes grados de severidad con los que fue afectada la vegetación. Los umbrales que se recomiendan establecer en la literatura se muestran en la tabla 5 (Key y Benson 2006).

Tabla 5. Umbrales para mapear la severidad de un incendio forestal. Fuente: Key Benson, 2006.

Nivel de severidad	Intervalo del <i>dNBR</i>
Rebote alto	-500 a -251
Rebote bajo	-250 a -101
No quemado	-100 a +99
Severidad baja (B)	+100 a +269
Severidad moderada-baja (MB)	+270 a +439
Severidad moderada-alta (MA)	+440 a +659
Severidad alta (A)	+660 a +1300

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

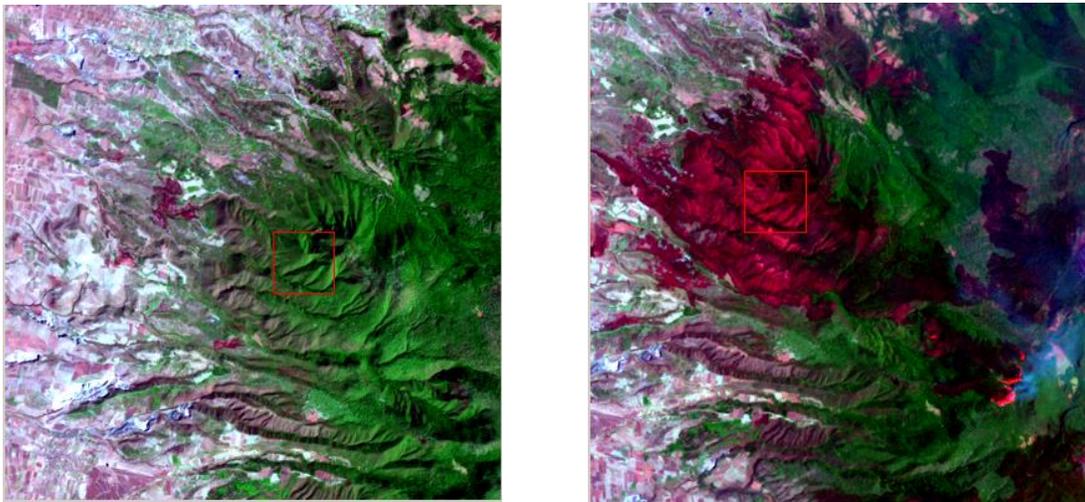
4.1 Validación de polígonos de áreas quemadas

Al hacer la revisión de los polígonos creados por medio del índice BAI y con ayuda de una composición de falso color 7, 4, 3 en las imágenes Landsat, se pudo observar la aparición de errores asociados principalmente a zonas en donde había sombras como en el caso de laderas y en imágenes con presencia de sombras de nubes, debido en parte a la baja reflectancia en el canal del visible que presentan las superficies con sombra. También se pudo observar que algunas áreas quemadas no coincidían con los puntos de calor, pero que sí presentaban el color rojo escarlata característico de un área quemada visto con la composición de falso color mencionada anteriormente (Figura 20).



Figura 20. Áreas quemadas delimitadas con BAI (líneas rojas) en el Monte Tláloc, en la más grande coinciden puntos de calor (puntos amarillos), pero en las dos más pequeñas en la parte inferior de la imagen no coinciden puntos de calor, se pueden apreciar también una serie de errores asociados a lugares con sombras.

El resultado de analizar la firma espectral de áreas quemadas en las cuales se presentaron puntos de calor y compararlos con las que no los presentaban (figuras 20 y 21), permitió incluir áreas que si habían sido afectadas por fuego, pues como se mencionó anteriormente el comportamiento de sus firmas espectrales era muy similar; en la banda del espectro visible se podía apreciar como la reflectancia aumentaba; debido a la pérdida de pigmentos que se encargan de absorber energía en estas longitudes de onda, en la banda del infrarrojo cercano (NIR) se presentaba una disminución de reflectancia y en la banda del infrarrojo de onda corta se presentaba un aumento de reflectancia (figura 20). De igual forma se comprobó que el comportamiento espectral de la vegetación posterior al paso del fuego era completamente distinto al de la vegetación que no había sido afectada por fuego.



Figuras 20 y 21. Imágenes pre incendio (20-febrero-1998, derecha) y post incendio (09-abril-1998, izquierda) enlazadas geográficamente mediante el software ENVI 5.2 para la toma de la firma espectral de la superficie quemada y no quemada, el recuadro rojo delimita la misma superficie en ambas imágenes, se puede observar incluso que en la parte inferior derecha de la imagen post incendio, el incendio sigue activo.

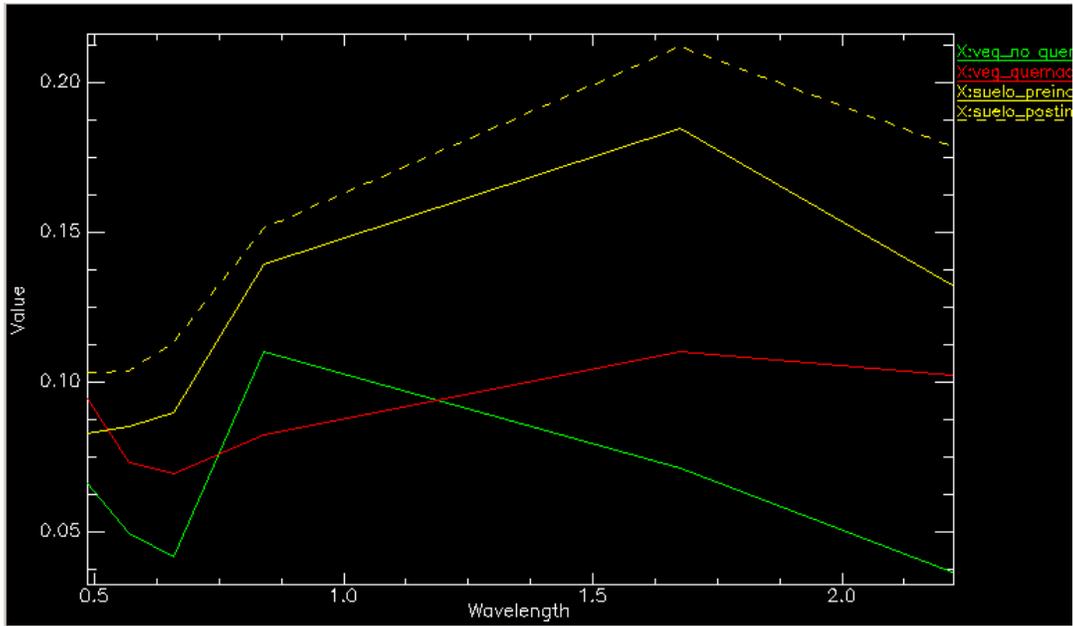
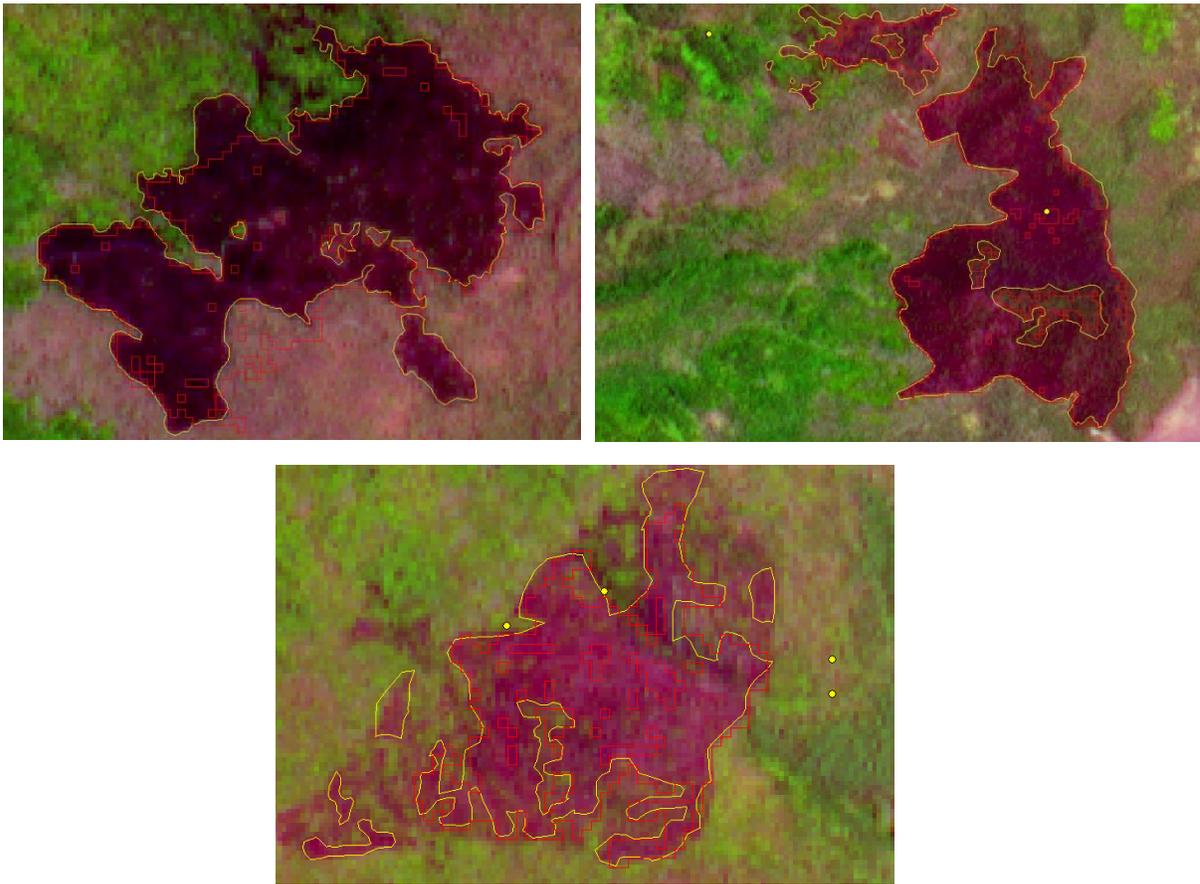


Figura 22. Firma espectral de la vegetación de ambas imágenes, la línea verde representa el comportamiento de vegetación sana, la línea roja representa el comportamiento espectral de vegetación afectada por fuego, la línea amarilla sólida representa el comportamiento espectral del suelo de la imagen pre incendio y la punteada el comportamiento espectral del suelo de la imagen post incendio. Se puede ver como el comportamiento de la vegetación quemada es similar a lo mencionado por Martin y Chuvieco 1998; De Santis y Vaughan 2009; Pérez Cabello y De la Riva Fernández, 1998.

