



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**Detección de incendios forestales activos utilizando
Landsat-8, en zonas de incendios reportados por
CONAFOR en la temporada 2013-2017**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA :

BERNARDO GÓMEZ DURAN

DIRECTOR DE TESIS:

MTRO. JOSÉ MAURICIO GALEANA PIZAÑA



CIUDAD UNIVERSITARIA, C.d. Mx., 2022.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 ti: Madre, la figura de mujer que representas, tu apoyo, tu amor, tu cariño, tu esfuerzo, tu fortaleza, tus consejos.

A ti: Padre, tu sabiduría, tu entendimiento, tu visión, tus enseñanzas...por tus deseos de que todo sea mejor para mí.

A ti: Tía, tus desvelos, tus desacuerdos, tus alegrías, tus preocupaciones...construyes y recuperas recuerdos, vivencias, memorias y experiencias de nuestras generaciones precedentes.

A ustedes: Mis hermanas, mis hermanos; su fiel, incondicional e intangible apoyo... se cumplió mi anhelado sueño de graduarme. Mis logros son sus logros.

A ustedes: MI FAMILIA.

Agradecimientos

El espacio-tiempo en el que me he visto desenvuelto me permite seguir adquiriendo madurez mental y física, y me permite hacer remembranza de todas aquellas personas significativas con las que he confluído.

En el proceso compartido lleno de variantes toman protagonismo y relevancia muchas personas en los procesos históricos vividos. Permítanme expresarles mi gratitud en las siguientes líneas.

En mis planes de vida no imagine ser parte de la mejor universidad de México, ahora con orgullo soy y siempre seré puma, UNAM.

Uno de los pilares principales e importantes en mi formación académica; tus clases, tu paciencia, tu apoyo, tu aceptación para asesorarme... con tus conocimientos académicos se logró darle sentido y culmen a este proyecto de investigación. Eres y serás mi humilde profesor y asesor: Mtro. Mauricio Galeana.

Su aceptación, su colaboración, su tiempo para revisar, leer y retroalimentar a través de sus conocimientos académicos, ampliaron la calidad del proyecto de investigación: Dra. Lila de Lourdes Manzo, Dra. Rocío Marisol Alanís Anaya, Lic. Flavia Tudela Rivadeneyra, Lic. José Luis Hernández González.

Las clases, las prácticas de campo, los proyectos escolares, las convivencias sociales y deportivas y demás procesos vividos, me hicieron saber que con ustedes amigos míos, la atapa de mi formación académica universitaria ha sido lo mejor que he vivido.

Índice

| | |
|--|-----|
| Índice de figuras | III |
| Índice de tablas | IV |
| Índice de mapas | V |
| Índice de gráficas..... | V |
| ♦ INTRODUCCIÓN ♦..... | 1 |
| ♦ Capítulo 1. Aproximación general de los incendios forestales y la percepción remota ♦..... | 4 |
| 1.1 Concepto y tipos de incendios forestales..... | 4 |
| 1.1.1 Concepto | 4 |
| 1.1.2 Tipos de incendios forestales | 4 |
| 1.2 Combustión y propagación del fuego..... | 5 |
| 1.2.1 Combustión..... | 5 |
| 1.2.2 Propagación..... | 6 |
| 1.3 Factores en el comportamiento del fuego..... | 7 |
| 1.4 Causas de los incendios forestales..... | 8 |
| 1.5 Formas de detección de incendios forestales..... | 9 |
| 1.6 La percepción remota | 10 |
| 1.6.1 Elementos de la percepción remota. | 11 |
| 1.6.2 El espectro electromagnético | 12 |
| 1.7 Tipos de sensores y sus características | 15 |
| 1.7.1 Tipos de sensores | 15 |
| 1.7.2 Resolución de los sensores..... | 16 |
| 1.8 Constelación Landsat..... | 18 |
| 1.8.1 Landsat 8..... | 20 |
| 1.9 Percepción remota y su aplicación en la detección de incendios | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 1.9.1 Detección de incendios: Contexto global | 22 |
| 1.9.2 Detección de incendios: Contexto nacional | 24 |
| ♦ Capítulo 2. Metodología ♦ | 27 |
| 2.1 Recopilación de información y de insumos | 28 |
| 2.2 Datos de incendios forestales en el periodo 2013-2017 | 28 |
| 2.3 Descarga de imágenes de satélite Landsat 8 | 30 |
| 2.4 Procesamiento de las imágenes | 40 |
| 2.5 Corrección atmosférica Landsat 8 OLI-TIRS | 40 |
| 2.6 Algoritmo de detección de incendios forestales | 44 |
| 2.7 Algoritmo para la detección diurna | 45 |
| ♦ Capítulo 3. Resultados y discusión ♦ | 49 |
| 3.1 Resultados | 49 |
| 3.2 Reporte de datos CONAFOR | 49 |
| 3.3 Distribución de incendios forestales en México: 2013-2017 | 50 |
| 3.3.1 Mapas de distribución de incendios forestales | 50 |
| 3.4 Estimación de detección de incendios | 59 |
| 3.5 Evaluación de la estimación | 69 |
| 3.6 Discusión | 73 |
| 3.7 Ventajas y desventajas del algoritmo | 76 |
| 3.7.1 Ventajas | 76 |
| 3.7.2 Desventajas | 76 |
| 3.7.3 Aprovechamiento de la implementación del algoritmo de detección de incendios | 77 |
| ♦ Conclusiones ♦ | 78 |
| Bibliografía | 81 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Tetraedro del comportamiento del fuego. Fuente: Blanco et al., (2008)..... | 7 |
| Figura 1.2 Onda electromagnética y sus componentes. Fuente: Butler et al., (1990)..... | 12 |
| Figura 1.3 El espectro electromagnético. Fuente: Viera (2014) | 13 |
| Figura 1.4 Firma espectral para diferentes tipos de cubiertas. Fuente: ESA (s. f.)..... | 14 |
| Figura 1.5 Cronología, misiones Landsat. Fuente: USGS.b. (2018)..... | 20 |
| Figura 2.6 Diagrama Metodológico. Fuente: Elaboración propia..... | 27 |
| Figura 2.7 Forma de captura de los datos, 2016 – 2017..... | 29 |
| Figura 2.8 Forma de captura de datos de coordenadas de los años 2013 – 2015..... | 29 |
| Figura 2.9 Datos de coordenadas editadas en notación decimal (temporada 2013 – 2017) | 29 |
| Figura 2.10 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2013/06/06 | 34 |
| Figura 2.11 Imagen de satélite 2. Fecha de captura 2013/05/20 | 34 |
| Figura 2.12 Imagen de satélite 3. Fecha de captura 2013/06/20 | 34 |
| Figura 2.13 Imagen de satélite 2. Fecha de captura 2014/04/14 | 35 |
| Figura 2.14 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2014/04/25 | 35 |
| Figura 2.16 Imagen de satélite 4. Fecha de captura 2014/04/14 | 35 |
| Figura 2.15 Imagen de satélite 3. Fecha de captura 2014/06/07 | 35 |
| Figura 2.17 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2015/04/24 | 36 |
| Figura 2.18 Imagen de satélite 2. Fecha de captura 2015/04/26 | 36 |
| Figura 2.19 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2016/05/01 | 37 |
| Figura 2.20 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2016/05/03 | 37 |
| Figura 2.21 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2016/04/01 | 37 |
| Figura 2.22 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2016/06/14 | 37 |
| Figura 2.23 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2017/06/27 | 38 |
| Figura 2.24 Imagen de satélite 2. Fecha de captura 2017/06/17 | 38 |
| Figura 2.25 Imagen de satélite 3. Fecha de captura 2017/01/07 | 38 |
| Figura 3.26 Estructuras urbanas que en condiciones de reflectancia semejan la quema de biomasa | 60 |
| Figura 3.27 Vegetación o condiciones del suelo resultan pixeles falsos | 61 |
| Figura 3.31 Inferior derecha, polígonos | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.30 Inferior izquierda, combinación ecuación 1 y 3 | 62 |
| Figura 3.28 Superior izquierda, color natural | 62 |
| Figura 3.29 Superior derecha, falso color (7, 5, 2)..... | 62 |
| Figura 3.32 A simple inspección visual no se distingue incendio alguno..... | 64 |
| Figura 3.33 Píxeles de fuego en color amarillo indican la presencia de incendios activos | 64 |
| Figura 3.34 Figura referente para poder ilustrar los resultados de cada una de las ecuaciones del algoritmo de fuego | 65 |
| Figura 3.36 Resultado, ecuación 2 | 66 |
| Figura 3.35 Resultado, ecuación 1 | 66 |
| Figura 3.37 Resultado, ecuación 3 | 66 |
| Figura 3.38 Resultado, ecuación 4 | 66 |
| Figura 3.39 Resultado, ecuación 6 | 67 |
| Figura 3.40 Resultado, ecuación 5 | 67 |
| Figura 3.41 Resultado, ecuación 7 | 67 |
| Figura 3.42 Resultado, ecuación 8 | 67 |
| Figura 3.43 Resultado, ecuación 9 | 68 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1 - Principales causas de incendios forestales..... | 9 |
| Tabla 1.2 - Propiedades de algunos sensores utilizados en técnicas de percepción remota | 18 |
| Tabla 2.3 - Descripción general de las imágenes seleccionadas para la implementación del algoritmo de fuego | 31 |
| Tabla 2.4 - Técnicas de corrección atmosférica | 43 |
| Tabla 2.5 - Lista de bandas utilizadas para la implementación del algoritmo de fuego | 45 |
| Tabla 3.6 - Total de incendios e incendios con coordenada 0, (2013-2017)..... | 49 |
| Tabla 3.7 - Promedio anual de incendios por año | 57 |
| Tabla 3.8 - Porcentaje de incendios relacionados con actividades agropecuarias | 58 |
| Tabla 3.9 - Número de incendios forestales reportados a la fecha de captura de las imágenes | 70 |
| Tabla 3.10 - Cantidad final de incendios identificados en las imágenes seleccionadas..... | 71 |
| Tabla 3.11 - Comparación de vegetación y precisión del algoritmo..... | 72 |

Índice de mapas

| | |
|--|----|
| Mapa 1. Imágenes Landsat utilizados para implementación del algoritmo de detección de incendios..... | 33 |
| Mapa 2. Incendios forestales reportados por CONAFOR en 2013..... | 51 |
| Mapa 3. Incendios forestales reportados por CONAFOR en 2014..... | 52 |
| Mapa 4. Incendios forestales reportados por CONAFOR en 2015..... | 53 |
| Mapa 5. Incendios forestales reportados por CONAFOR en 2016..... | 54 |
| Mapa 6. Incendios forestales reportados por CONAFOR en 2017..... | 55 |

Índice de gráficas

| | |
|--|----|
| Gráfica 1. Número de incendios forestales por entidad federativa reportados en 2013..... | 51 |
| Gráfica 2. Número de incendios forestales por entidad federativa reportados en 2014..... | 52 |
| Gráfica 3. Número de incendios forestales por entidad federativa reportados en 2015..... | 53 |
| Gráfica 4. Número de incendios forestales por entidad federativa reportados en 2016..... | 54 |
| Gráfica 5. Número de incendios forestales por entidad federativa reportados en 2017..... | 55 |
| Gráfica 6. Total de incendios forestales por entidad federativa: 2013 - 2017 | 56 |
| Gráfica 7. Cantidad de incendios relacionados con actividades agropecuarias | 58 |

◆ INTRODUCCIÓN ◆

El fuego es una perturbación tanto natural como antropogénica que influye en la distribución, estructura y funcionamiento de los ecosistemas terrestres de todo el mundo. Tanto plantas como animales dependen del fuego para su existencia continua. Otras especies son extremadamente intolerantes a la quema y necesitan protección contra el fuego. Las propiedades de un régimen de fuego están cambiando a medida que los paisajes naturales del mundo se fragmentan y la influencia humana se vuelve omnipresente (Bond & Keane, 2017).

Los incendios también se constituyen como un importante factor de alteraciones que tiene efectos tanto benéficos como negativos. Los incendios afectan no solamente a los bosques y sus funciones y servicios ecosistémicos, sino también a otros bienes materiales, a las vidas humanas y los medios de vida. La expansión incontrolada de la tierra cultivable mediante la invasión de tierras boscosas y el creciente uso de los bosques como espacios recreativos y turísticos incrementan el riesgo de incendios forestales (FAO, 2010).

Es de destacarse que a escala mundial se observa una tendencia del aumento del peligro y el riesgo de los incendios forestales. Dicha tendencia se asocia a factores, tales como: mayor interacción entre las poblaciones humanas y los ecosistemas forestales a causa del avance de la frontera agrícola; la urbanización, la deforestación y fragmentación de los hábitats forestales, por lo que ciertamente los incendios forestales representan un peligro natural, pero el mayor peligro predominantemente está influenciado por el ser humano, el cual en muchos casos puede prevenirlo (DOF, 2014).

La pérdida de cobertura arbórea mundial, ascendió a un récord de 29.7 millones de hectáreas en el año de 2016 según datos de la Universidad de Maryland reportados por (<https://www.globalforestwatch.org>). Dicha pérdida, es 51% mayor que en el año 2015. Y los incendios forestales, parecen ser la causa principal. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, se necesita información adicional sobre la dinámica del fuego en los bosques ecológicos, sus causas e impactos directos y subyacentes y la condición deseada a largo plazo de los ecosistemas, como la estructura del bosque y la composición y la salud de las especies (FAO, 2010).

Debido a este impacto, se tiene la necesidad de dar seguimiento y proponer estrategias que disminuyan las tasas de pérdida de bosques. Para ello la percepción remota es usada como una herramienta de análisis espacial al tener el potencial de enriquecer estudios sobre coberturas vegetales y, tiene aplicaciones en problemas ambientales que de ella se puede derivar. Las características espaciales, temporales y espectrales de los sensores, proveen una amplia gama de posibilidades de uso en aplicaciones (LanNGIF, 2009).

La aplicación de las técnicas de Teledetección espacial al estudio de los incendios forestales es una herramienta de gran utilidad y puede proporcionar información previa, durante o posteriormente al incendio. Debido a su amplio campo de aplicaciones en el estudio de incendios, es una herramienta operativa de gran utilidad en aspectos tales como, la determinación del riesgo de incendios, cartografía, evaluación precisa de superficies incendiadas y la caracterización sistemática de la distribución espacial de los focos de incendios activos (González, 1993). Con la implementación de nuevas técnicas de detección de incendios forestales, como lo son los algoritmos, se potencia la capacidad de crear estrategias de monitoreo y contribuir de manera importante en el estudio de los incendios forestales.

Por lo que, para la presente investigación se tiene como objetivo general:

Analizar los alcances del algoritmo de detección de incendios forestales activos desarrollado por Schroeder *et al.*, (2016), para los datos de Landsat-8 en diversas regiones de México.

Para poder corroborar tal algoritmo en una escala nacional, como complemento también se planteó una serie de objetivos particulares:

- Hacer una búsqueda bibliográfica de las diferentes aproximaciones para poder monitorear incendios con teledetección
- Analizar los censos de incendios forestales desarrollados por la CONAFOR
- Modelar la distribución de los incendios forestales
- Evaluar la confiabilidad del algoritmo de detección de incendios desarrollado por Schroeder *et al.*, (2016), a través de imágenes Landsat 8.

Para la implementación del algoritmo de detección el proyecto de investigación se estructuró a partir de 3 capítulos. En el capítulo 1, se presenta las bases teóricas de las características de los incendios forestales y la ecología del fuego. También una descripción general de la plataforma

Landsat, y como se ha utilizado la percepción remota para la detección de incendios forestales en el mundo y en México. El capítulo 2, está dedicado a la descripción metodológica y la implementación del algoritmo de detección activa de incendios. El capítulo 3, principalmente se centra en los resultados obtenidos del rendimiento y precisión del algoritmo. Dando por terminado el proyecto de investigación con una conclusión final.

◆ Capítulo 1. Aproximación general de los incendios forestales y la percepción remota ◆

1.1 Concepto y tipos de incendios forestales

1.1.1 Concepto

El problema del fuego y su estudio a través de las técnicas de estudio de la percepción remota han sido abordados por diferentes instituciones de investigación, educativas y gubernamentales, cada una generando información e iniciativas para poder contrarrestar los incendios forestales (Cruz-López, 2013).

Los incendios forestales se producen por la combustión de la vegetación del territorio a partir de un fuego originado por causas naturales o por causas humanas. De acuerdo a Plana y colaboradores (2016) se entiende por incendio forestal, la propagación no controlada del fuego sobre la vegetación que encuentra a su paso (árboles, arbustos, pastos y/o cultivos). Aunque a menudo se usa de forma indistinta fuego e incendio, el primero es el elemento, mientras que el segundo se asocia a la expresión del mismo.

A su vez, se considera incendio forestal al fuego que, con una ocurrencia y propagación no controlada, afecta selvas, bosques o vegetación de zonas áridas o semiáridas, por causas naturales o inducidas con una ocurrencia y propagación no controladas o programadas (CENAPRED, 2014).

Puede afectar desde una superficie incipiente hasta miles de hectáreas, ocasionando diversos efectos al suelo, flora y fauna, así como a los bienes y servicios ecosistémicos como: agua disponible en subsuelo, captura de carbono, emisión de oxígeno, alimentación, recreación y composición de la biodiversidad (DOF, 2011).

1.1.2 Tipos de incendios forestales

Según el CENAPRED (2014), los incendios se pueden clasificar en tres tipologías de acuerdo con la ecología del fuego; estos se determinan básicamente por los combustibles que los originan. Y que a continuación se describen.

Incendio de copa, de corona o aéreo. Afecta gravemente a las copas de los árboles y a los ecosistemas, pues destruye a toda la vegetación y en grados diversos daña a la fauna silvestre.

Se propagan a través de éstas si el estrato arbóreo es suficiente denso, cuyo origen generalmente, es mediante la transmisión del fuego de estrato arbustivo del suelo a estrato arbóreo, siempre que exista continuidad vertical del combustible vegetal. Se considera como la forma de propagación más rápida.

Incendio superficial. Daña principalmente pastizales y vegetación herbácea que se encuentra entre la superficie terrestre y hasta 1.5 metros de altura, deteriora en gran medida la regeneración natural y la reforestación. En México es el más frecuente (poco más del 90%).

Incendio subterráneo. Se propaga bajo la superficie del terreno; afecta las raíces y la materia orgánica acumulada en grandes afloramientos de roca. Se caracteriza por no generar llamas y por poco humo, por lo que es muy difícil de detectar (CENAPRED, 2004).

1.2 Combustión y propagación del fuego

Según Vellozas y colaboradores (2010), el comportamiento del fuego puede caracterizarse por los efectos que se producen en el ambiente durante el transcurso de un incendio forestal o de una quema controlada. El comportamiento dependerá de diferentes variables que inciden en la forma como se dispersa, tal es el caso de la combustión y la propagación del fuego. La combustión es una reacción del tipo oxidación de gran velocidad a temperaturas elevadas y se caracteriza por reacciones sucesivas en cadena teniendo como resultado final la liberación de energía (calor) y a veces luz (llama). En la combustión de material forestal, el comburente normal es el oxígeno.

1.2.1 Combustión

De acuerdo a Blanco y colaboradores (2008), el proceso de combustión no es un proceso instantáneo, necesita de una serie de pasos más o menos rápidos en función de las condiciones atmosféricas. Estos se pueden segmentar en tres tipos de combustión:

Calentamiento previo. Si a un combustible forestal se le suministra calor, desde la temperatura ambiental hasta los 100 °C primero va perdiendo contenido de humedad y luego se va calentando, de momento el combustible sigue sin arder.

Pirolisis o rotura a partir del calor. En esta etapa, a partir de los 200 °C también se van vaporizando las resinas acumuladas en el interior del combustible (volátiles o materiales pueden entrar en ignición a temperaturas no muy elevadas).

Punto de ignición. A partir de los 300-400 °C, los gases generados pueden llegar a auto inflamarse donde el combustible ya se encuentra inflamado, todo el calor que genere el combustible, este lo reinvierte en mantener la reacción y en generar más calor que provocará un aumento en la temperatura de los combustibles colindantes.

1.2.2 Propagación

La propagación del fuego a partir de un punto de inicio (ignición) genera el incendio, del que pueden distinguirse las diferentes partes que componen al incendio. Pero debido a su naturaleza, estos no son constantes, sino que pueden cambiar en función de otros factores que posteriormente se describirán (Plana, Font y Serra, 2016).

Según Argentina.gob.ar (2016), (<https://www.argentina.gob.ar>), la propagación es la evolución del incendio en el espacio y en el tiempo y, en los incendios el calor se propaga por 3 principales mecanismos, que a continuación se describen:

Radiación: es un modo de propagación de la energía a través del espacio por ondas, calentando los cuerpos sólidos y líquidos, pasando por el aire sin modificar su temperatura. En los incendios forestales la radiación está directamente ligada a la longitud de las llamas.

Convección: el calor es transportado por las columnas de aire caliente que ascienden debido a diferentes densidades que resultan del gradiente de temperatura en la zona cercana al incendio. Las columnas conectivas combinadas con el viento colaboran a la dispersión de las partículas combustibles incandescentes que vuelan en su interior, llamadas pavesas. Las pavesas pueden originar nuevos focos en un incendio. El aire provee el oxígeno para la combustión.

Conducción: cuando el calor se transmite a través de las moléculas de los cuerpos sin que éstas se desplacen. A diferencia de lo que ocurre con los metales, las maderas son malas conductoras, por lo que en los incendios forestales superficiales o aéreos, esta forma de transmisión de calor

es la que tiene menor influencia. En los incendios forestales subterráneos la conducción es el modo más importante de propagación del fuego.

1.3 Factores en el comportamiento del fuego

Existen diferentes factores que directamente inciden en el comportamiento, la intensidad, la magnitud y la velocidad de propagación de los incendios forestales. Estos se representan a través del tetraedro del comportamiento (figura 1) de acuerdo a los diferentes tipos de incendios (Blanco *et al.*, 2008).

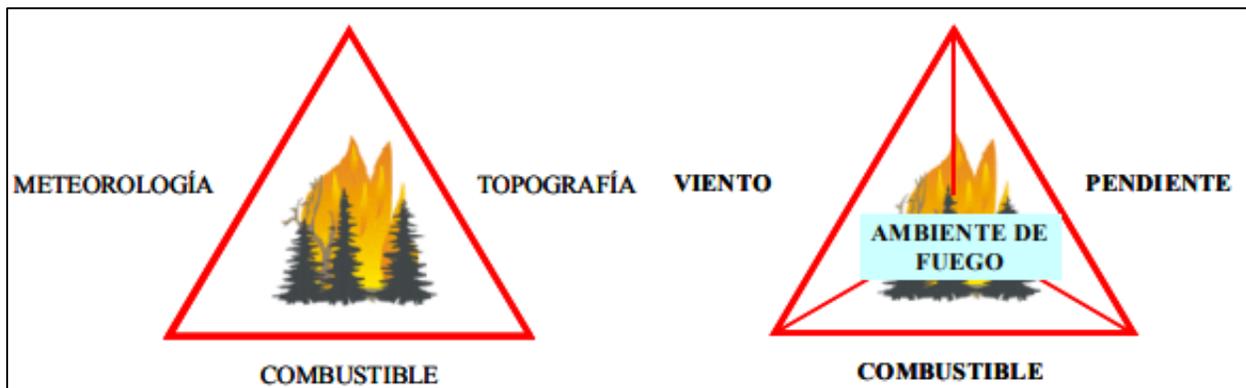


Figura 1.1 Tetraedro del comportamiento del fuego. Fuente: Blanco *et al.*, (2008)

Meteorología. Se descompone en un triángulo cuyos lados son temperatura, humedad relativa y viento, siendo este último un factor importante y el que determinará el tipo de incendio Blanco *et al.* (2008). Al igual, las condiciones meteorológicas constituyen el componente más variable del comportamiento del incendio, debido a los cambios en las masas de aire, a las diferencias entre el ciclo diurno y nocturno, y a los efectos topográficos locales (SEILAF, s. f.).

Topografía. Es el más constante de los tres componentes. La topografía es un factor de carácter fijo de afecta el comportamiento del fuego casi exclusivamente de los rangos de expansión de los incendios. Según Julio (1975), dentro de los factores topográficos más importantes para el comportamiento de un incendio son:

- a) La configuración, tiene especial influencia en las regiones donde existen regímenes de viento y por consiguiente precipitaciones. También afecta a otras variables climáticas, tales como la temperatura y la humedad relativa, que influyen en el comportamiento del fuego

- b) La exposición, influye sobre la vegetación por la alteración que provoca en el efecto de algunas variables climáticas, tales como radiación solar, la evaporación y en general el precalentamiento de los combustibles en el suelo.
- c) La altitud, afecta el comportamiento del fuego en forma parecida a la exposición. Además de los efectos producidos en el caso anterior, influye en la cantidad de oxígeno disponible.
- d) La pendiente, es el más importante de los factores relacionados con la topografía porque produce un efecto de corrientes de aire caliente que pueden incrementar violentamente la velocidad de propagación (anticipa la exposición de los combustibles forestales a la fuente calórica, reduciéndose por lo tanto la duración de la fase de precalentamiento en la combustión).

Combustible. Las características específicas que afectan el comportamiento del incendio son: la carga de combustible, el tamaño y la forma, la compactación, la continuidad horizontal y vertical, y el contenido químico (SEILAF, s. f.).

1.4 Causas de los incendios forestales

El origen del fuego se clasifica principalmente según causa accidental, intencionada, negligente, natural, además de aquellas causas sin evidencia de su origen. La investigación y conocimiento del origen del fuego permite dirimir responsabilidades en caso necesario y articular las políticas preventivas necesarias (Plana, Font y Serra, 2016).

Estas o son naturales o debidas al ser humano. En este último caso, se dividen en accidentales, cuando se provoca un incendio sin haber tenido la intención de iniciarlo y sin que se haya provocado por descuidos en el uso del fuego en el monte; por negligencia, cuando se deriva del uso del fuego en terrenos agrícolas o en el monte y no haber tomado medidas para evitar que se escapara; y por intención, cuando se prende con un propósito determinado, cualquiera que este sea. En diferentes regiones y ecosistemas terrestres, predominaran diferentes causas de incendios, pero en casi todos, el ser humano es el principal agente (Rodríguez, 1996).

En la Tabla 1.1, se menciona de manera más puntual las principales causas.

Tabla 1.1 - Principales causas de incendios forestales

| Causas | Descripción |
|---------------|---|
| Naturales | Las más comunes son los rayos, las menos frecuentes erupciones volcánicas y efusiones de lava, así como las raras chispas provocadas por caídas de piedras, posiblemente combustión espontánea. Se estima que solo el 5% de los incendios forestales son atribuibles a causas naturales. |
| Accidentales | Se encuentran el uso de cohetes y pirotecnia, accidentes automovilísticos, maniobras militares, usos de explosivos e incendios forestales mal liquidados, o escape del fuego en quemas prescritas. |
| Negligencia | Se manifiesta en la limpia con fuego de derechos de vía y caminos, fogatas mal apagadas de paseantes, campesinos, trabajadores y peregrinos, quema de basureros, hornos de carbón, quema de maleza en terrenos de cultivo, quema mal conducida de desechos de aprovechamiento, sistema roza, tumba y quema. |
| Intencionales | Cambiar progresivamente los usos del suelo de forestal a agrícola, ganadero, frutícola o urbano, el dolo o venganza debido a litigios por terrenos, problemas personales o contra dependencias gubernamentales, cazadores, eliminación de plagas de animales e insectos dañinos o vegetación indeseables. |

Fuente: (Rodríguez, 1996).

1.5 Formas de detección de incendios forestales

La detección comprende una serie de actividades destinadas a percatarse de la existencia de un incendio. Esta actividad puede hacerse por medios terrestres o aéreos. En el primer caso, puede ser fija, mediante torres-observatorio y puestos fijos de observación, o móvil, vía patrullaje. Para la detección aérea se realiza desde helicópteros o aviones. Aunque resulta costosa la operación de estos aparatos, cubren el 100% de una gran superficie en poco tiempo. Con vuelo en helicóptero se puede indagar mucho sobre las características del comportamiento del incendio y para observar el desarrollo del fuego (Rodríguez, 1996).

De acuerdo a Hernández (2016), actualmente se utilizan diferentes métodos para la detección del fuego forestal, los cuales se enriquecen con los avances tecnológicos, en particular de la electrónica, la computación y las comunicaciones inalámbricas. Tal es el caso de los sensores remotos, los cuales son utilizados para facilitar el estado de alerta cuando se presentan condiciones ambientales críticas las cuales favorecen la aparición y la dispersión acelerada del fuego convirtiéndolo en un incendio forestal.

Así, la detección temprana a través de estos, está concebida para dar la alarma cuando se ha iniciado el fuego, ya que de igual manera los sensores tienen la capacidad de detectar variables indicadoras de la existencia del fuego, como: las variables de naturaleza química (emisiones de humo, CO, CO₂, CH₄) y las variables de naturaleza física (radiación infrarroja y el calor).

1.6 La percepción remota

La Percepción Remota aparece inicialmente durante las primeras misiones interplanetarias de sondas espaciales no tripuladas, a bordo de las cuales se instalaron cámaras digitales con CCD (dispositivo de carga acoplada) para la captura y envío a la Tierra de imágenes correspondientes a regiones selectas de la superficie de otros planetas (Lira, 2011).

Lira (2011), señala también que el desarrollo de esta ciencia, por su aplicación novedosa en la prospección del medio ambiente, se ha visto involucrado tradicionalmente al estudio de los fenómenos que ocurren en la superficie terrestre, al estudio de los fenómenos meteorológicos y al análisis de los elementos que componen el paisaje.

De aquí que la percepción remota se haya definido en su desarrollo histórico como: *“La obtención de información acerca de una escena, utilizando luz visible, infrarroja y radiación de microondas, por medio del análisis automatizado de datos obtenidos a distancia por medio de un sistema formado por un grupo de sensores remotos”* (Lira, 2011).

1.6.1 Elementos de la percepción remota.

Un sistema de percepción remota o teledetección incluye varios elementos que interactúan entre sí, y que son esenciales para poder obtener información de la superficie terrestre, y que a continuación se enlistan y describen según (Chuvieco, 2008).

- *Fuente de iluminación o energía.* Supone el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede tratarse de un foco externo a este, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por el sensor. La fuente de energía más importante es el sol, pero también puede realizarse teledetección a partir de la energía emitida por los mismos objetos observados, o desde fuentes artificiales.
- *Cubierta terrestre o relieve.* Formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía, y la reflejan de acuerdo a sus características físicas.
- *Sistemas sensor.* Compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que los alberga. Capta la energía procedente de las cubiertas terrestres, la codifica y graba o envía directamente al sistema de recepción.
- *Sistema de recepción-comercialización.* En donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado, y tras las oportunas correcciones, se distribuye a los interesados.
- *Interprete.* Convierte esos datos en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente, de cara a facilitar la evaluación del problema de estudio.
- *Usuario final.* Encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como dictaminar sobre las consecuencias de que de él se deriven.

1.6.2 El espectro electromagnético

El espectro electromagnético se denomina como el conjunto de ondas electromagnéticas o, más concretamente, a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia (SEMAR, 2009).

En el campo de la percepción remota se trabaja fundamentalmente con un tipo de energía, es decir con la radiación electromagnética. Existen dos modelos para explicar sus propiedades.

Teoría ondulatoria: cualquier partícula con una temperatura sobre el cero absoluto genera una vibración, que a su vez origina una serie de perturbaciones tipo “ondas” que se desplazan a través del campo eléctrico y campo magnético. Estas ondas actúan como una fuente de radiación y viajan desde la fuente hacia el infinito a una velocidad constante, conocida como la velocidad de la luz (figura 1.2). La distancia entre crestas de una onda y otra es la longitud de onda (λ) de la radiación. El número de crestas por segundo pasando por un mismo punto es su frecuencia (f).

Teoría cuántica: establece que todo cuerpo radiante es capaz de emitir energía electromagnética de forma discreta y no continua, cuya magnitud es un múltiplo entero de un número específico (Hernández, 2011).

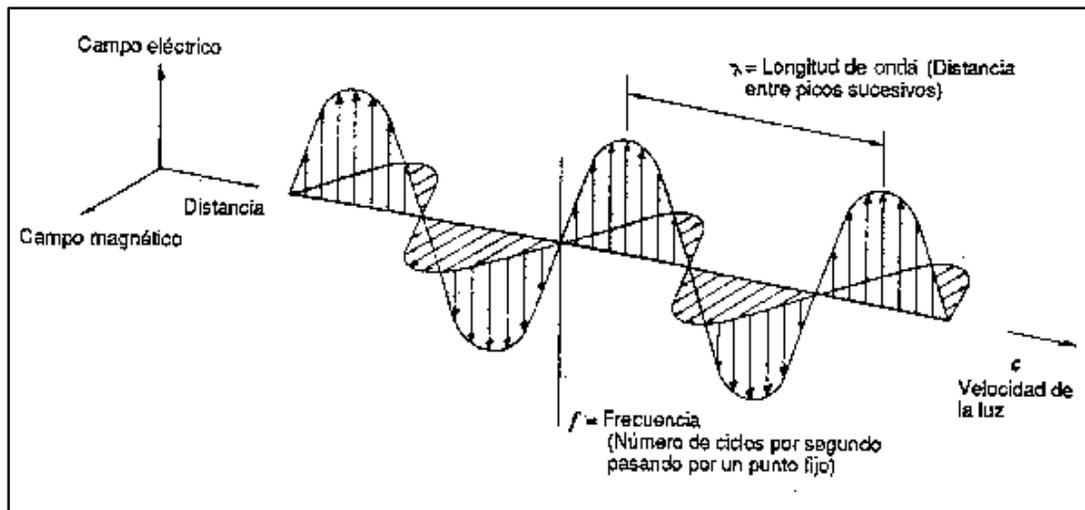


Figura 1.2 Onda electromagnética y sus componentes. Fuente: Butler *et al.*, (1990)

Es subdividido en franjas, representando regiones que poseen características peculiares en términos de los procesos físicos, generadores de energía en cada franja, o de los mecanismos físicos de detección de esta energía (figura 1.3). Estas divisiones son arbitrarias ya que el espectro electromagnético, por definición, es un continuo de energías que va desde kilómetros hasta nanómetros de longitud de onda, y estas categorías se pueden subdividirse a un más (Reuter, 2009). Los límites entre estas distintas regiones del espectro son difusos, y generalmente dependen de las técnicas empleadas para detectar y producir la radiación en esos rangos de frecuencia (LAEFF, s.f.).

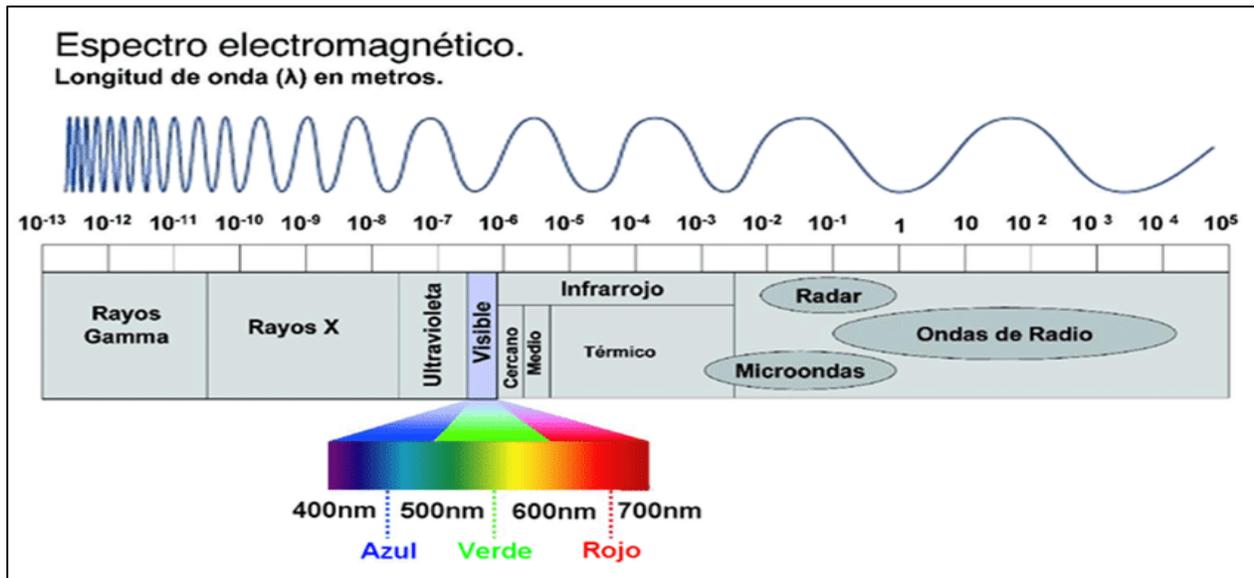


Figura 1.3 El espectro electromagnético. Fuente: Viera (2014)

Una vez que la energía electromagnética llega a la superficie terrestre, interactúa con cada tipo de material ya sea por reflexión, absorción o transmisión, de acuerdo a un patrón de respuesta espectral particular. Este comportamiento distintivo de cada tipo de material es aprovechado en procesos de clasificación de imágenes, siendo común referirse a él como “firma espectral” (figura 1.4). La firma espectral se define como el comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada o emitida desde algún tipo de superficie u objeto terrestre en los distintos rangos del espectro electromagnético (Hernández, 2011).