En total se validaron cinco áreas quemadas para medir el grado de precisión de la cartografía creada, de las cuales se obtuvieron la precisión global, la cual fue superior al 90%, los errores de omisión (áreas quemadas omitidas) y comisión (áreas que no estaban quemadas y fueron clasificadas como tal) tuvieron valores bajos y el índice Kappa mostró valores superiores a 0.70, lo que indicó un grado aceptable de precisión entre los polígonos delimitados en las imágenes ASTER y los obtenidos de forma automática con el índice BAI. En las figuras 23 a 27 se muestran las superficies quemadas seleccionadas y en las tablas 6 a 10 se muestran las matrices de confusión para cada año validado.

01-mayo-2003



Figuras 23, 24 y 25. Superficies quemadas seleccionadas para la validación de la información espacial creada con el índice BAI. Las líneas amarillas son los polígonos hechos a partir de una imagen ASTER, las líneas rojas son los polígonos de las superficies quemadas hechos de forma automática a partir de una imagen Landsat, los puntos amarillos son incendios activos identificados por el sensor MODIS.

3-marzo-2006

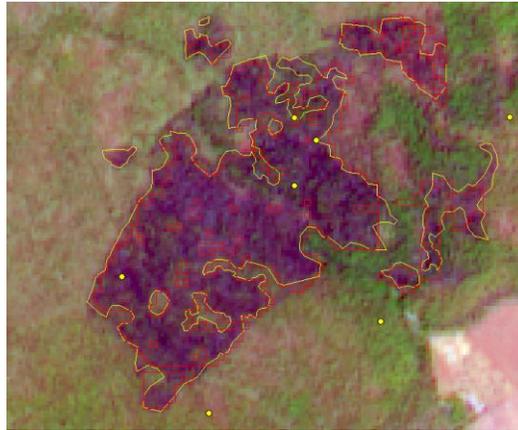


Figura 26. Superficie quemada del año 2006 seleccionada para validar la información espacial creada a partir del índice BAI. Las líneas amarillas son la delimitación de la superficie quemada hecha a partir de una imagen ASTER mediante un análisis visual, las líneas rojas representan la delimitación hecha de forma automática con el algoritmo a partir de una imagen Landsat, los puntos amarillos son incendios activos identificados por el sensor MODIS.

24-abril-2009

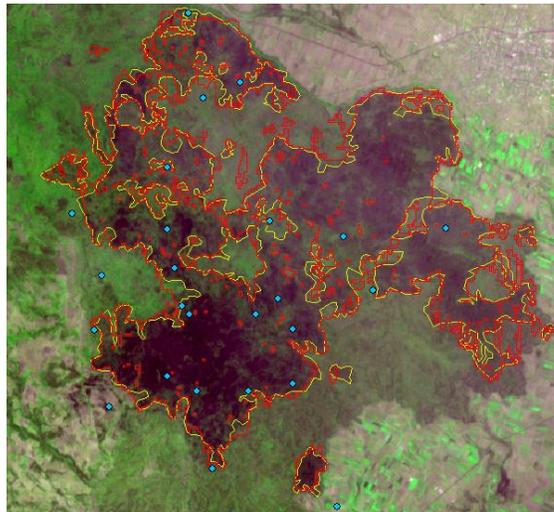


Figura 27. Superficie quemada seleccionada del año 2009 para la validación de la información creada, las líneas amarillas representan la delimitación de superficies quemadas hechas mediante un análisis visual a partir de una imagen ASTER (24-abril-09), las líneas rojas representan la delimitación de superficies quemadas hechas de forma automática mediante el índice BAI (15-abril-09), los puntos azules representan incendios activos detectados por el sensor MODIS.

01-mayo-2003

	BAI			
ASTER		No quemado	Quemado	Total
	No quemado	261.36	8.58	269.93
	Quemado	17.95	48.84	66.79
	Total	279.30	57.42	336.72
Precisión global: 92.13% Errores de omisión: 14.93% Errores de comisión: 26.87% Índice kappa: 73.85				

	BAI			
ASTER		No quemado	Quemado	Total
	No quemado	880.73	19.09	899.83
	Quemado	23.07	194.20	217.27
	Total	903.81	213.29	1117.11
Precisión global: 96.22% Errores de omisión: 8.90% Errores de comisión: 10.62% Índice kappa: 87.87%				

	BAI			
ASTER		No quemado	Quemado	Total
	No quemado	243.95	13.46	257.41
	Quemado	21.32	120.81	142.14
	Total	265.27	134.28	399.55
Precisión global: 91.29% Errores de omisión: 10.03% Errores de comisión: 15.00% Índice kappa: 80.77%				

Tablas 6, 7 y 8. Matrices de confusión para la validación de tres áreas quemadas identificadas en una imagen ASTER del año 2003.

03-marzo-2006

	BAI			
ASTER		No quemado	Quemado	Total
	No quemado	385.49	13.36	398.86
	Quemado	23.81	106.06	129.87
	Total	409.31	119.42	528.74
Precisión global: 92.97% Errores de omisión: 11.19% Errores de comisión: 18.34% Índice kappa: 80.50%				

Tabla 9. Matriz de confusión para la validación de un área quemada identificada en una imagen ASTER del año 2006.

24-abril-2009

	BAI			
ASTER		No quemado	Quemado	Total
	No quemado	4106.74	265.48	4372.22
	Quemado	145.97	1577.63	1723.61
	Total	4252.71	1843.11	6095.83
Precisión global: 93.25% Errores de omisión: 14.40% Errores de comisión: 8.47% Índice kappa: 83.70%				

Tabla 10. Matriz de confusión para la validación de un área quemada identificada en una imagen ASTER del año 2009.

En cuanto a los errores de comisión que se tuvieron se pudo observar que están muy relacionados con la presencia de sombras ya sean las que se proyectan en las laderas de las distintas topoformas, en barrancas y las proyectadas por nubes, y con carreteras; en cuanto a los errores de omisión se observa que tienen una relación con la ocurrencia de los incendios y la toma de la imagen, puesto que en muchos de los años analizados los incendios habían ocurrido diez o más días antes de la toma de la imagen satelital, por lo que la señal de carbón y ceniza se fue perdiendo; esto se pudo observar en una de las superficies quemadas validadas en la imagen ASTER del año 2003, en la cual la fecha de adquisición fue más cercana a varios incendios ocurridos entre los días 21 al 25 de marzo que la fecha de adquisición de la imagen Landsat, en la cual la delimitación del índice BAI es más reducida.

También se observaron varios errores de comisión en la imagen del año 2009, en la cual se presenta una diferencia en la cantidad de superficie delimitada por BAI a partir de una imagen Landsat y la delimitada por ASTER, mientras el primero arrojaba una superficie quemada total de 1843.11 ha, la segunda arrojaba un total de 1723.64 ha; las fechas de los incendios ocurridos en esta área fueron en los últimos días de marzo (21-25 marzo), por lo que se infiere que al estar la imagen Landsat más próxima a la fecha de quema, ésta delimitó una mayor cantidad de superficie ya que la señal espectral de la superficie quemada era más intensa que una semana después en la que fue tomada la imagen del sensor ASTER.

4.2 Frecuencia anual de áreas quemadas

Durante el periodo en estudio se delimitaron 2,631 polígonos de áreas quemadas que suman una superficie acumulada total de 76,783.39 ha que son el equivalente al 50.04% del área en estudio, aunque muchas de ellas se detectaron en los mismos sitios en diferentes años, lo que podrá ser apreciado en los mapas de áreas quemadas que se presentan al final de este capítulo. El promedio anual de los polígonos fue 164 ± 115 ; para el caso del área quemada fue de $4,647.9 \pm 5,447.9$ ha.

En los años 1998, 2001, 2003, 2006, 2009 Y 2011 ambas cifras se ubicaron por arriba del promedio; en tanto que, en los años 2017, 2013 y 2000 se encontraron valores cercanos al promedio, los años restantes se situaron muy por debajo del mismo, cabe mencionar que en los años 2004, 2007, 2010 y 2015 no se pudo obtener la estimación de la superficie quemada debido a que no se tuvieron disponibles imágenes que reunieran los requisitos para la aplicación del índice espectral.

La superficie quemada que se contabilizó en el año 1998 representó el 14% del total del área de estudio, seguido por el año 2009 con 6.75% y el año 2011 con 5.19%. En cuanto a las superficies más grandes detectadas, de igual forma correspondieron al año de 1998 en donde el área quemada más grande fue de 3,671.09 ha, seguido por el año 2009 en donde se delimitó un área quemada máxima de 2,708.88 ha, este año fue seguido por el 2006 en donde se delimitó un área máxima de 1,840.77 ha; el promedio fue de $1,043.89 \pm 1,028.55$ ha, los años que se encontraron por debajo del mismo fueron 1999, 2000, 2001, 2002, 2005, 2008, 2012, 2014 y 2016, siendo el año 2012 en el cual se detectó un área con la superficie más pequeña (Tabla 11).

Tabla 11. Información de las áreas quemadas detectadas en la Sierra Nevada Río Frío.

Año	Número de polígonos	Área máxima (ha)	Superficie quemada anual (ha)	Porcentaje quemado del área de estudio
1998	474	3,671.09	21,487.44	14
1999	151	914.04	2,886.23	1.88
2000	264	272.16	3,324.01	2.17
2001	304	425.6	4,926.92	3.21
2002	84	486.18	1,687.17	1.1
2003	159	1,560.11	5,026.79	3.28
2005	142	219.42	2,332.29	1.52
2006	138	1,840.77	7,075.47	4.61
2008	21	259.02	446.31	0.29
2009	238	2,708.88	10,350.77	6.75
2011	216	1,482.75	7,958.23	5.19
2012	33	33.21	237.36	0.15
2013	134	1,116.63	3,332.07	2.17
2014	63	66.69	410.13	0.27
2016	66	364.95	914.87	0.6
2017	144	1,280.76	4,398.95	2.87

4.3 Distribución espacial de áreas quemadas

Como se mencionó en la parte de la metodología, para mostrar la distribución espacial de las áreas quemadas en la Sierra Nevada Río Frío (1998-2017) con la mayor claridad posible se decidió hacer un mapa para el norte, centro y sur de la misma, tomando como referencia las formaciones montañosas más grandes (Monte Tláloc, volcán Iztaccíhuatl y volcán Popocatepetl). Geográficamente la distribución espacial de las superficies quemadas más frecuentes en la parte norte de la Sierra Nevada Río Frío están distribuidas en el centro, el oeste y suroeste del Monte Tláloc, en donde se puede observar que la mayor concentración de áreas quemadas se encuentran en los cerros Tláloc y Telapón dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas, al oeste de

estas formaciones montañosas por debajo de los 3,600msnm también es posible apreciar grandes áreas quemadas, correspondientes a los años de 1998, 2011 y 2017 principalmente, al sur y suroeste en un corredor conocido como el Papayo también es posible ver grandes áreas quemadas de por lo menos cinco años, en donde destaca por su extensión un área quemada detectada en 1998, hacia el norte y el este del monte Tlálóc, ya fuera de los límites del Parque Nacional se detectaron áreas quemadas de gran extensión aunque de menor frecuencia, en esta porción de la Sierra Nevada Río Frío se puede apreciar como una gran parte de áreas quemadas se detectó dentro de los límites del Parque Nacional (Figura 26).

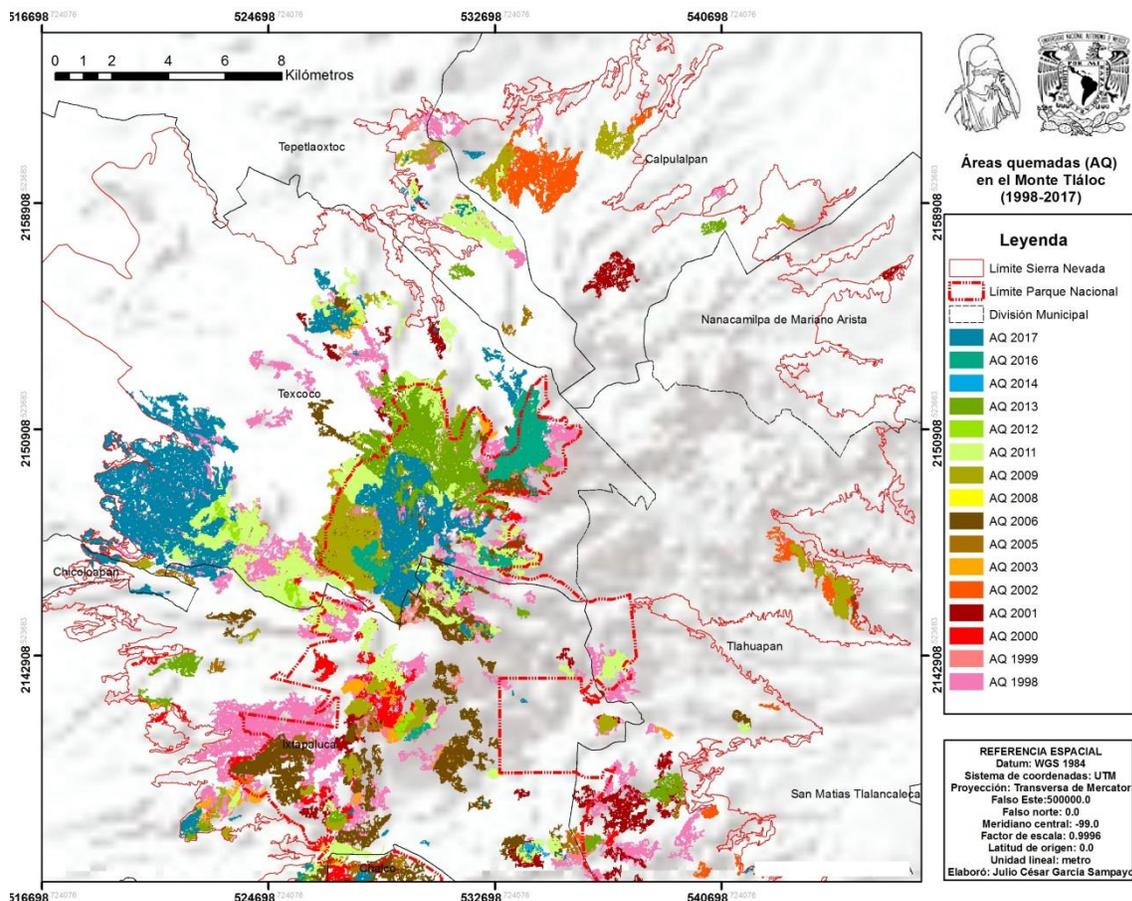


Figura 28. Mapa de áreas quemadas de la parte norte de la Sierra Nevada Río Frío. Elaboración propia.

En el volcán Iztaccíhuatl las áreas con mayor frecuencia y más grandes se presentaron en la vertiente occidental, aunque en los años 1998, 1999, 2005, 2009 y 2011 se identificaron algunas áreas quemadas de grandes dimensiones en la parte oriental del volcán Iztaccíhuatl aunque no muy frecuentes, en el sur del Volcán Iztaccíhuatl hacia el llamado Paso de Cortés, también se detectaron grandes áreas quemadas principalmente de los años 1998, 1999, 2000, 2003 y 2009, de igual forma una gran parte de áreas quemadas se detectaron dentro de los límites del Parque Nacional, fuera del mismo la mayoría de áreas quemadas se detectó al noroeste y hacia el este del volcán entre la cota de los 2,500 y 3,000 msnm (Figura 29).

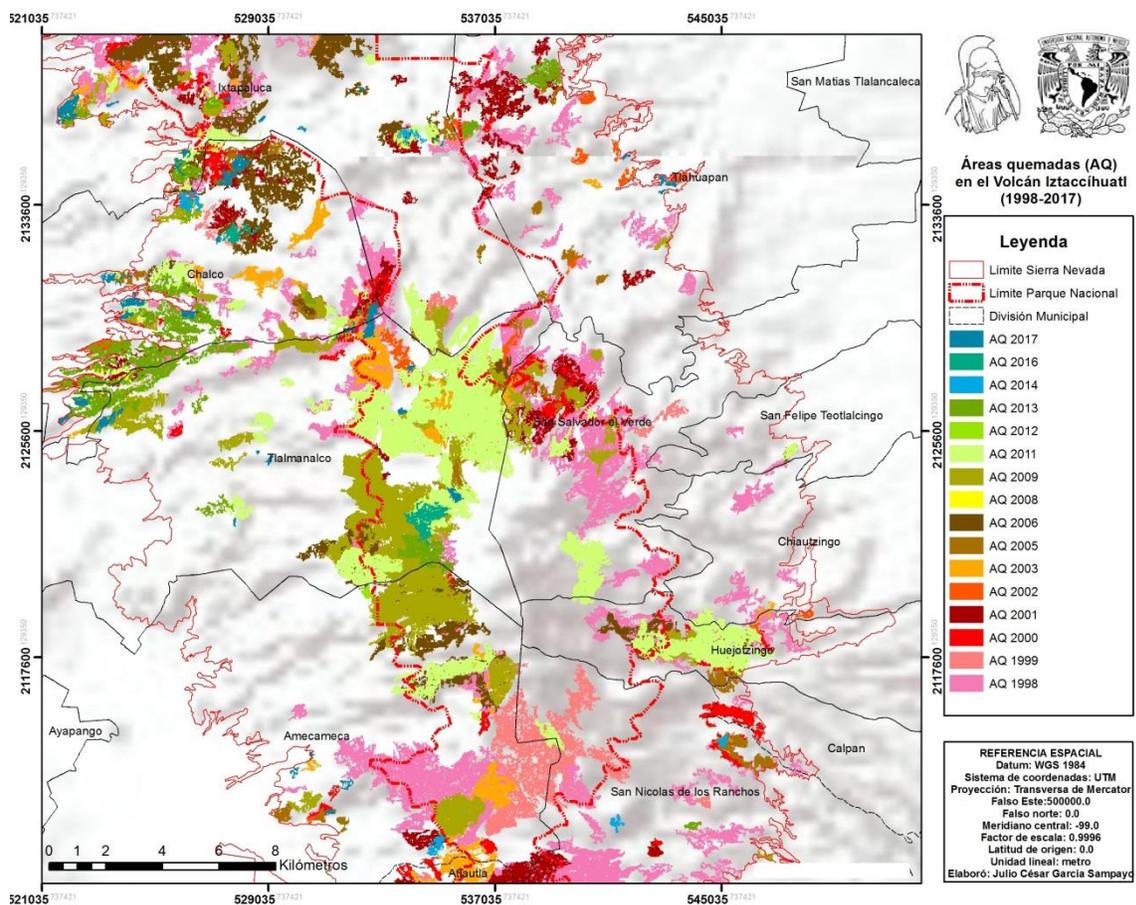


Figura 29. Mapa de áreas quemadas de la parte central de la Sierra Nevada Río Frío. Elaboración Propia.