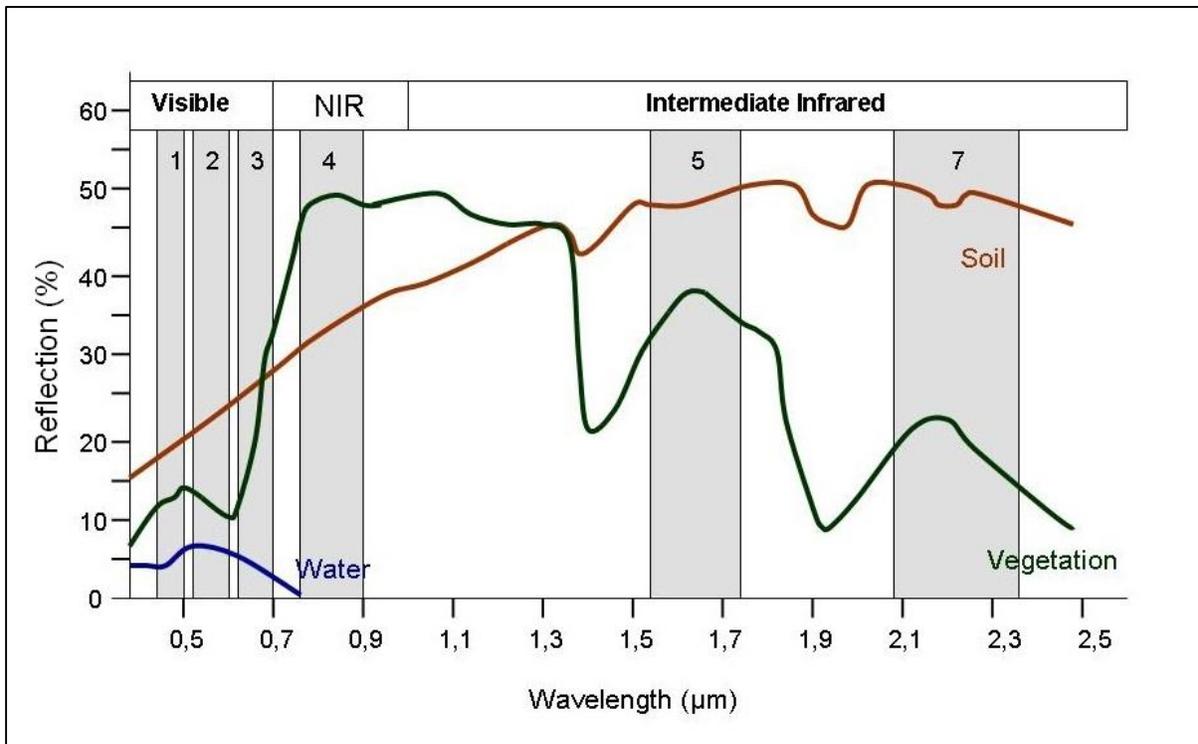


Figura 1.4 Firma espectral para diferentes tipos de cubiertas. Fuente: ESA (s. f.)

Las principales bandas espectrales más frecuentes empleadas con la tecnología actual, desde punto de vista de la percepción remota son las siguientes (Chuvienco, 2008).

1. **Espectro visible** ($0.4 \mu m - 0.7 \mu m$). Es la única radiación electro-magnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región se distinguen tres bandas elementales que se denominan *azul* (A: $0.4 \mu m - 0.5 \mu m$), *verde* ($0.5 \mu m - 0.6 \mu m$), y *rojo* (R: $0.6 \mu m - 0.7 \mu m$), en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.
2. **Infrarrojo cercano** (IRC: $0.7 \mu m - 1.3 \mu m$). Parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Resulta especial importancia por su capacidad de discriminar masas de vegetales y concentraciones de humedad.
3. **Infrarrojo medio** ($1.3 \mu m - 8 \mu m$). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Infrarrojo de onda corta (Short Wave

Infrared, SWIR), ($1.3 \mu m - 2.5 \mu m$) y resulta idóneo para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. Infrarrojo medio (IRM), ($3 \mu m - 5 \mu m$), es determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos).

4. **Infrarrojo lejano o térmico** (ITR: $8 \mu m - 14 \mu m$). Incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
5. **Micro-ondas** (*M*, por encima de $1mm$). Con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa (Chuvieco, 2008). Debido a que es una radiación de grandes longitudes de onda, es capaz de penetrar nubes, niebla y lluvia (Hernández, 2011), por sus mismas características tiene muchas aplicaciones como por ejemplo en; comunicación satelital; radar doppler para el seguimiento de huracanes y tornados (Fontal, 2005).

1.7 Tipos de sensores y sus características

1.7.1 Tipos de sensores

Los sensores son instrumentos susceptibles de detectar la señal electromagnética (Radiación reflejada o emitida) que les llega de la tierra y la atmósfera y convertirla en una magnitud física que puede ser tratada y grabada. Los sensores pueden convertir la señal electromagnética en un formato análogo (fotografía) o digital (imagen). Las características de la imagen registrada dependen en gran medida del tipo de sensor utilizado y de la distancia al suelo desde la cual se realiza la adquisición de datos (IGAC, 2007).

Los sensores se clasifican dependiendo del origen de la señal captada. Generalmente son clasificados como sensores pasivos y activos (IGAC, 2007).

Sensores Pasivos. Se limitan a recoger la energía electromagnética procedente de las cubiertas terrestres, ya sea está reflejada de los rayos solares o ya emitida en virtud de su propia temperatura. Este tipo de sensor suele clasificarse dependiendo del procedimiento que emplean para recibir la radiación procedente de los objetos. El primer grupo está constituido por sensores

fotográficos (por ejemplo las cámaras fotográficas), el segundo grupo están los sensores óptico electrónicos (exploradores de barrido y empuje y las cámaras de vidicon) y en el tercer grupo los sensores de antena (radiómetros de micro-ondas).

Sensores Activos. Estos sensores son capaces de emitir un haz energético que, posteriormente, recogen tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. El más conocido es el RADAR, radiómetro activo de micro-ondas, que trabaja en una banda comprendida entre 0.1 cm y 1 m. El LIDAR emite pulsos de luz polarizada entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano. La principal desventaja de este tipo de sensores (activos) es su baja resolución espacial (IGAC, 2007).

1.7.2 Resolución de los sensores

Los sensores presentan una serie de capacidades que sirven para definir una serie de características de las imágenes de satélite denominada resolución, que sirven para identificar el detalle espacial, espectral, radiométrico y temporal (Labrador *et al.*, 2012).

Resolución espacial. Es una medida de la distancia angular o lineal más pequeña que puede captar un sensor remoto de la superficie de la Tierra, y viene representada por un píxel. (Un píxel es la unidad mínima que conforma una imagen digital). La longitud medida sobre el terreno de un lado del píxel define la resolución espacial del sensor y se suele expresar en metros o metros/píxel. Cuanto mayor sea la resolución espacial, es decir, menor superficie represente un píxel de la imagen, más pequeños serán los objetos que se pueden distinguir en la superficie y viceversa (Labrador *et al.*, 2012).

Resolución Espectral. Se define la resolución espectral de un sensor como el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar. Un incremento en la resolución espectral resultará en un número mayor de canales o bandas espectrales. Sin embargo, esta resolución adicional supone también un costo en términos de volumen de datos e incremento del costo de procesamiento (Labrador *et al.*, 2012).

Resolución Radiométrica. Se define como la cantidad mínima de energía requerida para incrementar el valor de un píxel en un nivel digital (ND). Asimismo, se define la amplitud o extensión radiométrica como el intervalo dinámico, o máximo número de niveles digitales, que pueden ser detectados por un sensor particular. Suele expresarse mediante el número de bits necesarios que se precisan para almacenar cada píxel. Cuanto mayor sea la precisión radiométrica mayor número de detalles podrán captarse en la imagen (Labrador *et al.*, 2012).

Resolución Temporal. La resolución temporal es el ciclo de repetición, o intervalo de tiempo, entre dos adquisiciones de imágenes sucesivas de una misma porción de la superficie y depende, en gran medida, de las características orbitales del satélite. De igual manera, depende principalmente de tres factores: capacidad de reorientación del sensor a ambos lados de la línea de paso del satélite, del ancho de barrido y de la latitud, dado el caso de órbitas cuasi polares, a mayor latitud, menor periodo de revisita (Labrador *et al.*, 2012).

En la tabla 1.2 se muestran algunos satélites usados en técnicas de percepción remota y sus diferentes resoluciones.

Tabla 1.2 - Propiedades de algunos sensores utilizados en técnicas de percepción remota

| Sistema (año de lanzamiento) | Número de bandas | Resolución | | | |
|------------------------------|------------------|--------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| | | Espacial (m) | Radiométrica (bits) | Espectral (μm) | Temporal (Días) |
| GeoEye-1 (2008) | 5 | 0.41 (Pan) | 11 | 450-800 | 3 |
| | | 1.65 (MS) | | 450-920 | |
| QuickBird (2001) | 4 | 0.61(Pan) | 11 | 445-900 | 2-4 |
| | | 2.44 (MS) | | 450-900 | |
| RapidEye (2008) | 5 | 6.5 (MS) | 12 | 440-850 | 1 |
| WorldView-2(2009) | 8 | 0.5 (Pan) | 11 | 450-800 | 1 |
| | | 1.8 (MS) | | 400-1040 | |
| Ikonos (1999) | 4 | 0.82 (Pan) | 11 | 459-800 | 1-3 |
| | | 3.28 (MS) | | 450-920 | |

Fuente: (Labrador *et al.*, 2012).

1.8 Constelación Landsat

Landsat representa la colección de datos de teledetección de resolución moderada con cuatro décadas de registro de imágenes, por lo que se considera un programa único por que proporciona un recurso para quienes trabajan en agricultura, geología, silvicultura, planificación regional, educación, mapeo e investigación sobre el cambio global. Las imágenes de Landsat también son invaluable para la respuesta de emergencia de desastres (USGS.a, 2018).

Como una iniciativa conjunta entre el Servicio Geológico de los Estados Unidos (EE. UU). (USGS) y la NASA, el Proyecto Landsat y los datos que recopila, apoyan a comunidades gubernamentales, comerciales, industriales, civiles, militares y educativas en EE.UU. y el mundo. El proyecto Landsat es una parte integral del componente de misiones de teledetección del Programa de Teledetección Terrestre (LRS) del USGS (USGS.a, 2017).

A mediados de la década de 1960, estimulado por la guerra fría y la conquista del espacio, propicio la exploración planetaria desde el espacio utilizando satélites de teledetección no tripulados,

resultado de esto, fue el anuncio del 21 de septiembre de 1966, donde el Secretario del Departamento del Interior, el Departamento del Interior, la NASA y el Departamento de Agricultura se embarcaron en un ambicioso esfuerzo para desarrollar y lanzar el primer satélite civil de observación de la Tierra (USGS, 2016). Su objetivo se logró el 23 de julio de 1972, con el lanzamiento del Satélite de Tecnología de Recursos de la Tierra (ERTS-1), que más tarde fue renombrado Landsat 1. Los lanzamientos de Landsat 2, Landsat 3 y Landsat 4 siguieron en 1975, 1978, y 1982, respectivamente (USGS, 2016).

El Landsat 5 se puso en marcha en 1984, para continuar ofreciendo alta calidad de datos globales de la superficie terrestre durante 28 años y 10 meses. En 1993 el Landsat 6 no pudo alcanzar la órbita. Landsat 7 fue lanzado con éxito en 1999 y, junto con Landsat 8, que se lanzó en 2013, sigue proporcionando datos globales diarios y está previsto poner en marcha el Landsat 9 a finales de 2020 (USGS.b, 2017).

Landsat 9 llevará el Operational Land Imager 2 (OLI-2) y el sensor térmico infrarrojo 2 (TIRS-2). Pasará a la órbita actual de Landsat 7 y tomará imágenes de la Tierra cada 16 días en una compensación de 8 días con Landsat 8. Recopilará hasta 750 escenas por día, y con Landsat 8, los dos satélites agregarán casi 1,500 escenas nuevas por día al USGS. Archivo Landsat. (USGS, 2019).

Esta serie de satélites se inició en el año 1972 con el lanzamiento de la misión Landsat-1 y desde entonces ha producido el registro histórico más largo y continuo de la superficie de la Tierra vista desde el espacio (figura 1.5).

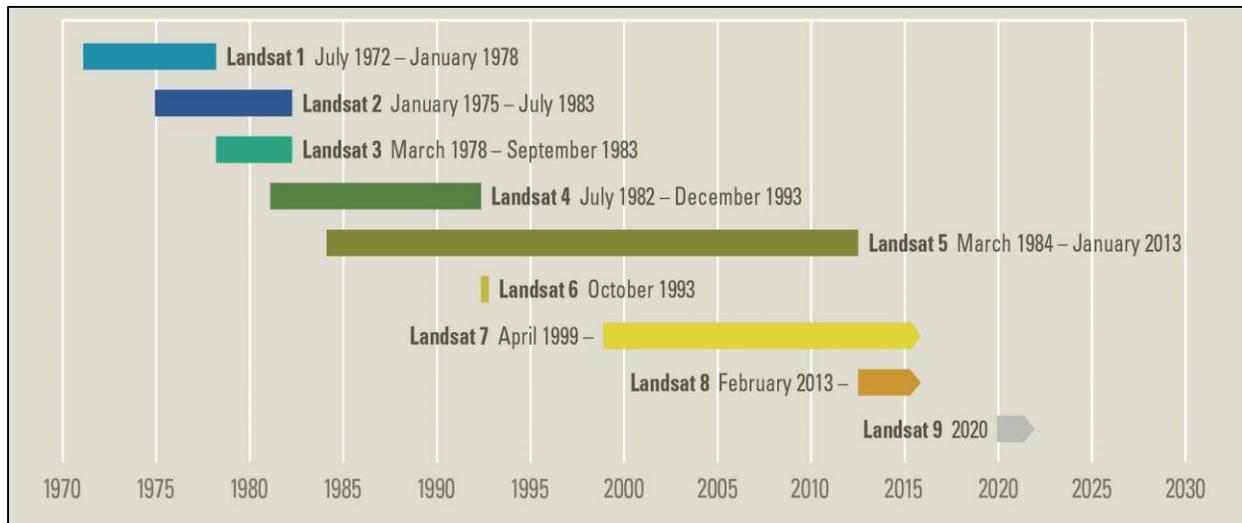


Figura 1.5 Cronología, misiones Landsat. Fuente: USGS.b. (2018)

1.8.1 Landsat 8

Landsat 8, se lanzó el 11 de febrero de 2013, y está compuesto por dos instrumentos: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). Estos dos sensores proporcionan una cobertura estacional de la masa terrestre global a una resolución espacial de 30 metros (visible, NIR, SWIR); 100 metros (térmico); y 15 metros (pancromático) (NASA.a, 2018).

El satélite Landsat 8 fue desarrollado como una colaboración entre la NASA y el Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS, por sus siglas en inglés). La NASA dirigió las fases de diseño, construcción, lanzamiento y calibración en órbita, tiempo durante el cual el satélite se llamó Misión de Continuidad de Datos Landsat (LDCM, por sus siglas en inglés). Así para el 30 de mayo de 2013, USGS asumió las operaciones de rutina y el satélite se convirtió en Landsat 8. La USGS dirige actividades de calibración posteriores al lanzamiento, operaciones satelitales, generación de productos de datos y archivo de datos en el centro de Observación y Ciencia de Recursos Terrestres (EROS) (NASA.a, 2018).

Los instrumentos que componen Landsat 8 representan un avance evolutivo en la tecnología. OLI que mejora los sensores Landsat anteriores utilizando un enfoque técnico demostrado por un sensor volado en el satélite experimental EO-1 de la NASA. OLI es un sensor de barrido transversal con un telescopio de cuatro espejos y una cuantificación de 12 bits. OLI recoge datos de bandas espectrales infrarrojas visibles, infrarrojas y de onda corta, así como una banda pancromática. Tiene

una vida de diseño de cinco años. Proporciona dos nuevas bandas espectrales, una adaptada especialmente para detectar nubes cirrus y la otra para las observaciones de la zona costera (NASA.a, 2018).

De igual manera, el sensor de Infrarrojos Térmico (TIRS) recopila datos para dos bandas espectrales más estrechas en la región térmica, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra, anteriormente cubierta por una amplia banda espectral en Landsats 4-7. Los datos TIRS de 100 m se registrarán en los datos OLI para crear productos de datos de 12 bits corregidos radiométricamente, geoméricamente y en terreno (NASA.a, 2018).

Se requiere que Landsat 8 devuelva 400 escenas por día al archivo de datos del USGS (150 más de lo que se requiere para capturar Landsat 7). Esto aumenta la probabilidad de capturar escenas libres de nubes para la masa terrestre global con un tamaño de escena de 185 km de recorrido transversal por 180 km a lo largo de la pista (NASA.b, 2018).

1.9 Percepción remota y su aplicación en la detección de incendios

La percepción remota tiene un gran potencial para comprender, predecir y evaluar los efectos ecológicos de los incendios. Además de tener la capacidad para detectar y cuantificar las emisiones de incendios locales y regionales, al igual tiene un gran potencial para estudiar la heterogeneidad a pequeña escala en los efectos del fuego en grandes áreas. También se tiene la capacidad de recolectar datos para abordar las características previas, activas y posteriores en diferentes escalas espaciales y áreas remotas de los incendios. Sin embargo, la influencia del fuego abarca una amplia gama de escalas temporales y espaciales y, la interpretación de los factores causales, los efectos del fuego y las respuestas ecológicas es un desafío para la investigación y la gestión (Lentile *et al*, 2006).