En cuanto a la parte sur de la Sierra Nevada Río Frío correspondiente al volcán Popocatepetl y zonas aledañas, la distribución espacial de las áreas quemadas más recurrentes se detectaron hacia el norte del volcán en una zona conocida como Tlamacas y hacia el este, en particular en una de las partes más bajas de la región (2,220-2,490 msnm) la cual está casi rodeada por zonas de agricultura de temporal anual, en la parte norte del volcán la detección de áreas quemadas se dio dentro de los límites del Parque Nacional, hacia el este del volcán solo una parte de las áreas quemadas de detectó dentro de los límites del Parque, la mayoría como se había mencionado, se dio hacia el este (figura 30).

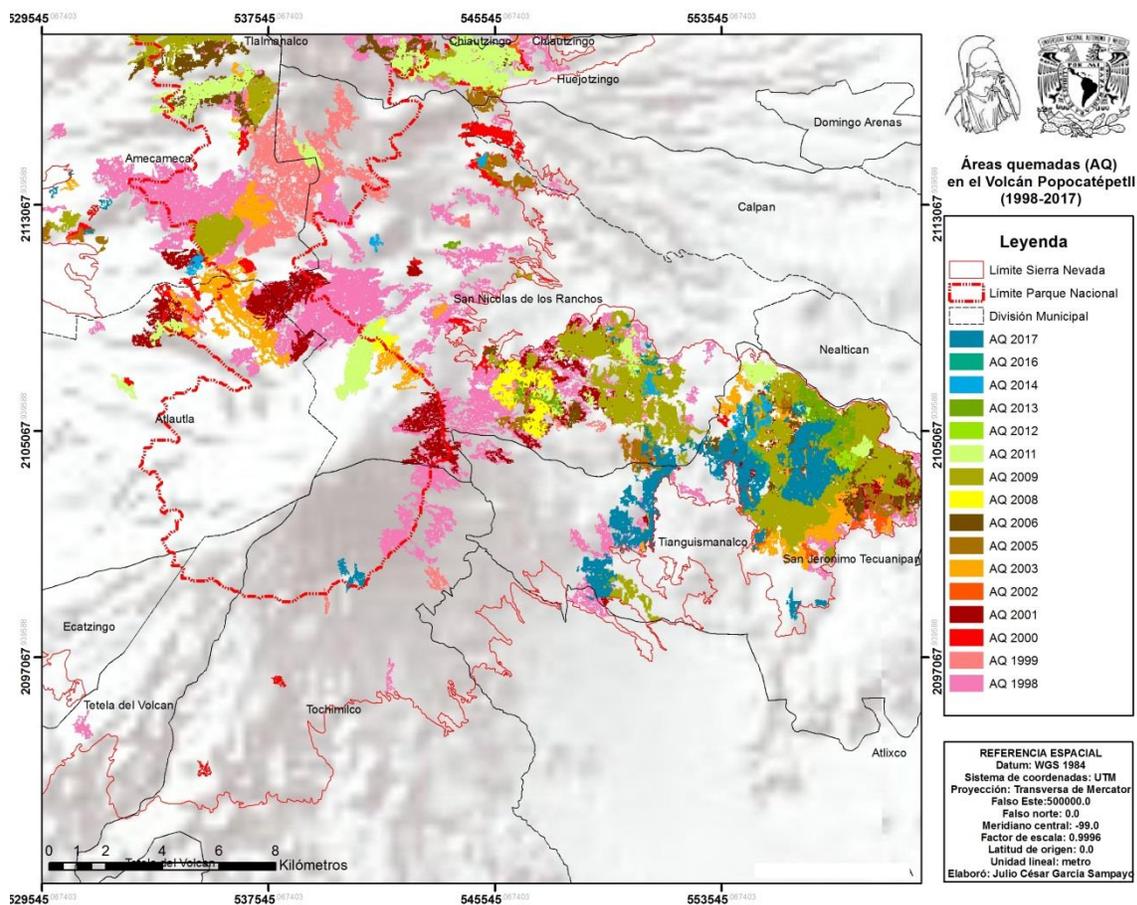


Figura 30. Mapa de áreas quemadas de la parte sur de la Sierra Nevada Río Frío. Elaboración Propia.

Administrativamente, la distribución espacial de las áreas quemadas más grandes y con mayor frecuencia se dieron en parte de los territorios de los siguientes municipios que integran la Sierra Nevada Río Frío: Texcoco el cual tuvo una superficie quemada acumulada de 17,533.77 ha que representaron el 11.42% de la superficie quemada acumulada detectada en el área de estudio en el periodo elegido (1998-2017).

Tianguismanalco donde se contabilizó una superficie acumulada de 10,328.79 ha, representando un 6.73% de la superficie quemada detectada en el periodo de estudio, posteriormente se encuentra Ixtapaluca en el cual se detectaron y contabilizaron 9,692.26 ha, en los 19 años las cuales representan el 6.31%, Tlalmanalco con 9,031.92 ha, que equivalen al 5.88% de la superficie quemada detectada, San Nicolás de los Ranchos con 8,428.13 ha.

Amecameca con 5,259.07 ha, que equivalen al 3.43% y Chalco 4,578.10 ha, que representan el 2.98%; en los municipios de San Salvador el Verde, Tlahuapan, Huejotzingo, Atlautla, Calpan y Tochimilco se detectaron áreas quemadas de dimensiones grandes, aunque no tan frecuentes, en ninguno de estos municipios se contabilizó una superficie acumulada mayor a las 3,000 ha., en cuanto a los municipios restantes sólo se identificaron áreas quemadas pequeñas y no muy frecuentes (Tabla 12). En la figura 31 se muestra la estimación de superficie quemada por municipio en cada año analizado, en donde se pueden apreciar los municipios con las mayores cifras.

Tabla 12. Estimación de la superficie quemada anual en ha por municipios que integran la Sierra Nevada Río Frío.

Municipio	Superficie acumulada ha* (1998-2017)	%
Amecameca	5,205.21*	3.43
Atlautla	1,339.14*	0.91
Atlixco	70.60*	0.05
Calpan	151.67*	0.10
Calpulalpan	1,117.69*	0.73
Chalco	4,578.10*	2.98
Chiautzingo	378.72*	0.25
Chicoloapan	60.99*	0.04
Ecatzingo	6.12*	0.00
Huejotzingo	1,807.22*	1.21
Ixtapaluca	9,638.41*	6.31
Nanacamilpa de Mariano Arista	33.56*	0.02
Ocuituco	0.00*	0.00
San Felipe Teotlalcingo	109.68*	0.07
San Nicolás de los Ranchos	8,374.28*	5.49
San Salvador el Verde	2,772.49*	1.81
Tepetlaoxtoc	735.30*	0.48
Tetela del Volcán	68.71*	0.04
Texcoco	17,533.77*	11.42
Tianguismanalco	10,328.79*	6.73
Tlahuapan	2,648.28*	1.73
Tlalmanalco	9,031.92*	5.88
Tochimilco	523.49*	0.34

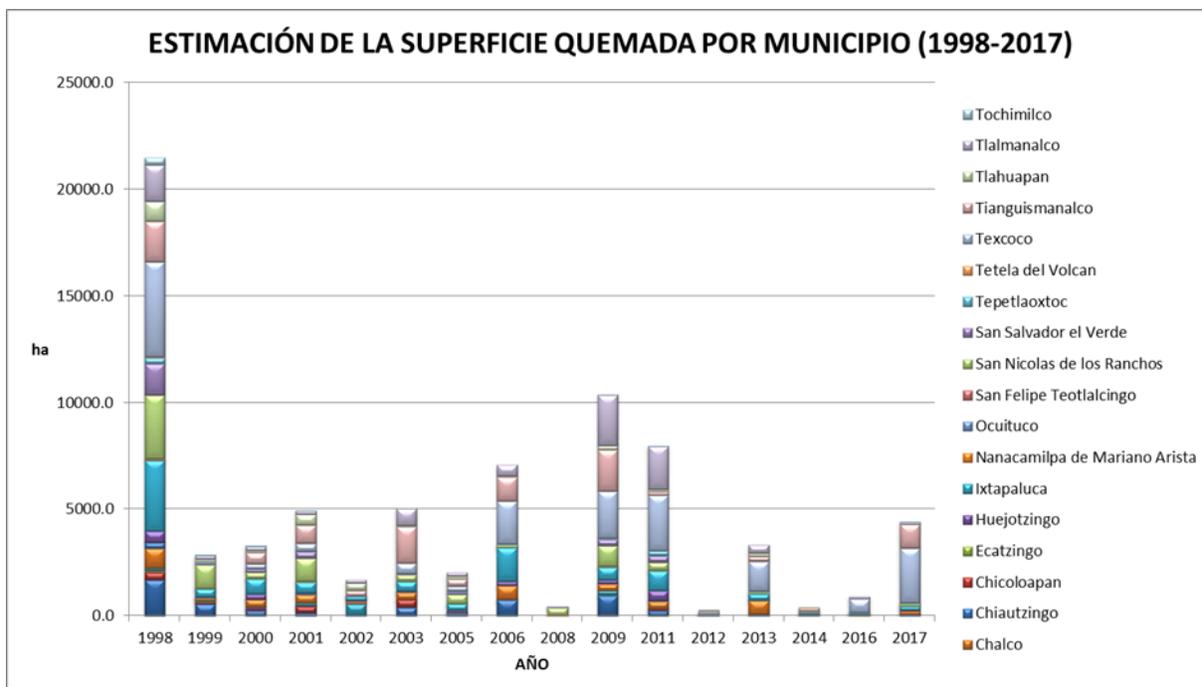


Figura 31. Superficie quemada anual por municipio.

En cuanto a la distribución espacial de las áreas quemadas detectadas en relación a los tipos de vegetación, fue en los bosques de pino en donde se contabilizó una mayor superficie, se estimó una superficie quemada total acumulada para los 19 años analizados de 38711.23 ha, pero hay que tener presente que el porcentaje que ocupan los bosques de pino en la Sierra Nevada Río Frío es mayor que los demás tipos de vegetación, pues estos representan el 39.87% del área en estudio, el segundo tipo de vegetación en el que se detectó una mayor superficie quemada y en donde fueron también muy frecuentes, fue en la vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino en la cual se estimó una superficie quemada acumulada de 10,966.10 ha, este tipo de vegetación ocupa el 5.45% del área de estudio y se localiza principalmente al oeste, norte, noreste del Monte Tláloc y al este del volcán Popocatepetl.