La percepción remota ha sido ampliamente utilizada en la detección de incendios forestales. En la actualidad, la mayoría de los algoritmos de detección de incendios basados en satélites detectan las anomalías térmicas producidas por las altas temperaturas de los combustibles quemados en las bandas de infrarrojo de media onda (MWIR) y de infrarrojo de onda larga (LWIR). Esos algoritmos se pueden dividir en métodos de detección de una sola fecha y multitemporales según el número de imágenes de origen (Lin *et al*, 2016).

Los algoritmos de fuego comparan la temperatura de un incendio potencial con la temperatura de la cobertura terrestre a su alrededor; si la diferencia de temperatura está por encima de un umbral determinado, el posible incendio se confirma como un incendio activo o "punto caliente". Ya que los incendios activos se ubican sobre la base de las llamadas anomalías térmicas producidas por ellos (European Commission, 2018).

1.9.1 Detección de incendios: Contexto global

Desde las últimas décadas del siglo pasado, se empezaron a utilizar datos satelitales para monitorear la actividad global de incendios forestales, se implementaron nuevas técnicas, como los algoritmos con la capacidad para detectar la ubicación de los incendios que se encuentran activos en el momento del sobrevuelo del satélite, y el de mapeo de las áreas quemadas (Kumar & Roy, 2017).

Los instrumentos satelitales de la NASA suelen ser los primeros en detectar incendios forestales en regiones remotas y, las ubicaciones de los nuevos incendios se envían directamente a los administradores de tierras en todo el mundo a las pocas horas del paso a desnivel del satélite. Estos instrumentos detectan incendios activos, rastrean el transporte de humo de incendios, proporcionan información para el manejo del fuego y trazan la magnitud de los cambios en los ecosistemas, en la extensión y severidad de las cicatrices de quemaduras (NASA.b., 2018).

Una de las primeras aportaciones fue de Matson y Dozier (1981), que presentaron un trabajo científico en donde se implementó un algoritmo capaz de aprovechar y detectar el elevado resplandor del fuego a través de las longitudes de onda más largas. Con ayuda de los sensores a bordo del satélite ambiental NOAA-6 de tercera generación, que proporcionaban la capacidad para detectar fuentes de alta temperatura a escala de sub-resolución, y que estimaban tanto la temperatura como el tamaño de tales fuentes.

Otro trabajo de gran relevancia es el de Schroeder y colaboradores (2005), quienes presentaron un estudio que pretendía analizar los datos de puntos calientes del AVHRR en el tablero NOAA-12, y el MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua para describir la dinámica de los incendios en Brasil. En este trabajo se utilizaron los algoritmos de detección de incendios para los productos de fuego AVHRR y MODIS, resaltando los sesgos en los recuentos de incendios diarios desde el ángulo de visión del satélite, el tiempo de sobrepaso, las condiciones atmosféricas y las

características del fuego. Además, evaluaron las tendencias en la dinámica del fuego a tres escalas espaciales: biomas principales en Brasil, los nueve estados de la Amazonia Legal brasileña y dos importantes corredores viales en la región amazónica.

Por su parte Kant y colaboradores (2000), desarrollaron un algoritmo para la detección de zonas activas de incendios utilizando datos NOAA AVHRR, para los bosques centrales del Indo-Himalaya en la India, y que tuvo como objetivo principal determinar una metodología para la detección de incendios utilizando temperaturas de brillo calculadas a partir de los datos en los canales 3 y 4 de AVHRR. Ya que la medición en los canales térmicos del sensor AVHRR puede usarse para detectar incendios de vegetación a través del efecto de la combustión sobre la temperatura radiativa y dependiendo de la temperatura y el tamaño relativo a la resolución del sensor, un incendio activo aumentará la temperatura de brillo del píxel por encima de la del fondo.

Schroeder y colaboradores (2014), analizaron el uso del conjunto complementario de canales VIIRS de 375 m de resolución para la detección activa de incendios, a fin de aprovechar al máximo la información espacial más fina proporcionada por esos datos. Al incluir dos bandas centradas en las regiones de infrarrojo medio y térmico. Cumplieron con los requisitos espectrales básicos para la aplicación de algoritmos de detección de incendios basados en la respuesta radiométrica diferencial de objetivos de alta temperatura representados en esas dos regiones espectrales. El algoritmo de detección de incendios activo que propusieron para los datos de resolución VIIRS de 375 m se basa en las anomalías térmicas y de fuego de MODIS.

Por su parte Giglio y colaboradores (2016), presentaron un algoritmo actualizado que pretendía abordar limitaciones observadas con el fuego en el anterior producto de la Colección 5 de fuego MODIS, especialmente la aparición de falsas alarmas causadas por pequeños claros del bosque, y la omisión de grandes incendios ocultos por el humo denso. El procesamiento también se amplió a los océanos y otras grandes masas de agua para facilitar el monitoreo de la quema de gas en alta mar.

El objetivo del algoritmo de detección es identificar "píxeles de fuego" que contengan uno o más incendios de combustión activa en el momento del paso a nivel del satélite. Con esto, el algoritmo finalmente clasifica cada píxel de la franja MODIS como datos faltantes, nube, no fuego, incendio o desconocido. Y los píxeles indicados tentativamente como que contienen incendios activos se someten a una serie de pruebas de rechazo de falsa alarma.

De igual manera Kumar y Roy (2017) realizaron un estudio a través de un algoritmo actualizado y mejorado de los dos algoritmos de detección de incendios activos específicos Landsat-8 OLI, presentados anteriormente por Murphy y colaboradores (2016) y Schroeder y colaboradores (2016). Este utiliza enfoques de detección de incendios contextuales activos establecidos, pero aprovecha el aumento significativo de la reflectancia del fuego en la banda 7 del satélite Landsat-8.

El algoritmo, Global Operational Land Imager (GOLI) que presentan, tiene una serie de errores de omisión y de comisión comparables a los recientes algoritmos de detección de incendios activos Landsat-8; tiene un potencial demostrable para la aplicación global y es adecuado para su implementación con otros sensores de longitud de onda reflectante tipo Landsat. Debido a que en la mayoría de situaciones el fuego e incendios forestales tienen una naturaleza efímera, los algoritmos de detección activos de incendios se han desarrollado predominantemente para satélites de alta resolución espacial (Kumar y Roy, 2017).

Debido a que el objetivo de la presente investigación es llevar a cabo la comprobación de un algoritmo de incendio activo, es importante señalar que la detección de incendios activa del satélite Landsat-8 se basa en algoritmos anteriores desarrollados para ASTER y Landsat-7 ETM+. Ambas metodologías utilizaran uno de dos canales umbral fijo más enfoque contextual para explorar la respuesta diferencial radiométrica de la SWIR (canal 8 en ASTER; canalizar 7 en ETM+) y el NIR (canal 3 N en ASTER; canal 4 en ETM+) de datos para clasificar píxeles afectados por el fuego (Schroeder *et al.*, 2016).

1.9.2 Detección de incendios: Contexto nacional

En México, también se han realizado una diversidad de esfuerzos para contrarrestar la cantidad de incendios forestales que cada año se presentan en país. La mayor parte de la investigación y monitoreo de los incendios es llevada cabo por dependencias de gobierno, algunos centros de investigación e instituciones educativas (Cruz-López, 2013).

Unas de las instituciones de gobierno que más ha contribuido en el monitoreo de incendios es la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). En 1999, implementó un sistema para la detección de puntos de calor (como indicador de posibles incendios forestales) utilizando imágenes diurnas y nocturnas del sensor AVHRR (Advanced Very High

Resolution Radiometer) a bordo de los satélites de la serie NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). En el 2001, incorporó para la detección de puntos de calor los sensores MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo de los satélites Aqua y Terra de la NASA, y se mejoró el algoritmo de detección de puntos de calor. Estos productos conforman el Sistema de Alerta Temprana de Incendios para México y Centroamérica (Cruz-López *et al*, 2011).

Por su parte, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en cooperación con el Área de Análisis Satelital (SAB) de la NOAA-NESDIS, intercambia información y técnicas de procesamiento de datos, y transmite la información de puntos de calor obtenidos por diferentes sensores como el MODIS, AVHRR y del satélite GOES en tiempo real, que han convertido a este programa en el Sistema de alerta temprana de incendios forestales, prevención y posibles escenarios para situaciones relacionados con los incendios forestales (SMN, s.f.).

Los datos procesados provienen de los satélites AQUA y TERRA a través del sensor MODIS de la NASA, así como de los satélites NOAA15, 18, 19 y METOP a través del sensor AVHRR. Se utilizan además los canales visibles e infrarrojo reflectivo de los satélites GOES. Los algoritmos de procesamiento de los datos satelitales para la detección automática de focos de calor relacionados a incendios forestales, fueron desarrollados por la NASA para el caso del sensor MODIS, por la NOAA-NESDIS para procesar datos de los satélites NOAA (algoritmo FIMMA) SMN (s.f.)

Dentro de la literatura sobre la detección incendios forestales en México, se destaca el trabajo de Martínez y colaboradores (2004), quienes describen la implementación de un algoritmo contextual de detección de fuegos con imágenes GOES, el algoritmo fue nombrado ADFFA (Algoritmo de Detección de Fuegos en Activo), y fue creado para dar seguimiento y analizar la temporada de quema de biomasa del 2003, en la región sureste de México y, norte de Centroamérica.

Cheng y colaboradores (2013) realizaron un estudio en el sur de Yucatán para evaluar el rendimiento de los productos térmicos y térmicos activos MODIS en comparación con los datos detallados del informe de incidentes de incendios proporcionados por la agencia regional de manejo forestal, y respaldados por las investigaciones de campo realizadas durante la severa temporada de incendios de 2011.

De igual manera Camacho y colaboradores (2015) proponen un sistema de detección de incendios forestales en su etapa inicial, utilizando una red de sensores inalámbricos y métodos de fusión de información. La principal contribución de este trabajo es la implementación de un algoritmo de baja complejidad computacional, con la capacidad de detectar un evento de incendio utilizando solo la información de dos sensores: temperatura y humedad.

En el contexto de la percepción remota o teledetección, los algoritmos generalmente especifican cómo determinar los productos de datos de nivel superior a partir de datos de código de nivel inferior. Por ejemplo, los algoritmos prescriben cómo se determinan los perfiles de temperatura y humedad atmosférica a partir de un conjunto de observaciones de radiación detectadas originalmente por instrumentos de sondeo de satélite (USGS.c., 2018), por esto, es conveniente contar con herramientas para monitorear los incendios y sus procesos de manera consistente, rápida, precisas y a bajo costo.

◆ Capítulo 2. Metodología ◆

En el presente capítulo se explica los pasos metodológicos para la implementación de un algoritmo de detección de incendios y su verificación con registro oficiales de la CONAFOR (figura 2.6).

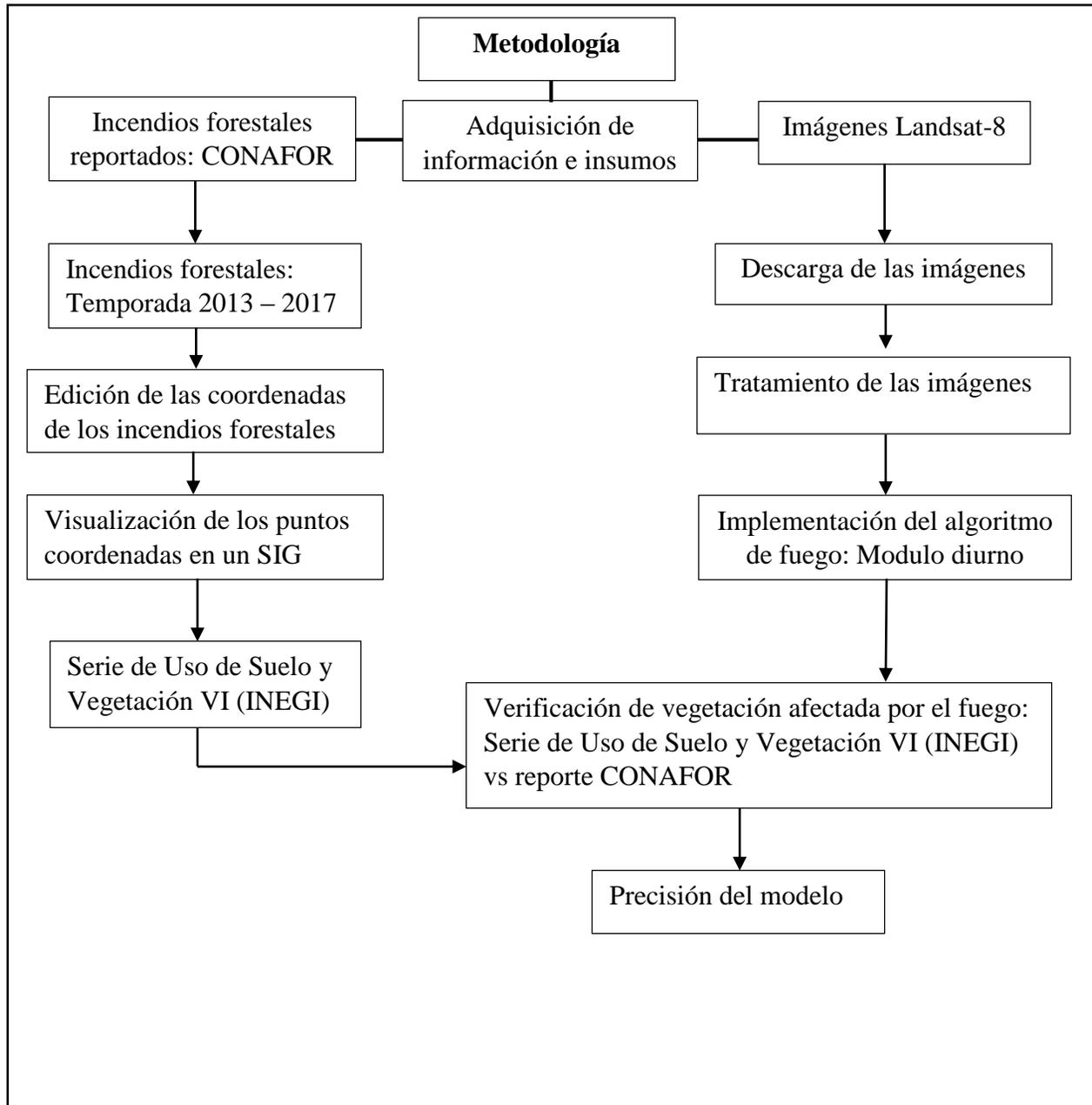


Figura 2.6 Diagrama Metodológico. Fuente: Elaboración propia

2.1 Recopilación de información y de insumos

Para el desarrollo metodológico del trabajo de investigación propuesto, se realizó una revisión bibliográfica de artículos de investigación sobre el tema orientado a técnicas de detección de incendios forestales, lo anterior mediante diferentes plataformas de percepción remota. De igual manera, la consulta de páginas web para la obtención de información puntual del registro de incendios forestales ocurridos en el país. Así como también la búsqueda de imágenes de satélite.

A continuación, se describe a detalle la obtención y tratamiento de la información recopilada y la aplicación del algoritmo de detección de incendios a las imágenes que pertinentemente fueron seleccionadas.

2.2 Datos de incendios forestales en el periodo 2013-2017

Los datos y registro de los incendios forestales reportados para las temporadas de 2013-2017, se obtuvieron y descargaron de la CONAFOR a través del Portal de Datos Abiertos del Gobierno de la República (<https://datos.gob.mx/busca/dataset/incendios-forestales>) (CONAFOR, 2018). Cada registro del incendio incluye: Número de incendio, clave del incendio, coordenada geográfica, clave del estado, municipio, paraje, además de la causa (actividades agrícolas, fogatas, fumadores, intencional, cultivos ilícitos, naturales, entre otros) del incendio.

De igual manera se incluye otras variables como: fecha de inicio y termino, duración días, tipo de incendio, hectáreas, tipo de vegetación, tipo de impacto, arbolado adulto, renuevo, arbustivo, herbáceo, hojarasca, suelo orgánico, tamaño, detección, llegada y duración.

Para la investigación únicamente se utilizaron los datos de registro de incendios de la temporada 2013-2017, esto en relación con el lanzamiento y operación del satélite Landsat-8. Los datos descargados vienen en formato Excel, por lo que una vez revisados y procesados se convirtieron en formato shapefile para su visualización en un software de información geográfica.

De las bases de datos Excel descargados para los años 2013-2015 (figura 2.8) y 2016-2017 (figura 2.7), se estandarizó los registros de las coordenadas geográficas para su fácil visualización en un SIG, en ambos casos se procedió a convertir las coordenadas geográficas en notación sexagesimal (grados, minutos y segundos) a notación decimal.

Del mismo modo, en la (figura 2.9) se observa los datos de los puntos de coordenadas ya editados en Excel con el formato que hace compatible su lectura y su fácil visualización.

| Coordenadas |
|----------------------------|
| 21°42'52" - 102°15'8" |
| 21°56'40.4" - 102°14'33.9" |
| 21°58'34.1" - 102°14'35.3" |
| 22°5'11.6" - 102°21'8.9" |
| 22°0'43.5" - 102°35'7.5" |

Figura 2.8 Forma de captura de datos de coordenadas de los años 2013 – 2015.

| Grados | Minutos | Segundos | Grados | Minutos | Segundos |
|--------|---------|----------|--------|---------|----------|
| 21 | 53 | 7.4 | 102 | 23 | 26.5 |
| 21 | 53 | 17.7 | 102 | 15 | 44.7 |
| 21 | 50 | 34.02 | 102 | 15 | 25.6 |
| 21 | 45 | 22.69 | 102 | 23 | 12.07 |
| 21 | 46 | 29 | 102 | 21 | 1.4 |

Figura 2.7 Forma de captura de los datos, 2016 – 2017

| Grados | Minutos | Segundos | Latitud | Grados | Minutos | Segundos | Longitud |
|--------|---------|----------|-------------|--------|---------|----------|---------------|
| 21 | 53 | 53.7 | 21.89825000 | 102 | 49 | 18.8 | -102.82188889 |
| 21 | 49 | 44 | 21.82888889 | 102 | 7 | 26.4 | -102.12400000 |
| 21 | 52 | 3.25 | 21.86756944 | 102 | 23 | 30 | -102.39166667 |
| 21 | 43 | 17.12 | 21.72142222 | 102 | 21 | 52.45 | -102.36456944 |
| 21 | 59 | 14.8 | 21.98744444 | 102 | 12 | 34.54 | -102.20959444 |

Figura 2.9 Datos de coordenadas editadas en notación decimal (temporada 2013 – 2017)

2.3 Descarga de imágenes de satélite Landsat 8

Actualmente existen distintas plataformas para la descarga de imágenes Landsat. Para el proyecto, la búsqueda y descarga se realizó a través de la plataforma virtual LandLook Viewer (<https://landlook.usgs.gov>), ésta permite una rápida visualización en línea y acceso a los archivos de imágenes de USGS Landsat. La plataforma permite: Explorar de forma interactiva el archivo Landsat en resolución completa directamente desde un navegador web común (MappingGIS, 2018).

El producto que se obtiene al momento de la descarga está empaquetado como formato de archivo de imagen Geographical Tagged Image File Format (Geo TIFF), formato de autodescripción desarrollado para intercambiar imágenes ráster. Incluye información geográfica o cartográfica acoplada en las imágenes que se puede utilizar para colocar la imagen en una pantalla de información geográfica (USGS.d, 2018).

Consta de 13 archivos, incluidas las 11 imágenes de banda, un archivo de metadatos específico del producto y una imagen de Evaluación de calidad (QA). Los archivos de imagen son todas imágenes GeoTIFF de 16 bits. Las bandas OLI son bandas 1-9. Las bandas TIRS se designan como bandas 10 y 11 (USGS.d., 2018).

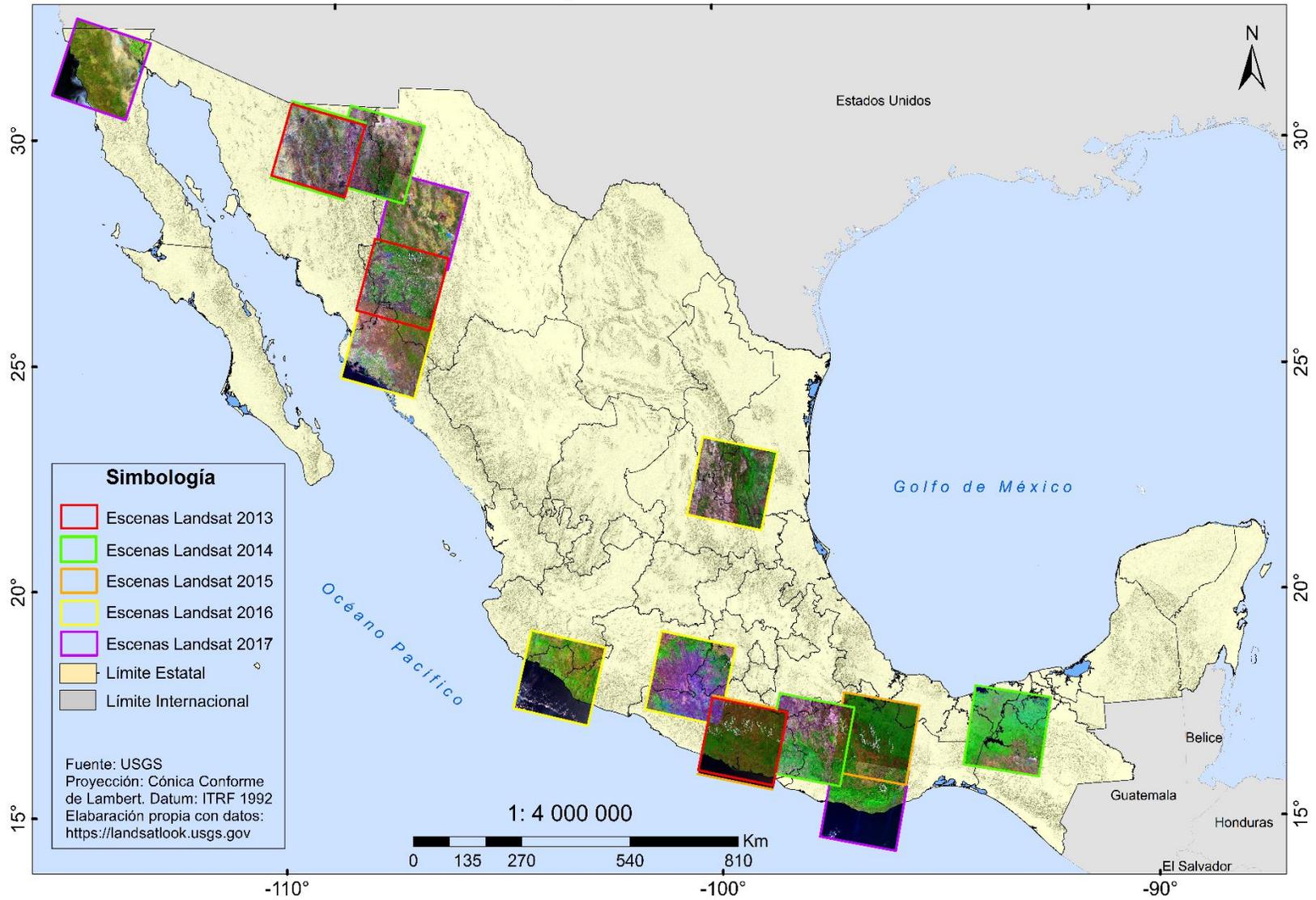
En la tabla 2.3, se muestra una descripción de las imágenes que fueron descargadas y seleccionadas a partir de contar con una serie de características (coincidencia en fechas comparados con los incendios reportados, bajo porcentaje de nubosidad, entre otros) en el periodo de tiempo previamente señalado.

Tabla 2.3 - Descripción general de las imágenes seleccionadas para la implementación del algoritmo de fuego

| Fecha | Lugar | Tiempo | ID_Sensor | ID_Producto Landsat |
|--------------|--------------------------------|---------------|------------------|--|
| 2013/06/06 | Chihuahua, Sonora, Sinaloa | 17:42 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_033041_20130606_20170310_01_T1 |
| 2013/05/20 | Guerrero | 17:02 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_026048_20130520_20170310_01_T1 |
| 2013/06/20 | Sonora | 17:54 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_035039_20130620_20170309_01_T1 |
| 2014/04/25 | Chipas, Tabasco, Oaxaca | 16:35 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_022048_20140425_20170307_01_T1 |
| 2014/04/14 | Oaxaca, Guerrero, Puebla | 16:54 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_025048_20140414_20170307_01_T1 |
| 2014/06/07 | Sonora | 17:52 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_035039_20140607_20170305_01_T1 |
| 2014/04/13 | Sonora, Chihuahua | 17:46 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_034039_20140413_20170307_01_T1 |
| 2015/04/24 | Guerrero | 16:59 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_026048_20150424_20170301_01_T1 |
| 2015/04/26 | Oaxaca, Veracruz | 16:47 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_024048_20150426_20170228_01_T1 |
| 2016/05/01 | Colima, Jalisco, Michoacán | 17:18 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_029047_20160501_20170223_01_T1 |
| 2016/05/03 | Oaxaca, Edo. México, Michoacán | 17:05 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_027047_20160503_20180131_01_T1 |
| 2016/06/14 | Sinaloa, chihuahua, Sonora | 17:40 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_033042_20160614_20170220_01_T1 |
| 2016/04/01 | Tamaulipas, SLP, Nuevo León | 17:04 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_027044_20160401_20180131_01_T1 |
| 2017/06/27 | Baja California | 18:16 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_039038_20170627_20170714_01_T1 |
| 2017/06/17 | Chihuahua | 17:40 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_033040_20170617_20170629_01_T1 |
| 2017/01/07 | Oaxaca | 16:48 | OLI_TIRS | LC08_L1TP_024049_20170109_20180131_01_T1 |

A continuación, se muestran la cobertura a nivel nacional de las imágenes de satélite (mapa 1) así como un acercamiento a cada región (figura 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21, 2.22, 2.23, 2.24, 2.25), de las imágenes que fueron seleccionadas para la implementación del algoritmo de fuego. Para poder tener una mejor apreciación de las imágenes, estas se muestran bajo falso color de la combinación de las bandas (7, 5, 2), sólo para fines prácticos de visualización.

Distribución de imágenes Landsat-8: 2013 - 2017



Mapa 1. Imágenes Landsat utilizadas para implementación del algoritmo de detección de incendios

Mapas de ubicación de las imágenes para implementación del algoritmo de fuego, año 2013.

Fuente: Elaboración propia

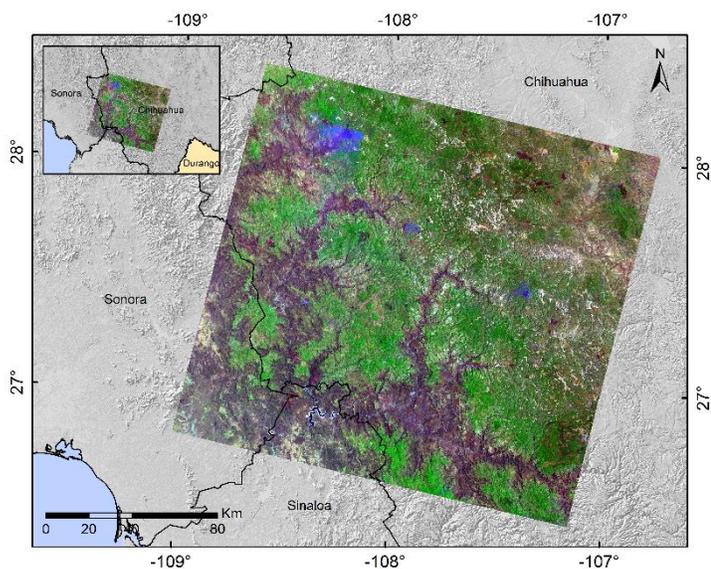


Figura 2.10 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2013/06/06

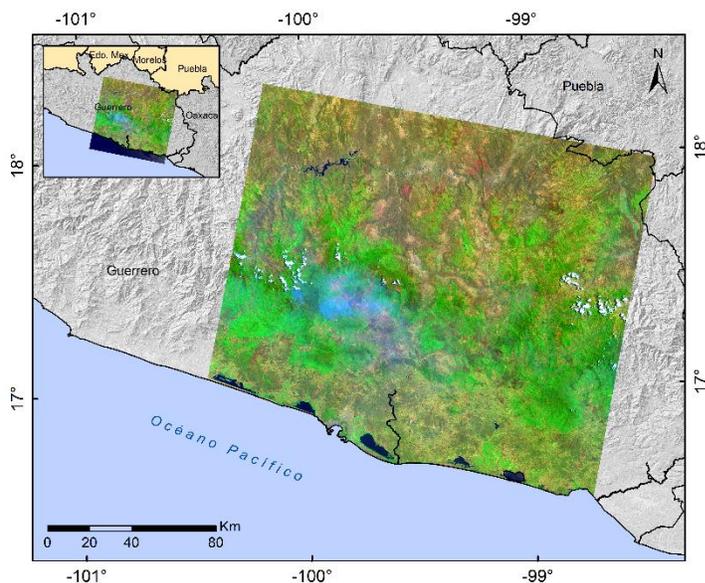
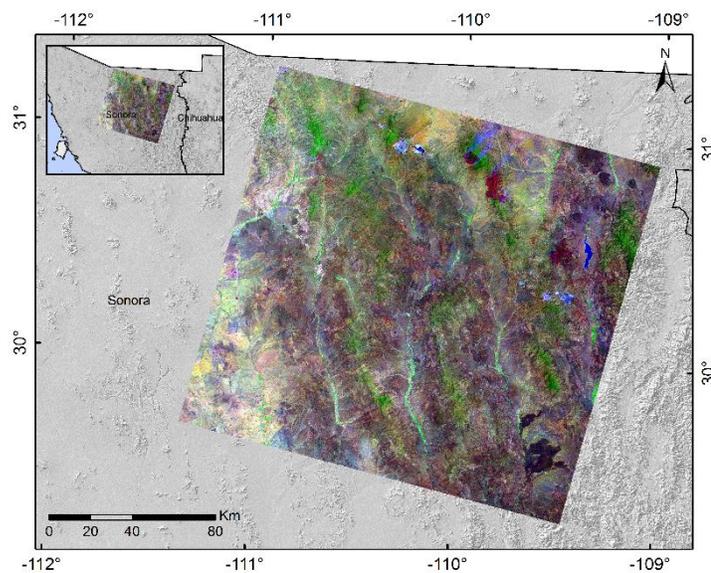


Figura 2.12 Imagen de satélite 3. Fecha de captura 2013/06/20



Mapas de ubicación de las imágenes para implementación del algoritmo de fuego, año 2014.

Fuente: Elaboración propia.

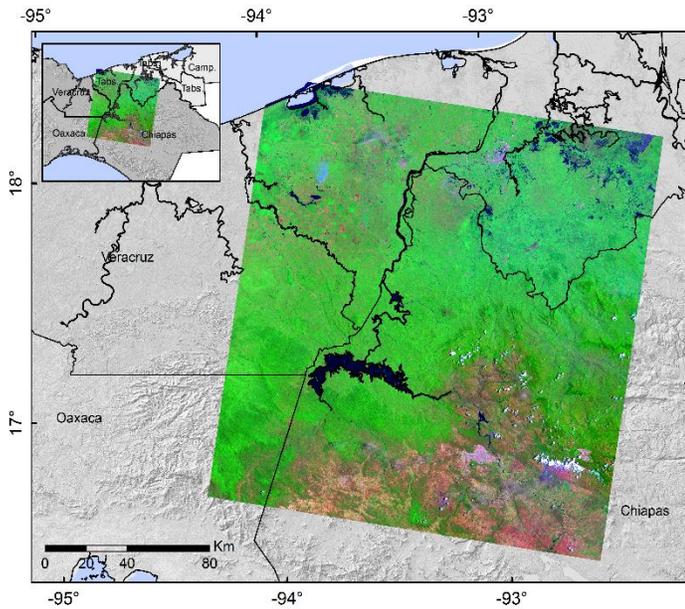


Figura 2.14 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2014/04/25

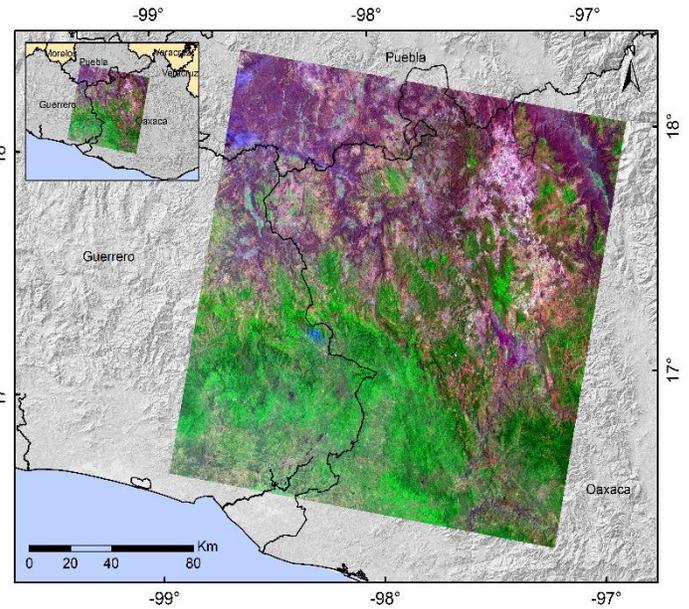


Figura 2.13 Imagen de satélite 2. Fecha de captura 2014/04/14

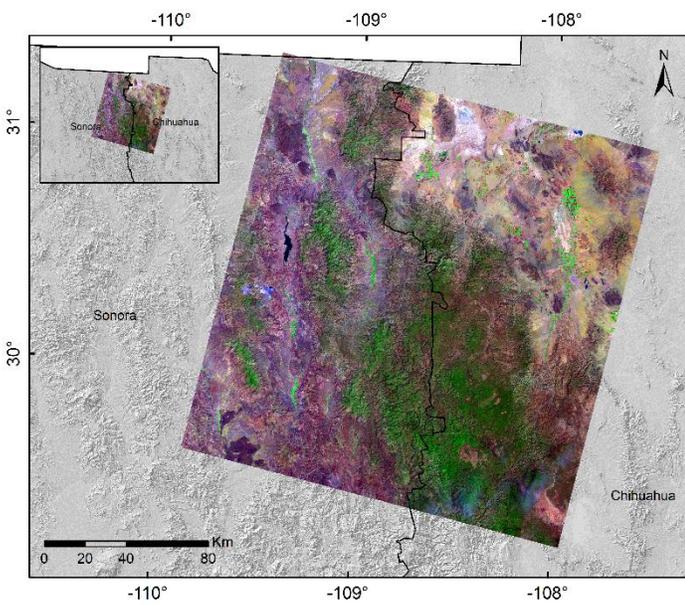


Figura 2.16 Imagen de satélite 3. Fecha de captura 2014/06/07

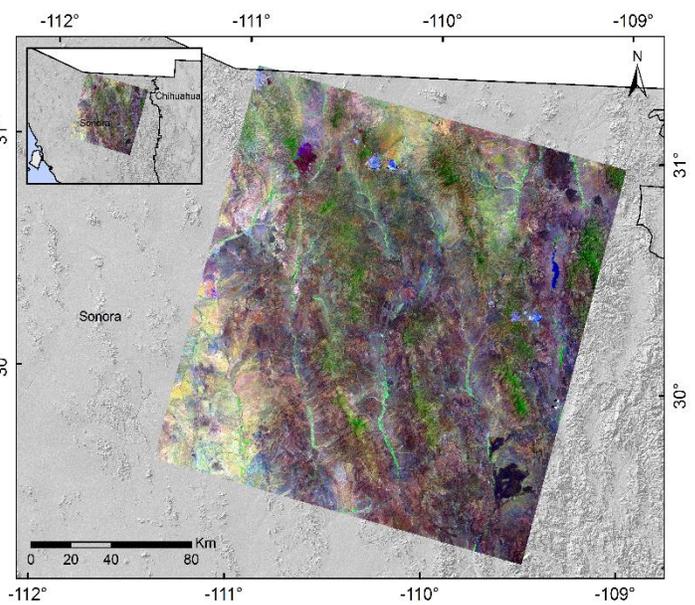


Figura 2.15 Imagen de satélite 4. Fecha de captura 2014/04/14

Mapas de ubicación de las imágenes para implementación del algoritmo de fuego, año 2015.

Fuente: Elaboración propia.