Otro tipo de vegetación en la que se detectaron varias áreas quemadas fue en las praderas de alta montaña y en los pastizales inducidos ya que para estas dos categorías se estimó una superficie acumulada de 4472.29 y 3528.50 respectivamente, estas dos coberturas representan el 7.99% del área de estudio. En cuanto a los bosques de encino se

detectó una buena cantidad de áreas quemadas muy frecuentes y se estimó una superficie quemada acumulada de 2861.68 ha para el periodo de tiempo analizado, esta cobertura representa el 2.76% del área de estudio.

Otros tipos de vegetación en donde se identificaron áreas quemadas de grandes dimensiones y frecuentes, fue en los bosques de pino-encino que representan el 7.14% del área de estudio, en donde se estimó una superficie quemada acumulada de 3160.34 ha; en la vegetación secundaria arbórea de pino-encino se estimó una superficie quemada acumulada de 2766.58 ha y en la vegetación secundaria arbustiva de pino-encino se estimó una superficie acumulada de 2095.02; estos dos tipos de vegetación representan el 2.94% del área de estudio, sin embargo, fue en estos dos tipos de vegetación en donde se detectaron áreas quemadas muy frecuentes, en especial al este del volcán Popocatepetl. Para el caso de los bosques de oyamel los cuales representan el 12.22% del área de estudio, la estimación de la superficie quemada acumulada del periodo de tiempo analizado fue de 2063.34 ha, fue uno de los tipos de vegetación en el que se contabilizó una superficie quemada acumulada menor (figura 32 y 33).

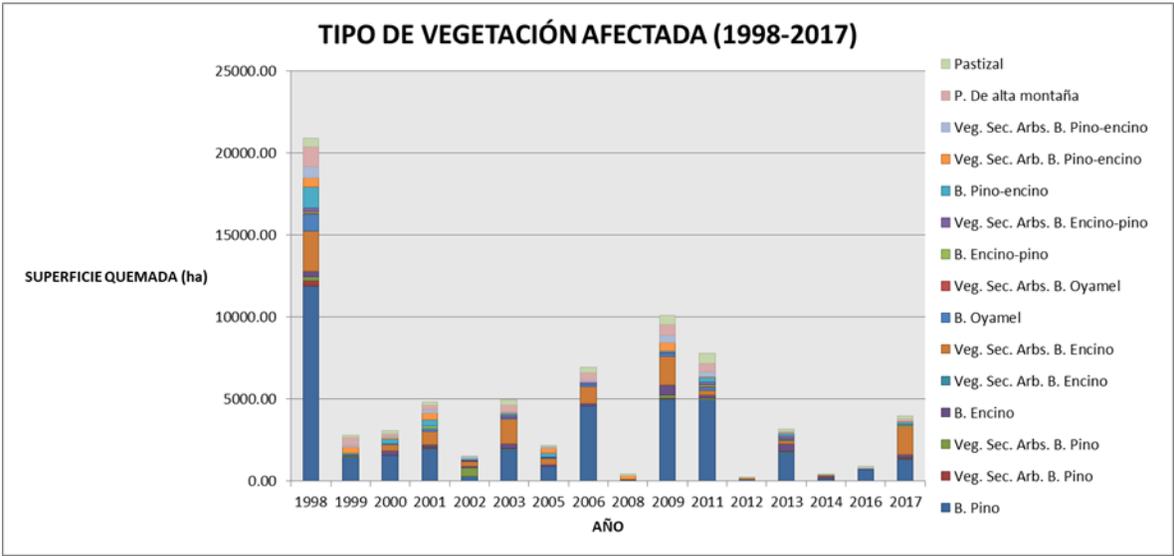


Figura 32. Estimación de la superficie quemada anual por tipo de vegetación y uso del suelo.

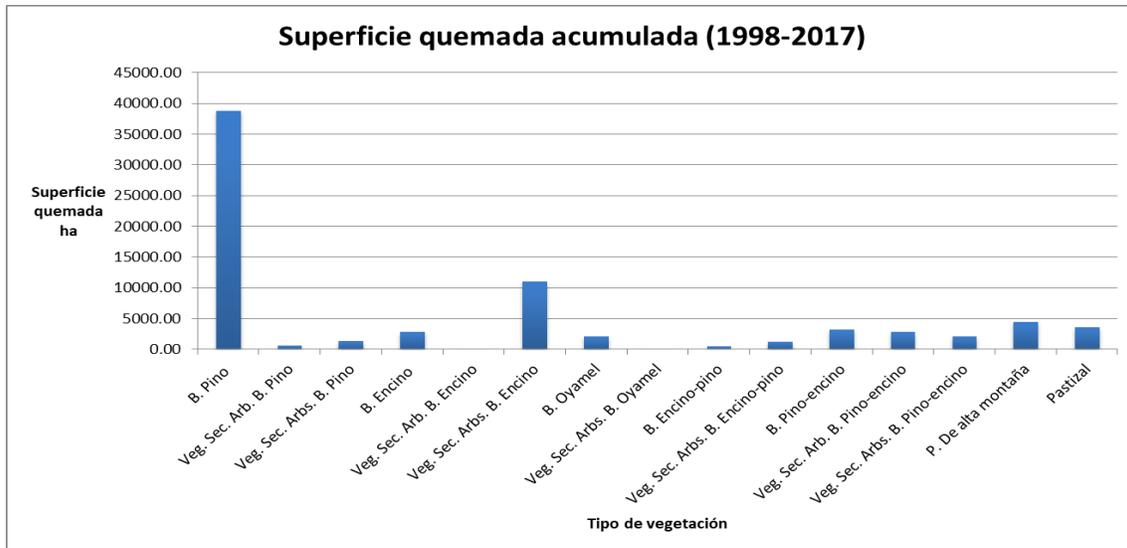


Figura 33. Tipos de vegetación en donde los incendios fueron más frecuentes.

4.4 Cambios en la densidad de cobertura forestal asociada a incendios forestales

La búsqueda dio como resultado 451 polígonos (9,939.75 ha) que se quemaron una o más veces de 1998-2015, 44 de ellos (821.62 ha) coincidieron con zonas que presentaron una pérdida de densidad de cobertura forestal, 69 polígonos (1,424.75 ha) coincidieron con zonas que presentaron un incremento en su densidad de cobertura forestal y 338 polígonos (7,693.38 ha) coincidieron con zonas en las cuales no se presentaron cambios en su densidad de cobertura forestal. En este sentido se puede ver que el menor porcentaje de las superficies que se quemaron una o más veces en 17 años coincide con zonas que presentaron pérdida (8.26%), mientras que el mayor porcentaje de estas áreas quemadas coincide con zonas que presentaron un incremento en su densidad de cobertura forestal (14.33%) y con aquellas que no presentaron cambios (77.4%) (Tabla 13).

Tabla 13. Áreas quemadas asociadas a cambios en la densidad de cobertura forestal: 1998 -2015.

Frecuencia (recurrencia de incendio)		Pérdidas (Clave)				Incrementos (Clave)				Sin cambios
Frecuencia		1	2	3	4	5	6	7	8	0
1	Superficie (ha)	369.25	103.86	16.02	0	24.59	34.84	356.28	564.89	4,992.65
	Polígonos	22	7	1	0	2	1	14	25	200
2	Superficie (ha)	160.14	10.64	0	0	0	0	78.98	230.73	1,801.66
	Polígonos	8	1	0	0	0	0	4	16	84
3	Superficie (ha)	65.61	81.94	14.16	0	0	0	24.72	84.92	631.25
	Polígonos	4	1	1	0	0	0	1	4	37
4	Superficie (ha)	0	0	0	0	0	0	14.24	10.56	194.75
	Polígonos	0	0	0	0	0	0	1	1	13
5	Superficie (ha)	0	0	0	0	0	0	0	0	73.07
	Polígonos	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Superficie total (ha)		595.01	196.43	30.18	0	24.59	34.84	474.22	891.1	7,693.38
Polígonos totales		33	9	2	0	2	1	20	46	338

De estos 451 polígonos se seleccionaron 15 para registrar la severidad de los incendios que se habían presentado (figura 34); se pudo observar que en los polígonos que presentaron una pérdida de densidad de cobertura forestal fue de Moderadamente Baja (MB) a Moderadamente Alta (MA) y solamente dos de estos polígonos presentaron severidad Alta (A) (polígono 1 incendio de 1998 y polígono 12 incendio de 2003) ambos tenían una cobertura forestal semi-abierta (3) en el año 1994 y ésta pasó a una cobertura abierta (4) en el año 2015, lo que corresponde a una pérdida Baja (1) de densidad de cobertura forestal, después se analizaron los polígonos que presentaron una pérdida Media (2) y Alta (3) de densidad de cobertura forestal y se observó que la severidad en estos fue de Moderadamente Baja a Moderadamente Alta; en ningún caso se encontró un

polígono que presentara una pérdida muy alta (4) de densidad de cobertura forestal que coincidiera con áreas quemadas.