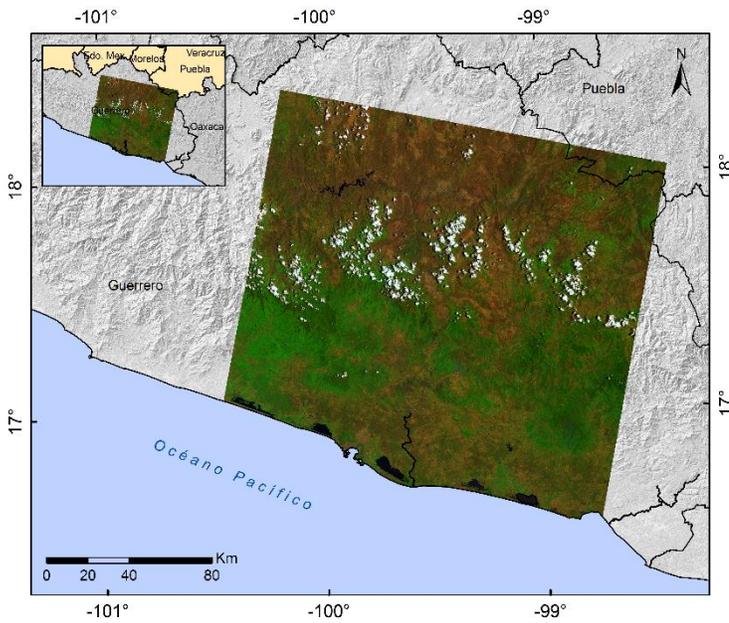
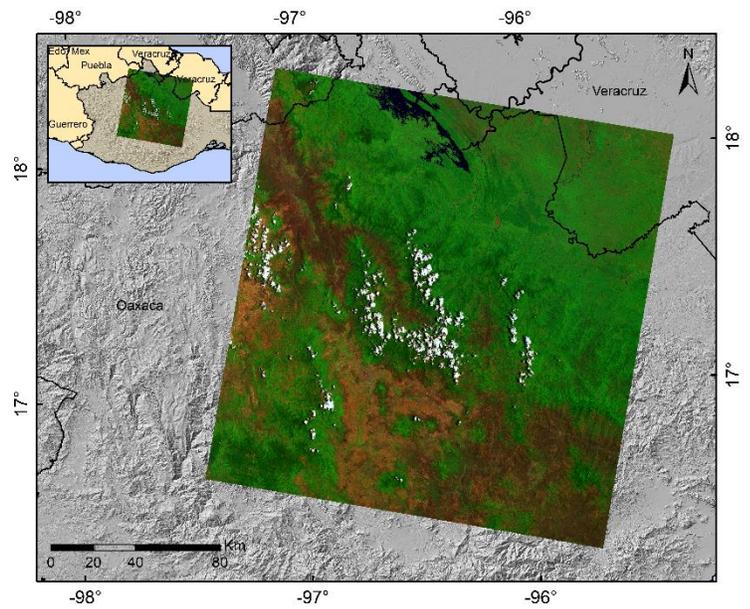


Figura 2.17 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2015/04/24

Figura 2.18 Imagen de satélite 2. Fecha de captura 2015/04/26



Mapas de ubicación de las imágenes para implementación del algoritmo de fuego, año 2016.

Fuente: Elaboración propia

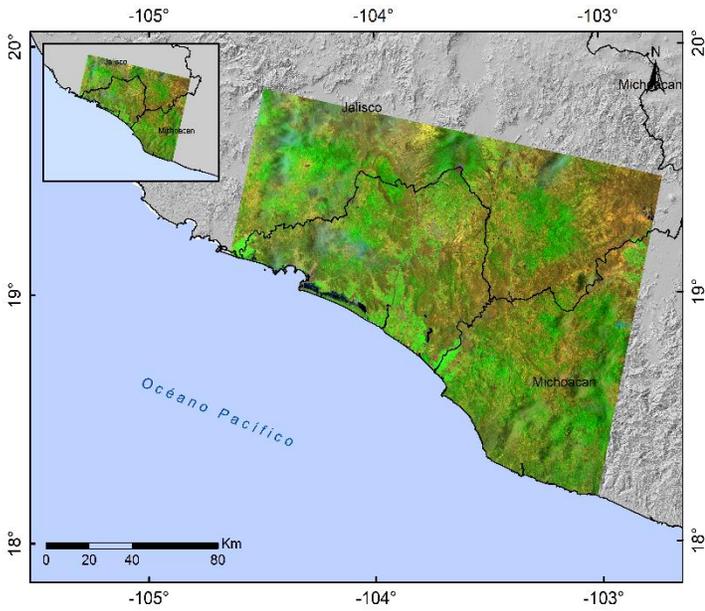


Figura 2.19 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2016/05/01

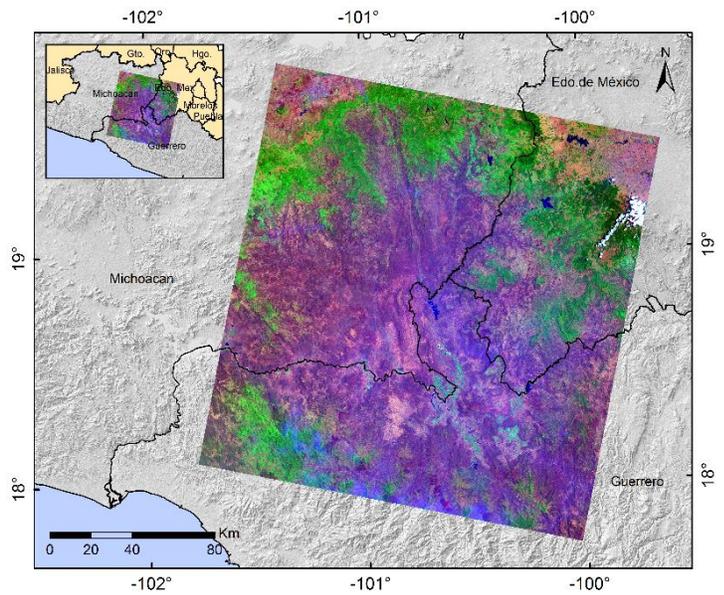


Figura 2.20 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2016/05/03

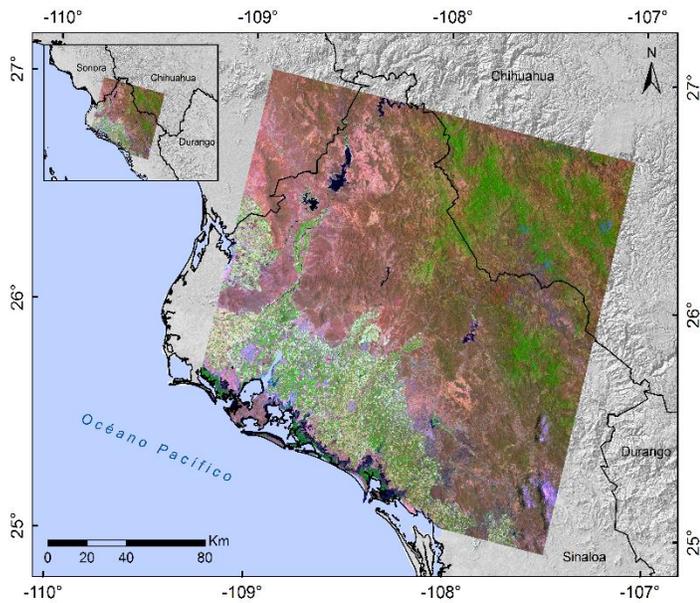


Figura 2.22 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2016/06/14

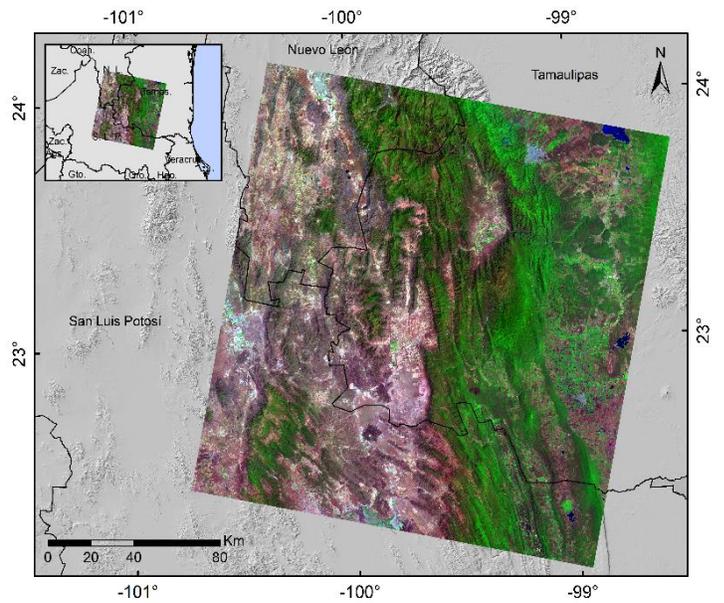


Figura 2.21 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2016/04/01

Mapas de ubicación de las imágenes para implementación del algoritmo de fuego, año 2017.

Fuente: Elaboración propia.

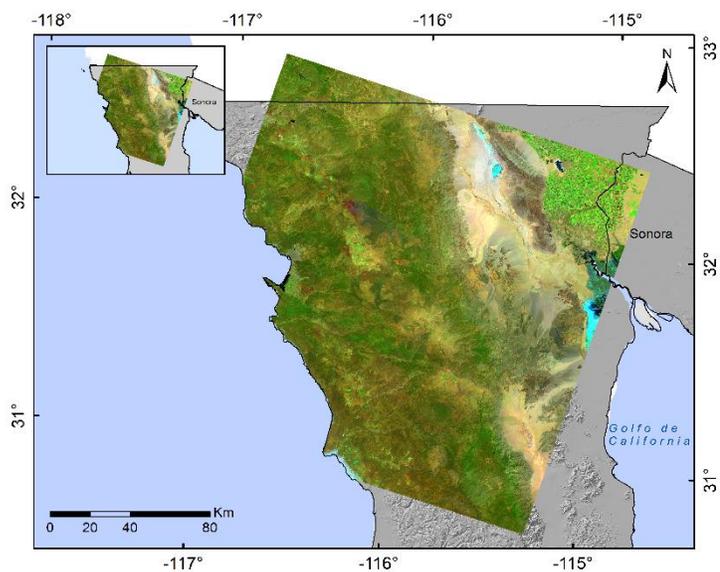


Figura 2.23 Imagen de satélite 1. Fecha de captura 2017/06/27

Figura 2.24 Imagen de satélite 2. Fecha de captura 2017/06/17

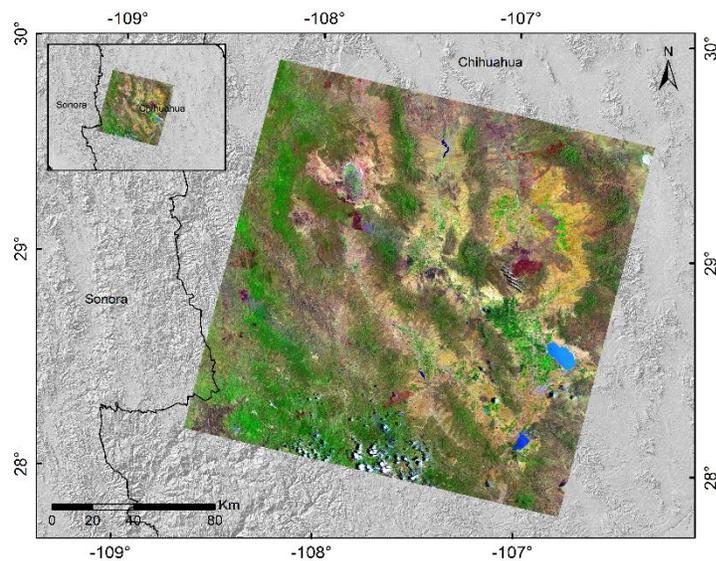
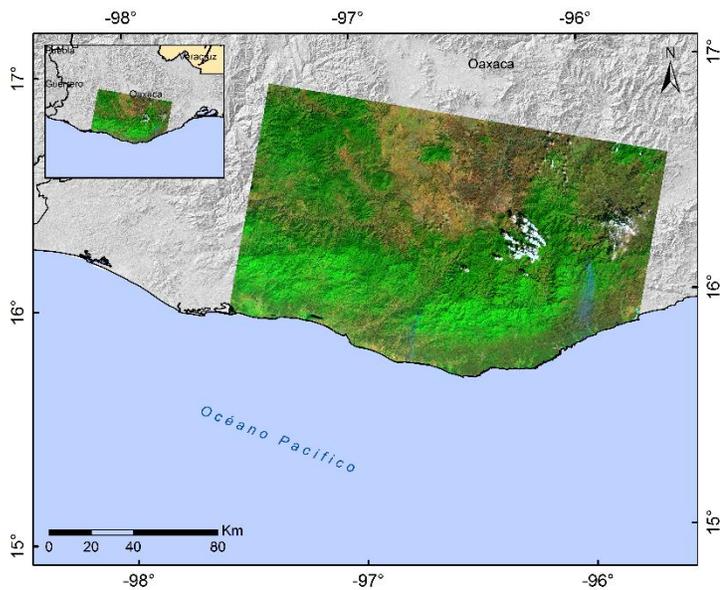


Figura 2.25 Imagen de satélite 3. Fecha de captura 2017/01/07



2.4 Procesamiento de las imágenes

El satélite Landsat -8 provee productos de datos estándar de alta calidad en un producto estándar de nivel 1 (USGS.c., 2018). El L1T¹ disponible para los usuarios es una imagen corregida geoméricamente, mediante la corrección con base en GCP (ground control points) y un modelo digital de elevación (DEM). El resultado es un producto geoméricamente rectificado libre de distorsiones relacionadas con el sensor (por ejemplo, efectos de ángulo de visión), satélite (por ejemplo, desviaciones de actitud de nominal) y la Tierra (por ejemplo, rotación, curvatura, relieve) (USGS.c., 2018). Para poder completar, tenerlas listas y poder implementar el algoritmo de detección de incendios propuesto por Schroeder y colaboradores (2016), se les aplicó el proceso de la corrección atmosférica a cada una de las imágenes mediante el software ENVI (ENvironment for Visualizing Images), software especializado en el procesamiento y análisis de imágenes satelitales.

2.5 Corrección atmosférica Landsat 8 OLI-TIRS

La atmósfera puede afectar la naturaleza de las imágenes de los sensores remotos en un número de formas diferentes (Brizuela y colaboradores, 2007). A nivel molecular, los gases atmosféricos afectan progresivamente las longitudes onda. Además, los componentes atmosféricos principales como el oxígeno, el dióxido de carbono, el ozono y el vapor de agua causan absorción de energía. De la misma forma las partículas de aerosol afectan a todas las longitudes de onda por igual. Los efectos atmosféricos pueden ser sustanciales. Por lo tanto, especialistas en sensores remotos han trabajado en la modelación y la corrección de estos efectos.

De acuerdo con Arias y colaboradores (2014), la corrección atmosférica es un proceso que se aplica a las imágenes digitales, con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la

¹ Los productos de datos L1T consisten en productos de datos L1R con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas, utilizando para ello puntos de control terrestre (GCP) o información de posición integrada a bordo para entregar una imagen registrada a una proyección cartográfica, referenciada a WGS84, G873, o a su versión actual. Adicionalmente los datos también contienen una corrección topográfica por el desplazamiento del terreno debido al relieve (IGAC, 2013).

interacción del sensor con la atmósfera. Con el proceso de la corrección se logra mejorar la calidad visual de la imagen.

El proceso de eliminar la interferencia atmosférica de la señal registrada por el sensor del satélite se denomina corrección atmosférica, la que se puede realizar a través de diversos métodos, tales como: métodos empíricos; métodos semi-físicos; y modelos de transferencia radiactiva atmosférica (Pathak *et al*, 2014 citado por Soca, 2017).

Los efectos atmosféricos pueden ser sustanciales por lo que se ofrecen varios enfoques para corrección atmosférica, la mayoría de los algoritmos de corrección atmosférica se basan en las ecuaciones de transferencia radiactiva (Soca, 2017), como por ejemplo:

Moderate-Resolution Atmospheric Transmittance and Radiance Code (MODTRAN). El código informático (Transmisión atmosférica de resolución moderada) es utilizado para la predicción y análisis de mediciones ópticas a través de la atmósfera. El código está incrustado en muchos sensores operativos y de investigación y sistemas de procesamiento de datos, particularmente aquellos que involucran la eliminación de los efectos atmosféricos, comúnmente conocidos como corrección atmosférica, en imágenes multi e hiperespectrales de detección remota (MSI y HSI). MODTRAN calcula las transmisiones y radiaciones espectrales atmosféricas de línea de visión (LOS) sobre el ultravioleta a través del régimen espectral infrarrojo de onda larga ($0 - 50,000 \text{ cm}^{-1}$; $> 0.2 \mu\text{m}$). El modelo de banda proporciona una resolución tan fina como 0.2 cm^{-1} de su 0.1 cm^{-1} modelo de banda MODTRAN resuelve la ecuación de transferencia radiativa que incluye los efectos de absorción / emisión y dispersión molecular y de partículas, reflejos y emisiones de superficie, iluminación solar / lunar y refracción esférica ARTMO (s.f.).

Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). Es un código de computadora que puede simular con precisión la transferencia radiativa de una señal electromagnética óptica a través de la atmósfera. El código 6S desarrollada por el Laboratoire d'Optique Atmosphérique, permite el cálculo de observaciones de aviones y satélites cercanos al nadir (mirando hacia abajo), teniendo en cuenta la elevación del objetivo, las condiciones de la superficie no lambertiana y la absorción de especies (O_2 , O_3 , H_2O , CH_4 , N_2O , CO). La precisión computacional para los efectos de dispersión de aerosoles y Rayleigh se basa en el uso de aproximaciones de última generación y la implementación del algoritmo de orden de dispersión sucesivo (SOS). 6S simula la transferencia

radiativa atmosférica en el rango espectral de 400-2500 nm a una resolución espectral de 2.5 nm ARTMO (s.f.).

Existen también otros modelos semi-empíricos como Dark Object Subtraction (DOS) y CO-Sine Theta (COST) propuesto por Chávez (Chávez *et al.* (1991); Chávez (1988); Chávez (1996), citado por Soca (2017).

DOS -Dark Object Subtraction- o SPO –Método de Substracción de Píxeles oscuros, también conocido como el Método de Chávez. Este método de corrección atmosférica, se considera de tipo absoluto, asume que, si hay áreas en una imagen con valores muy bajos de reflectancia, cualquier reflectancia aparente debería ser producto de la dispersión (scattering) atmosférica y esta información puede ser usada para calibrar el resto de la imagen (Chávez, 1988; 1999) Navia y Rivera (2016).

Entre los softwares de corrección atmosférica comerciales tenemos el módulo FLAASH (QUAC, 2009), ATCOR (Richter, 2014) y ACORN que están basados en MODTRAN Soca (2017).

Para el caso se realizó la corrección atmosférica con el módulo FLAASH (Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). Según, ITT Visual Information Solutions (2009) citado por Soca (2017), menciona que FLAASH es una herramienta para la corrección atmosférica de primer principio, capaz de corregir en el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta y también eliminar la mayor parte de la influencia de que tiene el aire y la luz y otros efectos de reflectancia; para obtener parámetros más precisos de reflectividad, emisividad, temperatura de la superficie y otros modelos físicos reales características de la superficie.

En términos generales la corrección atmosférica para FLAASH requiere la recodificación de la imagen (transformación BSQ a BIL), transformación a radiancia e identificación de las bandas y parámetros del sensor (Arias *et al.*, 2014).

La tabla 2.4 tomada de Schowengerdt (2006), y citado por Rodríguez (2014) presenta un resumen de técnicas de corrección utilizadas, algunas se basan únicamente en los datos de la imagen sin atender al estado atmosférico. Otras hacen uso de modelos de transferencia radiativa. Los procedimientos clásicos de corrección mediante modelos de transferencia, trabajan con las denominadas atmósferas estándar sin atender a las condiciones cambiantes de esta.

Tabla 2.4 - Técnicas de corrección atmosférica

| Sensor | Técnica | Referencia |
|---------------|---|------------------------------------|
| MSS | Regresión banda a banda | (Potter and Mendlowitz, 1975) |
| MSS | Covarianza espectral de todas las bandas | (Switzer et al., 1981) |
| Airborne MSS | Regresión banda a banda | (Potter, 1984) |
| AVHRR | Estimación iterativa | (Singh and Cracknell, 1986) |
| MSS, TM | DOS (Dark object subtraction) más modelo de difusión | (Chávez Jr, 1988) |
| TM | DOS más modelo de difusión, medidas de penetración de radiación en la atmósfera | (Chávez Jr, 1989) |
| TM | Parámetro 'tasseled cap haze' en cada pixel | (Lavreau, 1991) |
| AVHRR | DOS, NDVI, AVHRR band 3 | (Holben et al., 1992) |
| Airborne TMS | medidas de radiación mediante sensores en tierra y aerotransportados, código de simulación atmosférica Landsat TM | (Wrigley et al., 1992) |
| TM | comparación de diez métodos DOS y simulación atmosférica más datos de campo | (Moran et al., 1992) |
| TM | dark target, código de simulación | (Teillet and Fedosejevs, 1995) |
| TM | código de simulación atmosférica, igualado de histogramas | (Richter, 1996b); (Richter, 1996a) |
| TM | DOS con estimación de transmitancia | (Chávez Jr, 1996) |
| TM | dark target, código de simulación atmosférica | (Ouaidrari and Vermote, 1999) |
| TM, TM+ | método EL (empirical line), medidas en tierra | (Moran et al., 2001) |
| TM | comparación de 7 métodos en 12 fechas | (Hadjimitsis et al., 2004) |
| AVHRR | 2 bandas PCT usadas para separar las componentes de aerosoles | (Salama et al., 2004) |

Fuente: Schowengerdt (2006) citado por Rodríguez (2014).

Tomando como referencia a las fuentes anteriormente citados, se llevó a cabo una serie de pasos que se requiere según el formato de datos para la corrección atmosférica de imágenes Landsat -8 OLI-TIRS nivel 1T en formato GeoTIFF, con 30 metros de resolución espacial (multiespectral) y sistema de proyección UTM, Datum WGS84.

De la serie Landsat, el sensor Landsat 8 es el más reciente, las versiones anteriores de ENVI no tienen la funcionalidad adecuada para procesar correctamente estos datos, por lo que es necesario utilizar la versión ENVI 5.0 Service Pack 3 (envi50sp3_r4) con la actualización para archivos OLI de Landsat 8 (Arias *et al.*, 2014).

2.6 Algoritmo de detección de incendios forestales

La detección activa de incendios Landsat-8 se ha basado en algoritmos previos desarrollados para principalmente para el sensor ASTER y Landsat-7 ETM + (Giglio *et al.*, 2008, Schroeder *et al.*, 2008). Ambas aproximaciones utilizaron un enfoque contextual de umbral fijo de dos canales que explora la respuesta radiométrica diferencial de los datos SWIR (canal 8 en ASTER; canal 7 en ETM +) y NIR (canal 3 N en ASTER; canal 4 en ETM +) para clasificar los píxeles afectados por el fuego. Este método ha sido escalado utilizando datos de reflectancia espectral de la parte superior de la atmósfera de siete canales diferentes de imágenes Landsat 8 OLI (Schroeder *et al.*, 2016).

El algoritmo de detección de incendios activo Landsat-8 se divide en dos módulos: diurnos y nocturnos, donde el comportamiento radiométrico de incendios activos produce una anomalía de radiación SWIR o reflectancia en comparación con el fondo, imitando así el concepto de detección de anomalías térmicas utilizando canales infrarrojos de temperatura media a térmica.

Estos módulos de detección son controlados por los datos SWIR (infrarrojo de onda corta) del canal 7 sensible al fuego, aprovechando el componente emisor de los incendios en la ventana espectral de 2,2 μm , complementado por los datos de las bandas 1-6 visible y cercano al infrarrojo solo durante el día (Schroeder *et al.*, 2016). Durante las órbitas diurnas, el componente de fuego emisor se mezcla con el fondo, que está dominado por el componente solar reflejado. Para separarlos, utilizaron los datos del canal 5 NIR que en su mayoría no responden a los píxeles afectados por el fuego, aunque están altamente correlacionados con los datos del canal SWIR sobre superficies libres de fuego (Giglio *et al.*, 2008).

En la tabla 2.5 se muestra la lista de las bandas Landsat-8 /OLI de 30 m de resolución utilizadas en el algoritmo de detección de incendios activos utilizado por los autores y su aplicación principal.

Tabla 2.5 - Lista de bandas utilizadas para la implementación del algoritmo de fuego

| Canal OLI | Descripción de banda | Longitud de onda | Aplicación |
|--------------|---|---------------------|---|
| 1 | Coastal Aerosol (Operational Land Imager (OLI)) | 0.43-0.45 | Detección activa de incendios y máscara de agua |
| 2 | Blue (OLI) | 0.45-0.51 | Máscara de agua |
| 3 | Green (OLI) | 0.53-0.59 | Máscara de agua |
| 4 | Red (OLI) | 0.64-0.67 | Máscara de agua |
| 5 | Near-Infrared (NIR) (OLI) | 0.85-0.88 | Detección activa de incendios y máscara de agua |
| 6 | Short Wavelength Infrared (SWIR) 1 (OLI) | 1.57-1.65 | Detección activa de incendios y máscara de agua |
| 7 | SWIR 2 (OLI) | 2.11-2.29 | Detección activa de incendios, máscara de agua y análisis temporal |

Fuente: (Schroeder *et al.*, 2016).

2.7 Algoritmo para la detección diurna

Para la prueba del algoritmo, en este proyecto sólo se trabajó la comprobación del módulo diurno. A continuación, se describe los condicionantes implementados en la prueba del módulo diurno implementado por Schroeder y colaboradores (2016).

Condición 1.- Está diseñada para identificar píxeles de fuego activo potencialmente no ambiguos², se basa en el algoritmo de disparo activo ETM + (Schroeder *et al.*, 2008), y admite pequeñas diferencias en los canales espectrales OLI.

$$R_{75} > 2.5 \text{ AND } \rho_7 - \rho_5 > 0.3 \text{ AND } \rho_7 > 0.5$$

Dónde: R_{ij} = Relación entre las reflectancias del canal i y j

ρ_i = Reflectancia en el canal i

Condición 2.- Los incendios altamente energéticos y extensos pueden conducir al plegamiento del DN en el canal 7, caracterizando así otra condición de píxel de fuego activo potencialmente ambiguo. Esas ocurrencias se señalan bajo el siguiente criterio:

$$\{\rho_6 > 0.8 \text{ AND } \rho_1 < 0.2 \text{ AND } (\rho_5 > 0.4 \text{ OR } \rho_7 < 0.1)\}$$

Condición 3.- Complementando la identificación de píxeles de fuego no ambiguos, los umbrales de la condición (1), se seleccionan otros píxeles de fuego candidatos para análisis adicionales basados en los siguientes criterios:

$$\{R_{75} > 1.8 \text{ AND } \rho_7 - \rho_5 > 0.17\}$$

Condición 4.- Todos los píxeles que satisfacen la condición (3) deben cumplir con el siguiente conjunto de umbrales fijos, para clasificarse como posibles píxeles afectados por el fuego:

$$R_{75} > R_{75} + \max[3\sigma_{R_{75}}, 0.8]$$

Condición 5.-

$$\rho_7 > \rho_7 + \max[3\sigma_{\rho_7}, 0.08]$$

Condición 6.-

$$R_{76} > 1.6$$

² La ambigüedad: En percepción remota, una cobertura de suelo frecuentemente se mapea usando clasificación dura (en la cual cada píxel en una imagen es asignado a una de varias clases). La ambigüedad es asociada con una o muchas relaciones, o también con una forma de falta de claridad, el cual implica uno o más significados. Por ejemplo, la ambigüedad puede causar dificultad en decidir a qué cobertura de suelo, en una clasificación de imágenes satelitales, pertenece un píxel (Cruz, J., S. F.)

Dónde: R_{ij} y σ_{R75} (ρ_7 y σ_{ρ_7}) son la media y la desviación estándar calculadas para la relación de banda (reflectancia del canal 7) utilizando píxeles de fondo válidos de una ventana de 61×61 . Y los píxeles válidos se definen como aquellos que muestran una reflectancia del canal 7 mayor que cero, excluyendo el agua y los píxeles de disparo no ambiguos. A la vez, los píxeles de agua se clasifican según el perfil espectral utilizando datos de reflectancia de los siete canales de entrada. Para ello se aplican dos pruebas distintas para cartografiar los océanos y las masas de aguas continentales:

Condición 7.-

$$\{ \rho_4 > \rho_5 \text{ AND } \rho_5 > \rho_6 \text{ AND } \rho_6 > \rho_7 \text{ AND } \rho_1 - \rho_7 < 0.2 \}$$

Y

Condición 8.-

$$\{ (\rho_3 > \rho_2) \}$$

Condición 9.-

$$\{ (\rho_1 > \rho_2 \text{ AND } \rho_2 > \rho_3 \text{ AND } \rho_3 > \rho_4) \}$$

Las condiciones 7 y 8 capturan aguas poco profundas y / o ricas en sedimentos, mientras que las condiciones 7 y 9 sirven para mapear cuerpos de agua profundos y / u oscuros. Por ejemplo, las condiciones (7 y 9) pueden confundir cuerpos de agua y sombras de nubes y, por lo tanto, afectar las estadísticas de fondo válidas, pero dichos errores de clasificación no tienen un efecto considerable en el rendimiento del algoritmo implementado.

Al término de cada una de las condiciones se obtuvo como resultado un ráster con valores de 0 – 1, posteriormente se realizó la combinación de algunas condiciones (4, 5, 6), (7, 8, 9) y (1 y 3), respectivamente para cada una de las 16 imágenes Landsat para la prueba del algoritmo y para la identificación de píxeles afectados por el fuego. Para poder obtener un resultado más preciso y confiable en la identificación de píxeles afectados, especialmente la combinación de las condiciones 1 y 3 fueron las que mostraron mejor respuesta al identificar píxeles.

Una vez obtenido estos, se precedió a la conversión de los píxeles a polígonos en un SIG, para su integración con la base de datos de los puntos de coordenadas de los incendios reportados y

detectados para la fecha de captura de cada imagen, se dividieron uno a uno de la tabla de atributos para poder visualizar el área de influencia de cada región (según de la superficie reportada) y los polígonos resultados de percepción remota.

Posteriormente se realizó una inspección visual para corroborar la presencia de incendios dentro de cada buffer. A la vez que se fue realizando una nueva base de datos a partir de la comparación de los resultados del algoritmo, marcando con 1 para la presencia y 0 para ausencia de incendios, de igual forma con la inspección visual, 1 para verdadero y 0 para falso.

La base de datos se completó con la comparación del tipo de ecosistema afectado por los incendios: Serie de Uso de Suelo y Vegetación VI, INEGI (2016) contra los que reporta la CONAFOR, para corroborar si el tipo de ecosistema afectado entre ambos coinciden.

◆ Capítulo 3. Resultados y discusión ◆

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación y la evaluación del algoritmo de detección de cambios aplicado a una previa selección de imágenes de satélite de diferentes regiones del país, en relación con un conjunto de datos de incendios forestales reportados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

3.1 Resultados

3.2 Reporte de datos CONAFOR

La CONAFOR en sus informes de incendios forestales de las temporadas 2013-2017, menciona que los incendios van desde los de impacto mínimo (la mayoría) y los de impacto moderado, y los de impacto severo (menos frecuentes) (SNIGF, 2018), y que fueron corroborados en la presente investigación

Los registros oficiales incluyen eventos con coordenadas de referencia y sin coordenadas, los cuales se identificaron como incompletos. En cada temporada, más del 80% de los registros incluye las coordenadas de referencia de cada incendio (Tabla 3.6). Además de no incluir en los datos las coordenadas mal registradas en función a su captura.

Tabla 3.6 Total de incendios e incendios con coordenada 0, (2013-2017)

| Año | Total de incendios registrados | Incendios sin coordenadas 0 | Total de incendios reales |
|-------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 2013 | 10,406 | 2, 276 | 8,120 |
| 2014 | 5,325 | 1,068 | 4,250 |
| 2015 | 3,707 | 286 | 3,408 |
| 2016 | 8,422 | 331 | 8,083 |
| 2017 | 8,896 | 57 | 8,839 |

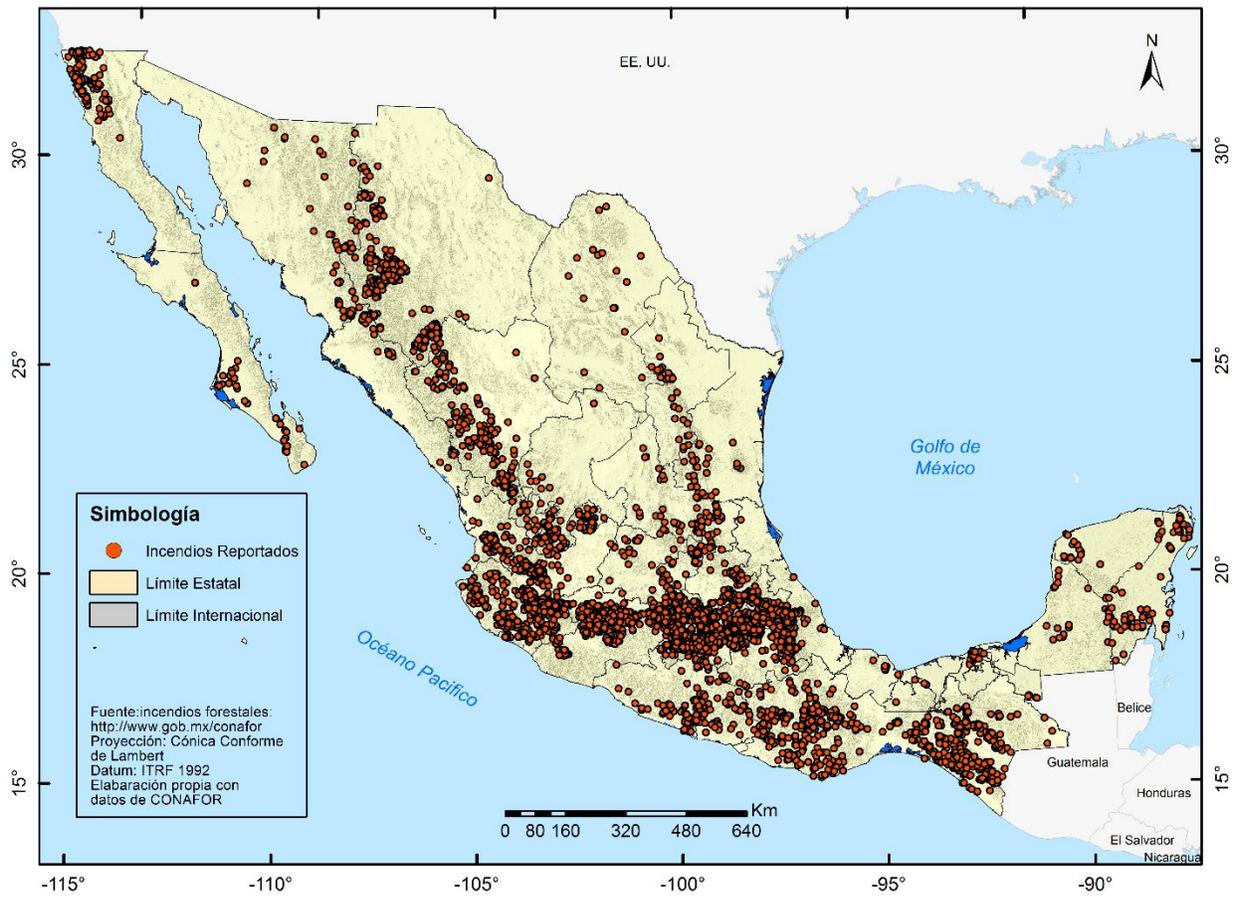
De la columna *Total de incendios reales*, es la cantidad de datos de incendios que fueron tomados en cuenta y que a continuación se representan.