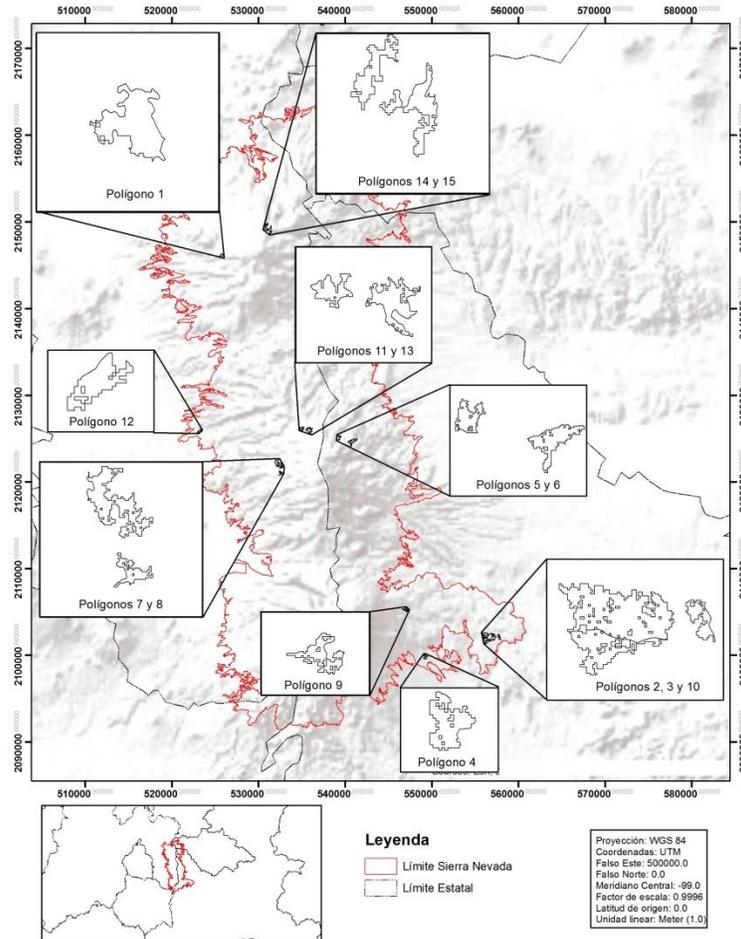


Figura 34. Ubicación de los polígonos analizados con dNBR. Elaboración propia.

En cuanto a los polígonos que tuvieron un incremento en su densidad de cobertura forestal se pudo observar que la severidad de los incendios fue Baja a Moderadamente Baja, presentándose éstos en zonas con una densidad de cobertura forestal semi-abierta; uno de los más interesantes fue el polígono siete en el cual se tiene una vegetación de bosque de pino, en el cual se presentaron tres incendios: uno en 1998 de severidad Baja, otro en 2006 de severidad Baja y otro en 2009 de severidad Baja a Moderadamente Baja y en donde se presentó un incremento Bajo (8) en su densidad de cobertura forestal, pasando de ser un área semi-abierta en 1994 a semi-cerrada en 2015. En cuanto a las

áreas quemadas que no presentaron cambios de densidad de cobertura forestal, el resultado del dNBR mostró que la severidad en estos polígonos en todos los incendios que se presentaron fue Baja, uno de los más interesantes es el polígono 14 el cual se quemó cinco veces en el periodo de estudio y no presentó cambios (Tabla 14).

Tabla 14. Polígonos con incendios recurrentes y el tipo de cambio que presentaron.

Polígono	Tipo de vegetación	Año del incendio	Severidad	Cobertura		Cambio	Superficie (ha)
				1994	2015		
1	B. Pino	1998 2003 2011	MA-A MB-MA MB-MA	3	4	1	13.15
2	V. Sec. Arbs. B. Encino	1998 2003 2009	MB-MA MB-MA MB-MA	3	4	1	28.60
3	V. Sec. Arbs. B. Encino	1998 2003 2009	MB-MA MB-MA B-MB	2	4	2	81.94
4	V. Sec. Arb. B. Pino	1998 2009	B-MB MB-MA	1	4	3	14.16
5	B. Pino	1998 2011	B B	3	1	7	18.69
6	B. Pino	1998 2009	B B-MB	4	2	7	28.48
7	B. Pino	1998 2006 2009	B-MB B MB	3	2	8	40.19

Tabla 14. Continuación.

Polígono	Tipo de vegetación	Año del incendio	Severidad	Cobertura		Cambio	Superficie (ha)
				1994	2015		
8	B. pino	1998 2006 2009 2011	B-MB B-MB B-MB B	3	2	8	10.56
9	V. Sec. Arb. B. Pino-Encino	1999 2001 2005	B MB B-MB	5	3	7	15.78
10	V. Sec. Arbs. B. Encino	2001 2003	B-MB MB-MA	2	4	2	10.64
11	B. Pino	2003 2009 2011	B-MB MB-MA B-MB	1	2	1	13.36
12	B. Encino	2003 2009	MA-A MB-MA	3	4	1	10.51
13	B. Pino	2003 2009 2011	MB MB B	3	1	7	24.72
14	B. Pino	1998 2006 2009 2011 2013	B B B B B	1	1	0	18.03
15	B. Pino	1998 2009 2011 2013	B B B B	1	1	0	14.03
Tipos de vegetación:		Grado de severidad:		Densidad de cobertura forestal:		Cambio	
Bosque de Pino		Bajo (B)		Cerrado (1)		Pérdida	Incremento
Bosque de encino		Moderado Bajo (MB)		Semi-cerrado: (2)		Bajo (1)	Bajo (8)
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino		Moderado Alto (MA)		Semi-abierto: (3)		Medio (2)	Medio (7)
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino		Alto (A)		Abierto: (4)		Medio-alto (3)	Medio-alto(6)
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino				Deforestado (5)		Alto (4)	Alto (5)
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino							

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

El ajuste que se realizó al índice BAI permitió obtener una delimitación buena de las superficies quemadas, sin embargo esta pudo haber sido mejor si la disponibilidad de imágenes de satélite post-incendio hubiera sido más amplia, puesto que fueron situaciones comunes el encontrar imágenes en las cuales el área en estudio estaba completamente cubierta por nubes, por lo tanto era imposible obtener la información requerida mediante el índice espectral, por ejemplo en el año 2005 varios puntos de calor que registraron incendios el 24 de marzo de 2005 cayeron en un área adyacente al volcán Iztaccíhuatl, en una de las imágenes Landsat ETM+ que se tenía disponible de ese año y la más cercana a las fechas de quema registradas por los puntos de calor la cual era del 4 abril de 2005, tenía una gran cantidad de nubes, que impidieron registrar con precisión esa superficie quemada, por lo tanto fue necesario usar otra imagen que tenía menor cubierta de nubes y a la cual se aplicó el índice, la cual era de dos meses después de las fechas en las que se encontraban activos esos incendios 22 de mayo de 2005, por lo que ésta área ya perdía la señal espectral que producen las superficies quemadas y las dimensiones de su delimitación fueron menores de las que se pudieron haber obtenido de contar con una imagen más cercana a la fecha de quema. Esta superficie quemada se identificó al revisar algunas imágenes del sensor ASTER ya que una de ellas tenía fecha del 28 de marzo de 2005 cuatro días después del incendio, por lo que se pudo observar que el área quemada fue más grande de lo que se había delimitado con BAI.

El establecimiento de umbrales basados en la interpretación de imágenes en composición de falso color, puntos de calor y la firma espectral, fue de gran utilidad pues así se incluyeron áreas quemadas que en algunas imágenes presentaban valores de BAI muy bajos (>20 y <40), lo que pudo deberse a que la afectación del fuego fue muy baja, y al restringir los umbrales con valores muy altos (>50 y <85), estas áreas quemadas quedaban excluidas (errores de omisión), además de que también permitió eliminar polígonos que fueron delimitados como quemados los cuales no lo eran (errores de comisión), como aquellas áreas en las cuales se proyectaba la sombra de una pendiente y sombras proyectadas por nubes.

En cuanto a la precisión de la cartografía creada se puede decir que fue aceptable, puesto que para las áreas quemadas validadas del año 2003, la precisión que se obtuvo mediante el índice kappa fue superior al 73% e inferior al 88%, para los años 2006 y 2009 esta precisión estuvo entre 80 y 83% lo que se considera aceptable (Mas *et al.*, 2003). Los errores de omisión también fueron bajos estando en la mayoría de los casos en valores inferiores a 14%, los errores de comisión en general tuvieron valores bajos, solo en algunas ocasiones estuvieron un poco elevados llegando a tener hasta el 26%, esto debido a los intervalos de los umbrales que se establecieron con la finalidad de delimitar de mejor manera los bordes de las áreas quemadas lo que incluía polígonos en los cuales la reflectancia era muy baja pero que no habían sido afectados por fuego (zonas con sombras), sin embargo debido a la utilización de los elementos antes mencionados estos errores pudieron ser eliminados de la cartografía final.

La cartografía realizada muestra que para ciertas partes de la Sierra Nevada Río Frío, como en el monte Tláloc, en especial dentro de los límites del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas, el norte, oeste y sur del volcán Iztaccíhuatl, al norte y este del volcán Popocatepetl, la frecuencia de incendios pareciera ser elevada, aunque según Rodríguez-Trejo (2014) en bosques de pino y encino los incendios suelen ser frecuentes pero de tipo superficial, lo cual en cierta forma consume material combustible evitando que se presente un incendio de gran severidad, sin embargo se dice que cuando los incendios son demasiado frecuentes pueden favorecer la aparición de vegetación arbustiva, ya sea en pinares o encinos, lo que puede provocar un estancamiento en la sucesión ecológica (Rodríguez-Trejo, 2014).

En cuanto a los lugares en donde se presentaron pérdidas de cobertura forestal en los cuales fueron recurrentes varios incendios, es necesario mencionar que la afirmación tajante de que este factor haya sido por sí mismo el causante de la pérdida de cobertura es un tanto arriesgado, puesto que en la literatura relacionada con el tema de la ecología del fuego se menciona que existen plantas que han desarrollado una serie de adaptaciones que les permiten sobrevivir a incendios, entre ellas algunas pertenecientes al género *Pinus*, tal es el caso del *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae* por mencionar

algunos, los cuales han establecido una relación sumamente estrecha con los incendios forestales (Rodríguez, 2001; Rodríguez y Fulé, 2003).

Quizá a estas adaptaciones se deba que la mayor parte de las áreas quemadas detectadas haya presentado un incremento de densidad de cobertura forestal en 15 años o bien hayan permanecido con la misma densidad, pues se dice que los depósitos de cenizas enriquecen el suelo de nutrientes que podrán ser aprovechados por las plántulas que crezcan, también el fuego propicia la apertura de los conos serótimos³ liberando la semilla, así al tener un suelo enriquecido con nutrientes y al no tener competencia con otras plantas que fueron eliminadas por el fuego, estas semillas tienen más oportunidades de desarrollarse, además la gruesa corteza que tienen los pinos, la cual les proporciona una capa protectora que permite que tengan una alta supervivencia a incendios forestales de severidad baja o moderada (González 2001; Rodríguez, 1996). El problema se presenta si los incendios son muy severos y frecuentes lo cual puede destruirlos y matar a las plántulas que habían crecido (Rodríguez, 2001; Peña-Ramírez y Bonfil, 2003; Velázquez y López, 2014).

Para los bosques de encino y la vegetación secundaria de bosques de encino, la relación entre éstos y el fuego también es muy compleja, por lo que también sería muy precipitado decir que únicamente los incendios propiciaron la pérdida de densidad de cobertura forestal en los polígonos identificados, puesto que en la literatura se menciona que varias de las especies del género *Quercus* tienen adaptaciones para sobrevivir a incendios superficiales, pues cuando se presentan incendios en estas comunidades vegetales y el dosel es afectado parcialmente algunas especies de *Quercus* tienen una gran capacidad de rebrote; ésta es una de las adaptaciones que les da una alta capacidad de recuperación después de haber sido afectados por incendios forestales (Peña-Ramírez y Bonfil, 2003).

Otra de las adaptaciones que tienen los encinos para sobrevivir al embate de un incendio es en su fase de crecimiento; cuando éstos son plántulas la raíz que desarrollaron penetra muy profundo en el suelo en donde el aumento de la temperatura ocasionado por el

³ Frutos o piñas que permanecen en el árbol cerradas durante uno o más años, hasta que temperaturas muy elevadas (p. e. incendio) provocan su apertura y la diseminación de semillas.

fuego disminuye considerablemente y al morir la parte aérea de la plántula, se estimulan yemas latentes que están en la base de los tallos de la plántula, lo que produce un rebrote (Christensen, 1985; citado por: Peña-Ramírez y Bonfil, 2003). Sin embargo, se dice que el impacto que puede ocasionar el fuego depende de la frecuencia e intensidad con que éstos ocurran y del estadio en el que se encuentre la planta, siendo las más afectadas las plantas que son jóvenes; de esto se menciona que al morir los árboles adultos y ha sido afectada una gran cantidad de plantas jóvenes el reclutamiento de nuevos árboles se verá afectado, otro factor que debe considerarse es la especie de encino debido a que la regeneración en algunos está basada en la producción de bellotas ya que éstas pierden su viabilidad al perder humedad (Zavala 2000; Peña-Ramírez y Bonfil, 2003).

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

La aplicación de índices espectrales a imágenes Landsat para la discriminación y cartografía de áreas quemadas demostró ser una técnica eficaz, pues esta proporciona información precisa y a bajo costo de este tipo de sucesos, lo que se traduce en una cartografía de buen detalle debido a la resolución espacial y espectral de los sensores TM, ETM+ y OLI.

En cuanto al análisis de la firma espectral para validar si un polígono pertenecía o no a la categoría de área quemada, fue sumamente útil, pues como se mencionó anteriormente, el índice espectral tendía a “confundirse” en algunas partes y dichas partes al no contener puntos de calor daban una pauta a creer que se trataban de áreas no quemadas; sin embargo, al observar el comportamiento espectral de dichas zonas “confusas” se eliminaban las suposiciones y se comprobaba que realmente habían sido afectadas por fuego, pues los patrones de su comportamiento espectral en las bandas del NIR y del SWIR eran similares a los comportamientos espectrales de las áreas quemadas que presentaban puntos de calor y de algunas áreas en las cuales se podían observar frentes de fuego activos.

A diferencia de la escala 1:400,000 la cual permite cartografiar áreas quemadas de incendios de grandes dimensiones (>200 ha), la elección de la escala 1:150,000 se consideró como una buena opción para cartografiar áreas quemadas de hasta 9 ha, lo que permitió representar tanto incendios de grandes de dimensiones, como de dimensiones menores pero representativas. A partir de esta información es posible establecer zonas que son más susceptibles a la ocurrencia de incendios, y en las cuales la presión antrópica relacionada con las quemas agropecuarias ha sido elevada como en la zona de lomeríos cercana a las localidades de San Baltazar Atlimeyaya, San Buenaventura Nealtican y San Nicolás de los Ranchos. Esta información espacial, puede ser leída de forma sencilla por la población de las localidades cercanas a la Sierra Nevada Río Frío, con la finalidad de que puedan visualizar la magnitud y frecuencia de las áreas quemadas que se han suscitado en los últimos 19 años.

Dicha cartografía permitió detectar la distribución y la frecuencia de áreas quemadas, además de identificar los sitios en donde el fuego pudo haber causado una pérdida de densidad de cobertura forestal debido a una severidad alta, lo que demuestra la importancia de tener una cartografía actualizada de áreas quemadas con la cual se puedan tomar medidas apropiadas para llevar a cabo labores de reforestación y prevenir la erosión del suelo, dirigiendo los recursos adecuados a sitios específicos. Además permitió observar que para que un incendio forestal pueda causar daños a los bosques debe de ser muy frecuente e intenso, por lo que no todos los incendios deben de verse como una catástrofe sino como un elemento fundamental que guarda una relación compleja con el bosque en donde debido a las actividades del ser humano las cuales modifican y alteran el régimen natural de estos eventos haciendo que el fuego se vuelva un factor de afectación para los ecosistemas forestales.

BIBLIOGRAFÍA

Arcía Rodríguez, M. (1994). *Geografía del medio ambiente: una alternativa de ordenamiento ecológico*. 1ra Edición. México. Universidad Autónoma del Estado de México. 289 p.

Arriaga L., Espinoza J., Aguilar C., Martínez E., Gómez L. y Loa E. (coordinadores). (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México.

Bastarrika A. y Chuvieco E. (2006). Cartografía de área quemada mediante crecimiento de regiones aplicación en entornos mediterráneos con imágenes TM y ETM+. *GeoFocus*. Núm. 6. Recuperado el 26 de enero de 2017 de: <http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/94>

Botella-Martínez M. y Fernández-Manso A. (2017) Estudio de la severidad post-incendio en la Comunidad Valenciana comparando los índices dNBR, RdNBR y RBR a partir de imágenes Landsat 8. *Revista de teledetección*. Núm. 49. Recuperado el 30 de marzo de 2017 de: <https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/download/7095/8976>

Buzai G. (2013). *Sistemas de Información Geográfica SIG: teoría y aplicación*. 1ra Edición. Universidad Nacional de Luján. Recuperado el 30 de marzo de 2017 de: <http://www.tysmagazine.com/libro-gratuito-sistema-de-informacion-geografica-sig-teoria-y-aplicacion/>

Buzai G., Cacace G., Humacata L., Lanzelotti S. (2015). *Teoría y métodos de la geografía cuantitativa*. 1ra Edición. Universidad Nacional de Luján. Recuperado el 15 enero de 2017 de: <http://www.nosolosig.com/articulos/572-nuevo-libro-teoria-y-metodos-de-la-geografia-cuantitativa>

Calvache Ulloa M. (2004). *Aplicabilidad de las coordenadas UTM generadas por navegadores GPS en agrimensura con fines de manejo por sitio específico*. Recuperado el 15 de enero 2017 de: https://www.researchgate.net/publication/311966168_B3-APLICABILIDAD_DE_LAS_COORDENADAS_UTM_GENERADAS_POR_NAVEGADORES_GPS_EN_AGRIMENSURA_CON_FINES_DE_MANEJO_POR_SITIO_ESPECIFICO

CENAPRED Centro Nacional de Prevención de Desastres. México (2007). *Incendios forestales*. Serie fascículos. Recuperado el 7 de marzo 2017 de: http://www.colpos.mx/wb_pdf/Proteccion-Civil/Incendios%20forestales_s.pdf

Christensen L. (1985). Cap. 6. Shrublandfire regimes and their evolutionary consequences. En: Pickett S. T. A. y White S. *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. 1st. Edition. Florida. Academic Press.

Cruz M. (2018). Uso de datos satelitales para estimar emisiones por quema de biomasa en México. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.

CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. Portal de geoinformación. Recuperado el 2 agosto de 2017. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

CONAFOR Comisión Nacional Forestal. México. (2012). Reporte semanal de resultados de incendios forestales. Recuperado el 10 enero de 2017 en: <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/incendios/>

CONAFOR Comisión Nacional Forestal. México. (2013) Reporte semanal de resultados de incendios forestales. Recuperado el 10 enero de 2017 en: <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/incendios/>

CONAFOR Comisión Nacional Forestal. México. (2015) ¿Qué es la Conafor? Recuperado el 10 enero de 2017 en: <http://www.conafor.gob.mx/web/nosotros/que-es-conafor/>

CONAFOR Comisión Nacional Forestal. México. (2017) Estadística forestal nacional. Recuperado el 12 enero de 2017 en: <http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/las-demas/reportes-de-incendios-forestales>.

CONANP Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México. (2011). Estrategia y lineamientos del Manejo del Fuego en Áreas Naturales Protegidas. Recuperado el 12 marzo de 2017 en: http://www.conanp.gob.mx/pdf_publicaciones/EMFAPFINAL1.pdf

Congalton R. y Green K. (1993). A practical look at the source of confusión in error matriz generation [versión electrónica]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Núm. 59.

Chuvieco E. (2002). *Teledetección ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio*. 3ra. Edición. Barcelona. Ariel Ciencia.

Chuvieco E., Opazo S., Sione W., Del Valle H., Anaya J., Di Bella C., Manzo L., López G., Mari N., González-Alonso F., Morelli F., Setzer A., Csizar I., Kanpandegi J., Bastarrika A., Libonati R. (2008). Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data. *Ecological Applications*. Vol. 18. Núm. 1.

De Santis A., y Vaughan P. (2009). *Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas*. Recursos rurales: Revista oficial do instituto de Biodiversidade Agraria e Desenvolvimento Rural. Núm. 5.

Erives-Beltrán V. Bravo-Peña L., Alatorre L., Wibe C., Chacón R. y Gavito F. (2014). Estimación de la densidad del dosel forestal por métodos indirectos, exploraciones por regresión lineal múltiple en las ANP Tutuaca y Papigochic. Chihuahua. Memorias del primer encuentro de jóvenes investigadores en el Estado de Chihuahua. Eds. UACJ-CONACYT.

Escamilla M. (2007). *La vegetación de la alta montaña del volcán Iztaccíhuatl, México: un enfoque fitosociológico*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

FRA Forest Resources Assessment. Organización de las Naciones Unidas. (2010). Evaluación de los recursos forestales mundiales. Términos y definiciones. Italia. Departamento forestal.

Flores Garnica J. (2009). *Impacto ambiental de incendios forestales*. 1ra Edición. México. Mundi-Prensa.

Flores Garnica J. y Rodríguez Trejo A. (2006). *Incendios forestales. Definiendo el problema, Ecología y manejo, Participación Social, Fortalecimiento de capacidades, Educación y divulgación*. Grupo mundi-prensa.

García Mora T. y Mas J. (2011a). Capítulo 1. Presentación del sensor MODIS. En: *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. 1ra Edición. México. CIGA.

García Mora, T. y Mas, J. (2011b). Capítulo 2. MODLAND. Los productos de superficie terrestre. En: *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. 1ra Edición. México. CIGA.

Gates D., Keegan H., Schleter J. y Widner V. (1965). Spectral properties of plants. [Versión electrónica]. *Applied Optics*. Vol.4. Núm. 1.

Granados D. y López G. (1998). Ecología del fuego. [Versión electrónica]. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. Vol. 4. Núm 1.

Gilabert J., García-Haro J. y González J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. [Versión electrónica] *Revista de teledetección*. Núm. 8.

González-Alonso F. Merino de Miguel S. Cuevas J. (2007). Un nuevo algoritmo para la cartografía de áreas quemadas a partir de información NIR, SWIR y TIR. [Versión electrónica] *Revista de teledetección*. Núm. 28.

González A. (2001). *Efecto del chamuscado de copa en el crecimiento en diámetro de **Pinus Hartwegii Lindl.*** Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México.

González Tagle M., Schwendenmann L., Jiménez J. y Himmelsbach W. (2007). Reconstrucción del historial de incendios y estructura forestal en bosques mixtos de pino-encino en la Sierra Madre Oriental [Versión electrónica]. *Madera bosques* Vol. 13. Núm. 2

Hernández P. (1988). *Manejo integral de la cuenca oriente del Valle de México*. Tesis de Ingeniería. Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México.

Hunt R. y Rock B. (1989). Detection of changes in leaf water content using Near and Middle-Infrared reflectances. [Versión electrónica] *Remote Sensing of Environment*. Vol. 30. Núm. 1.

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). Climatología. Recuperado el 11 de enero de 2017 en:

https://www.inegi.org.mx/400.html?aspxerrorpath=/geo/contenidos/recnat/clima/infoes_cala.aspx

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). Edafología. Recuperado el 11 de enero de 2017 en:

https://www.inegi.org.mx/400.html?aspxerrorpath=/geo/contenidos/recnat/edafologia/v_ectorial_serieii.aspx

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). Espacio y datos de México. Recuperado el 11 de enero de 2017 en:

<http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/>

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). Geología. Recuperado el 11 de enero del 2017 en: <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/geologia/>

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Hidrología. Recuperado el 11 de enero de 2017 en: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/hidrologia/>

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). Uso de suelo y tipo de vegetación. Recuperado el 11 de enero de 2017 en:

<http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/usosuelo/>

Jiménez V. (2017). Teledetección de superficies quemadas asociadas a incendios forestales entre 2000-2015 en el Área de Protección de Flora y Fauna Tutuaca, Chihuahua. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Key C. y Benson N. (2006). Landscape Assessment. En: FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. Fort Collins. Colorado.

LP DAAC, 2018. Land Processes Distributed Active Archive Center. Recuperado el 13 de febrero de 2018. En: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mcd64a1_v006

Lencinas J. D. y Siebert A. (2009). Relevamiento de bosques con información satelital: resolución espacial y escala. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*. Núm. 17. Recuperado el 10 abril de 2017. En: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48113035010>

López-García J. (2007). Análisis de cambio de la cobertura forestal en la reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (2006-2007). Fondo para la conservación de la Mariposa Monarca (WWF y FMCN). México. Recuperado el 15 abril de 2018. En: http://awsassets.panda.org/downloads/071126_eval_forestal_monarca06_07.pdf

López López, H. A., (2004). Fábrica de agua en la región del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. BQ010. México D. F. (Edición digital: CONABIO 2006). Recuperado

el 6 de marzo de 2017. En:
<http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfBQ010.pdf>

Magaña V. (2001). *El fenómeno el Niño/Oscilación del Sur (ENOS) y sus impactos en México*. En: Los efectos del El Niño en México 1997-1998. México, D.F. 1ra Edición. CONACYT.

Manzo Delgado L. López J. (2013). Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS. [Versión electrónica] *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*. Núm. 13.

Martin, M. Chuvieco, E. (1998). Cartografía de Grandes incendios forestales en la península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. [Versión electrónica] *Serie Geográfica*. Núm. 7.

Martin M. y Chuvieco E. (2001). Propuesta de un nuevo índice para la cartografía de áreas quemadas: aplicación a imágenes NOAA-AVHRR y Landsat TM. [Versión electrónica] *Revista de teledetección*. Núm. 16.

Mas J., Díaz-Gallegos J. y Pérez A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. [Versión electrónica] *Investigaciones geográficas*. Núm. 51.

Morrisette J., Barret F. y Liang S. (2006). Special issue on global land product validation. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. [Versión electrónica] Vol. 44. Núm. 7.

Mooser F. (1975). Historia geológica de la Cuenca de México. En: *Memorias de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal*. Departamento del Distrito Federal, México.

Muñoz C., Treviño J, Verástegui J., Jiménez J., y Aguirre O. (2005). Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones geográficas*. Núm. 56. Recuperado en 14 de mayo de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112005000100007&lng=es&tlng=pt.

Muñoz E. (2007). *Los lahares del Popocatépetl: obtención y tratamiento de la información para la prevención de riesgos*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. Fire Information for Resource Management System. FIRMS. Recuperado el 20 julio de 2017. Disponible en: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>

Navazo-Arenas G., Nieto-Masor A., y Moreno-Marcos G. (2015). Análisis de incendios forestales mediante sistemas de Información Geográfica y Teledetección, estudio de caso

en Sierra de Gata. En: *Tecnologías de la Información Geográfica en el Análisis Espacial. Aplicaciones en los sectores Público Empresarial y Universitario*. 1ra Edición.

Opazo Saldivia S. Rodríguez-Verdú F. (2007). Variación espacial de índices espectrales sobre áreas quemadas en Sudamérica. [Versión electrónica]. *Cuadernos de investigación geográfica*. Núm. 33

Peña-Ramírez V. y Bonfil C. (2003). Efecto del fuego en la estructura poblacional y la regeneración de dos especies de encinos (*Quercus Liebmanii* Oerst y *Quercus Magnoliifolia*) en la región de La Montaña (Guerrero), *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. Núm. 72.

Pereira M. Sá A., Sousa A., Silva J., Santos T. y Carreiras J. (1999). Cap. 7 Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. En: *Remote sensing of large wild fires*. Springer. Berlin.

Pérez-Cabello F. y De la Riva-Fernández J. (1998). El empleo de imágenes Landsat TM para la detección y cartografía de áreas incendiadas en el Pirineo occidental Oscence. [Versión electrónica]. *Geographicalia*. Núm. 36.

Quirós Rosado E. (2014). Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicada a la ingeniería civil. España. Universidad de Extremadura. Recuperado el 5 de junio de 2017. En: <http://dehesa.unex.es/handle/10662/3142>

Ressel R y Cruz I. (2012). Detección y monitoreo de incendios forestales mediante imágenes de satélite. CONABIO. *Biodiversitas*, Num. 100.

Rodríguez Trejo A. (1996). *Incendios forestales*. 1ra Edición. Estado de México. MundiPrensa.

Rodríguez Trejo A. (2001) Ecología del fuego en el ecosistema de *pinus hartwegii*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del ambiente*. Vol. 7 Núm. 2.

Rodríguez Trejo A. (2014). *Incendios de vegetación: su ecología, manejo e historia*. 1ra Edición. Estado de México. Colegio de postgraduados.

Rodríguez Trejo, A. y Fule P. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International journal of Wildland Fire*. Vol. 12. Núm. 1.

Saldaña L., Devisscher T. y Espinoza D. (2014). Análisis espacial y temporal de la dinámica de los incendios forestales entre los años 1986-2012 en la cuenca de Zapocó, Santa Cruz Bolivia. (IBIF y FCBC).

Sánchez-González A. y López-Mata L. (2003). Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada Río Frío a lo largo de un gradiente altitudinal. [Versión electrónica]. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*. Vol. 74. Núm. 001.

USGS. United States Geological Survey. Landsat 8. Recuperado el 15 mayo de 2018. Disponible en: <https://landsat.usgs.gov/landsat-8>

USGS. United States Geological Survey. Landsatviewer. Recuperado el 03 agosto de 2017. Disponible en: <https://landsatlook.usgs.gov/>

USGS. United States Geological Survey. Land Processes Distributed Active Archive Center. LP DAAC. Recuperado el 20 julio de 2017. Disponible en: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mcd64a1_v006.

Velázquez, A. Islebe, G. (1995). Comparación fitogeográfica entre las montañas del Centro de México y Guatemala. *Caldasia*. Núm. 17.

Velázquez L. y López K. (2014). Efecto post-incendio en Bosques de pino del trópico seco de Nicaragua. *Ecología Forestal*. Nicaragua.

Wong-González J. y Villers L. (2007). Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones geográficas*. Núm. 62. Recuperado en 14 de mayo de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112007000100006&lng=es&tlng=es.

Zavala Chávez F. (2000). El fuego y la presencia de encinos. *Ciencia ergo-sum. Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*. Núm.7.