3.3 Distribución de incendios forestales en México: 2013-2017

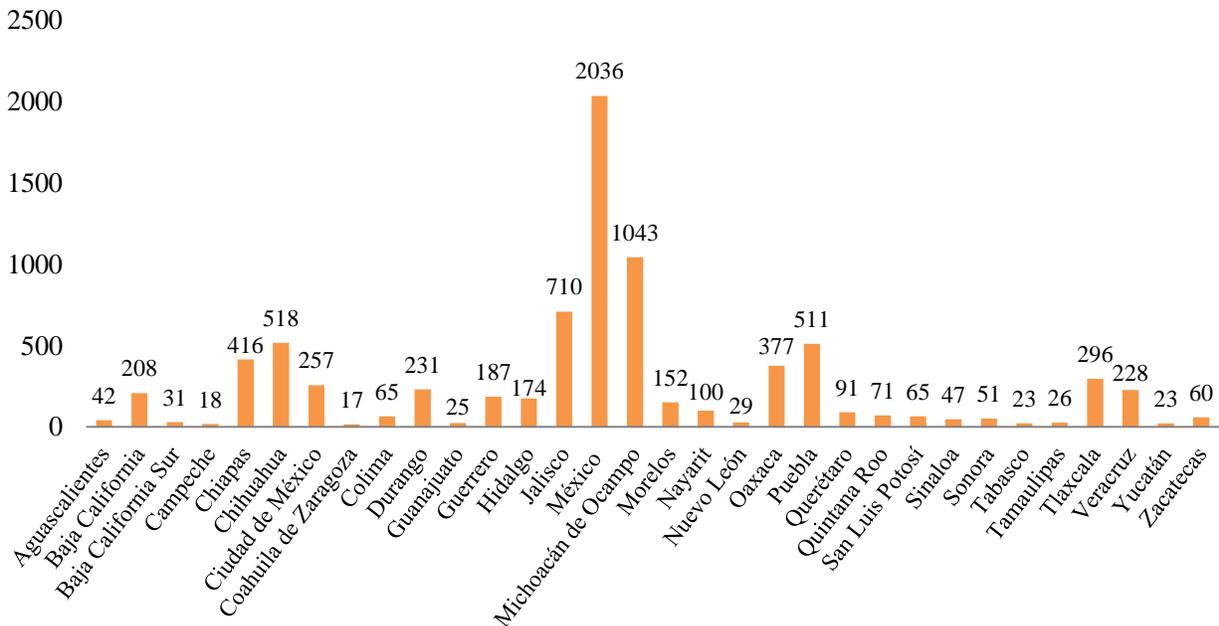
3.3.1 Mapas de distribución de incendios forestales

En los mapas siguientes se muestra la distribución espacial de los incendios forestales en el periodo 2013 – 2017 (mapa 2, 3, 4, 5, 6). Es importante destacar que los incendios que se representan en cada mapa muestran la cantidad de incendios ocurridos por año que cuentan con un registro de coordenada. De manera conjunta con los mapas de distribución de incendios, se presentan también una serie de graficas (grafica 1, 2, 3, 4, 5, 6) que muestran la cantidad de incendios forestales ocurridos en cada uno de los estados del país en función de cada año.

Incendios forestales reportados por CONAFOR en 2013

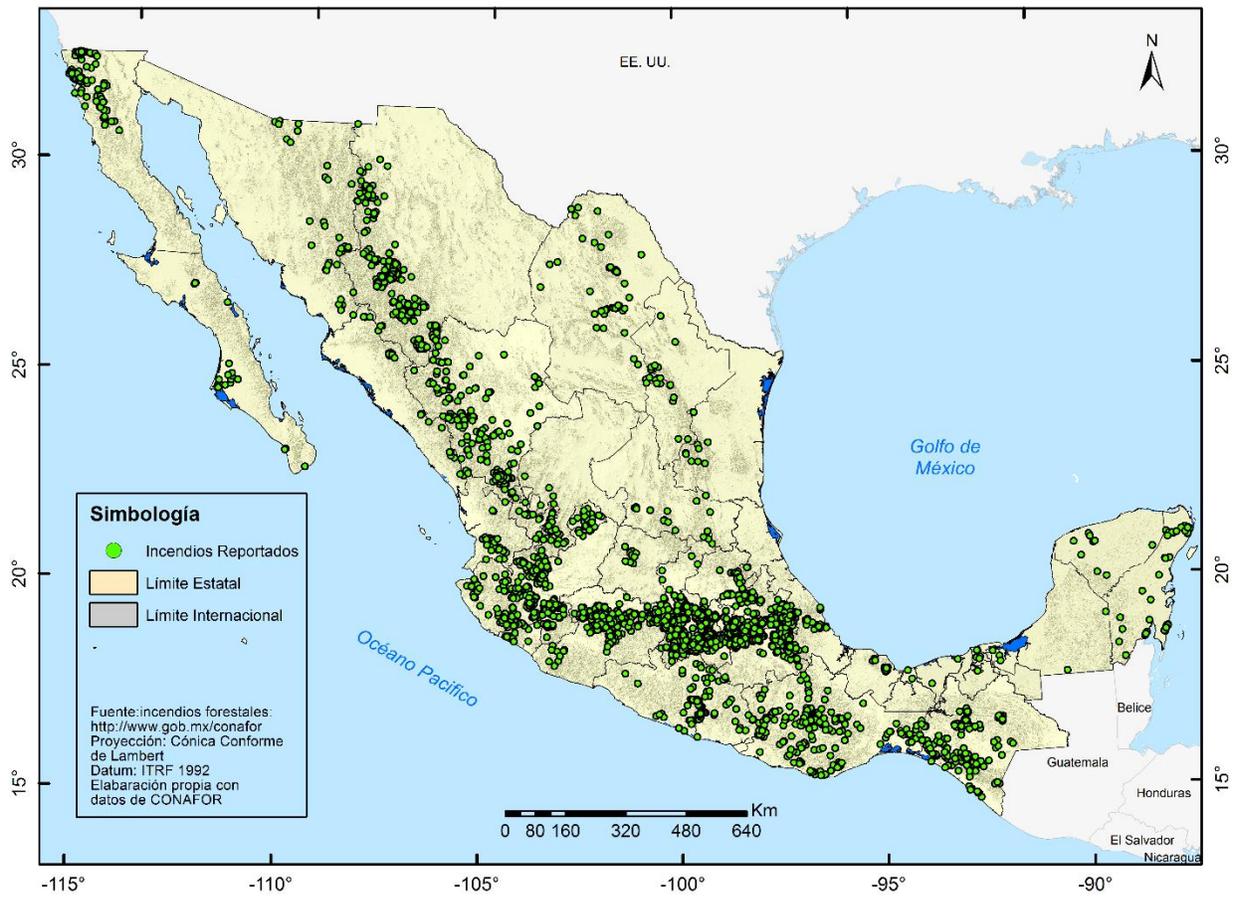


Mapa 2. Año 2013, se reportaron en el país 8,120 incendios forestales con sus coordenadas

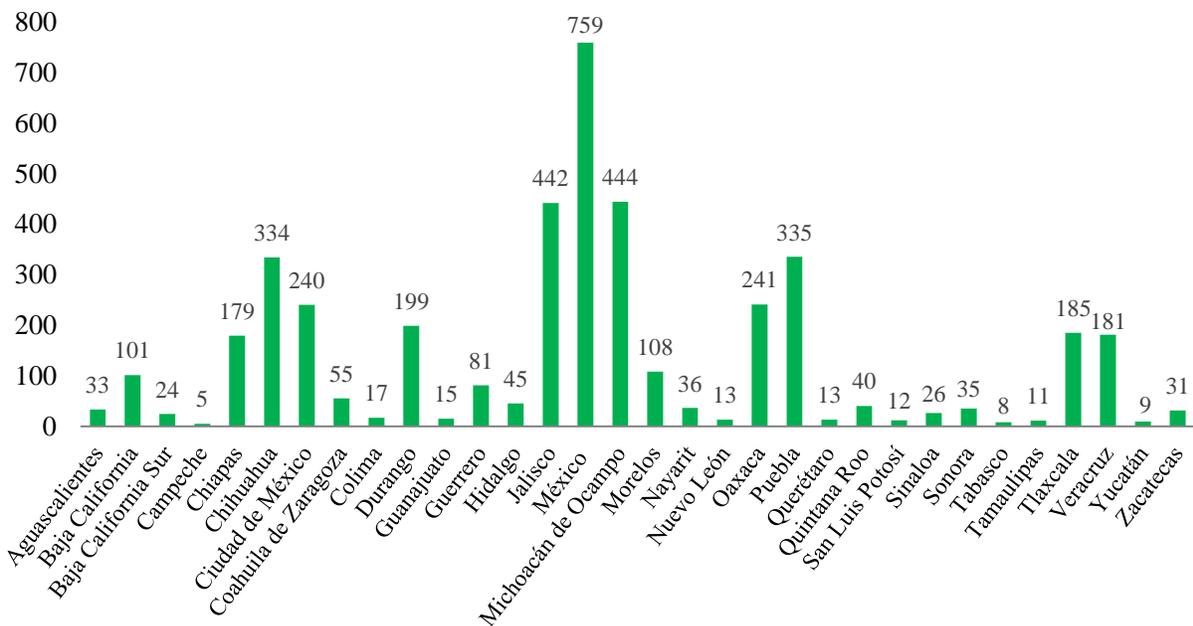


Gráfica 1. Número de incendios forestales por entidad federativa reportados en 2013

Incendios forestales reportados por CONAFOR en 2014

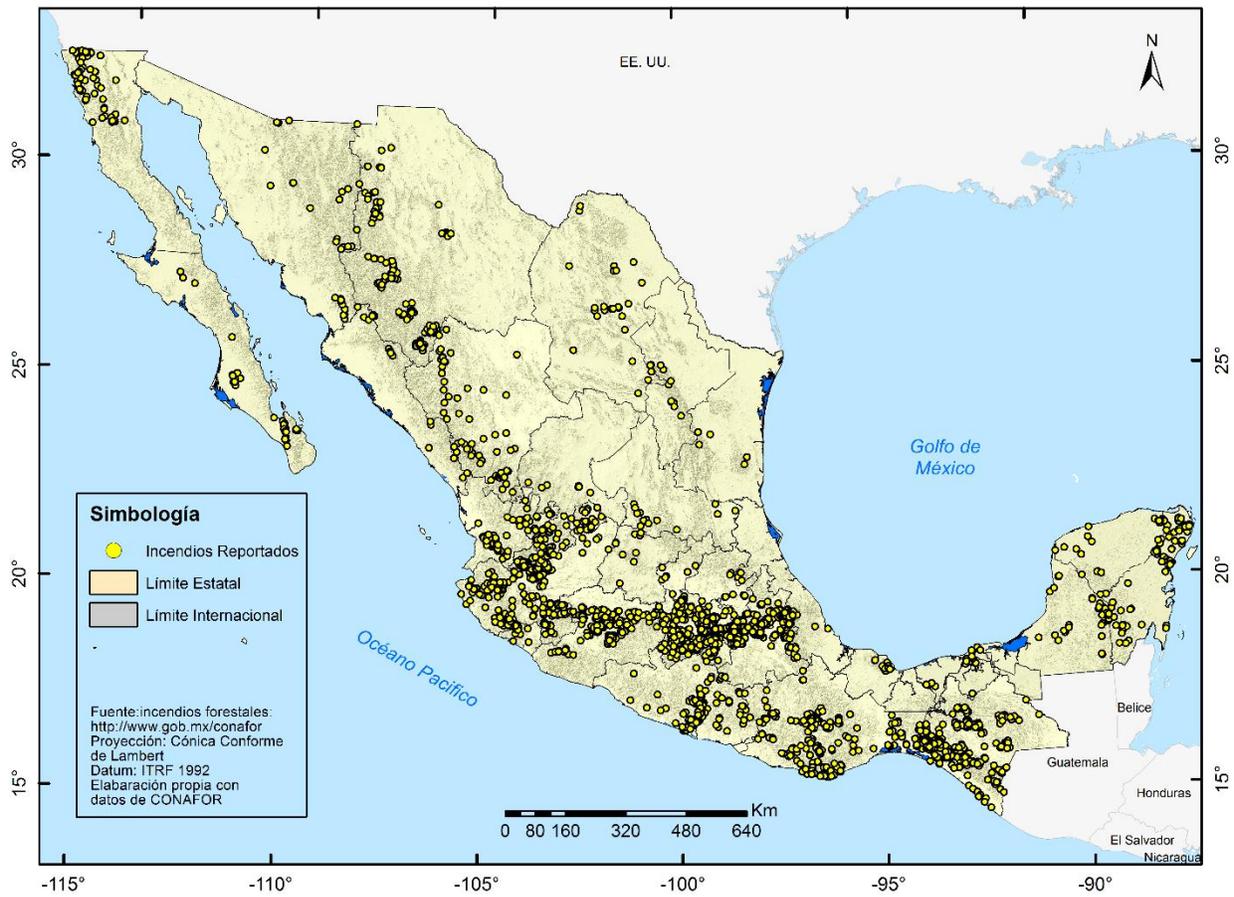


Mapa 3. Año 2014, se reportaron 4,250 incendios forestales con sus coordenadas

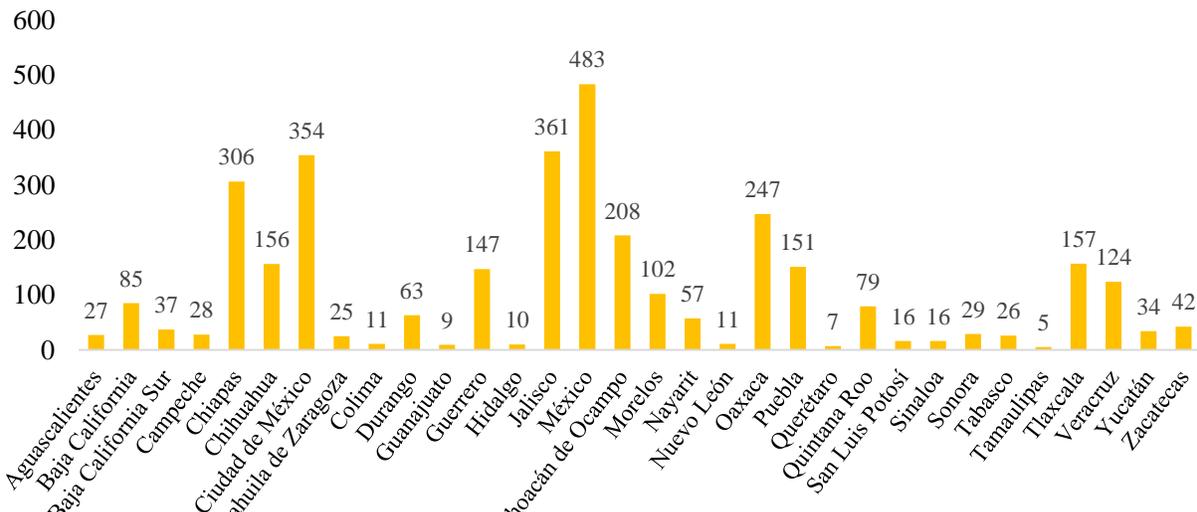


Gráfica 2. Número de incendios forestales por entidad federativa reportados en 2014

Incendios forestales reportados por CONAFOR en 2015

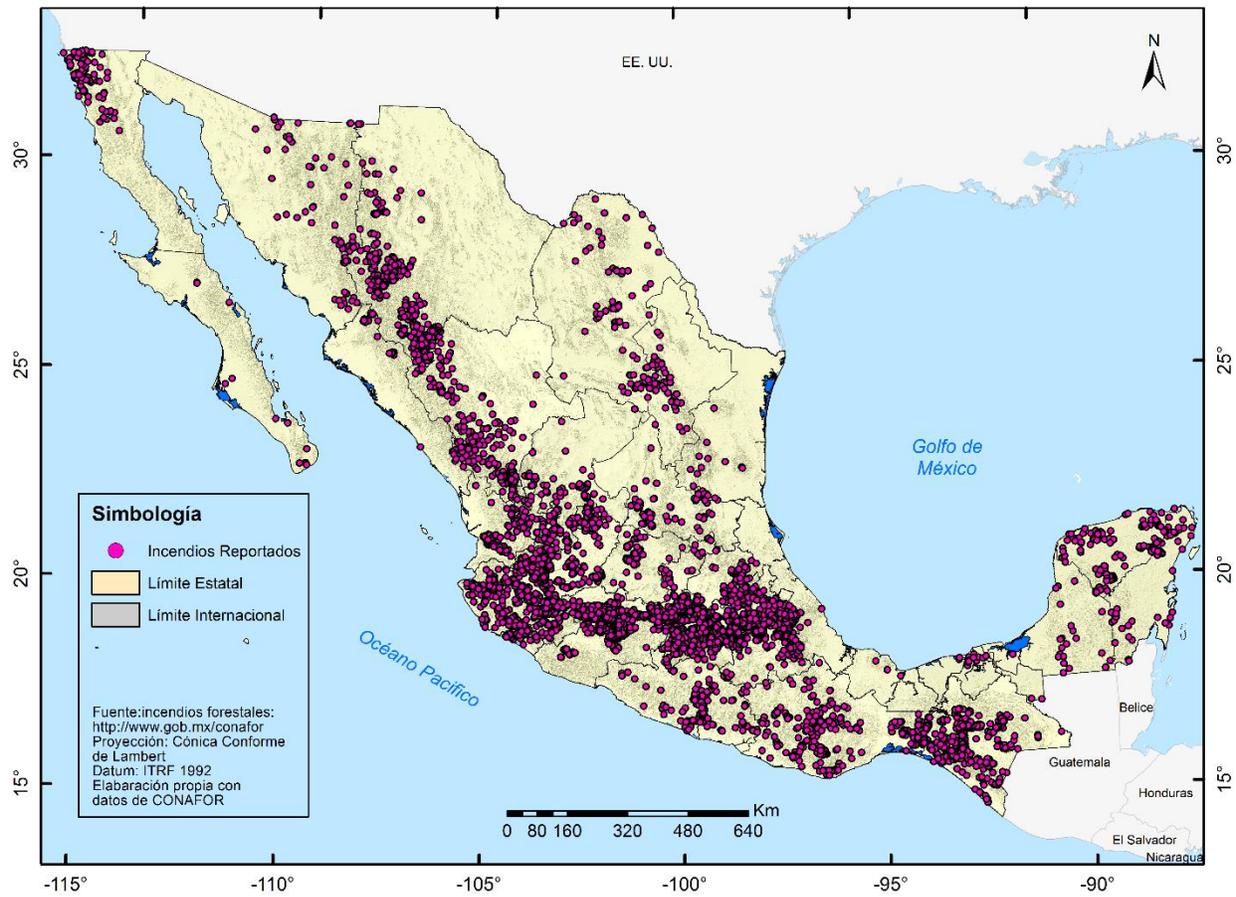


Mapa 4. El año 2015 se reportaron las coordenadas de 3,408 incendios forestales

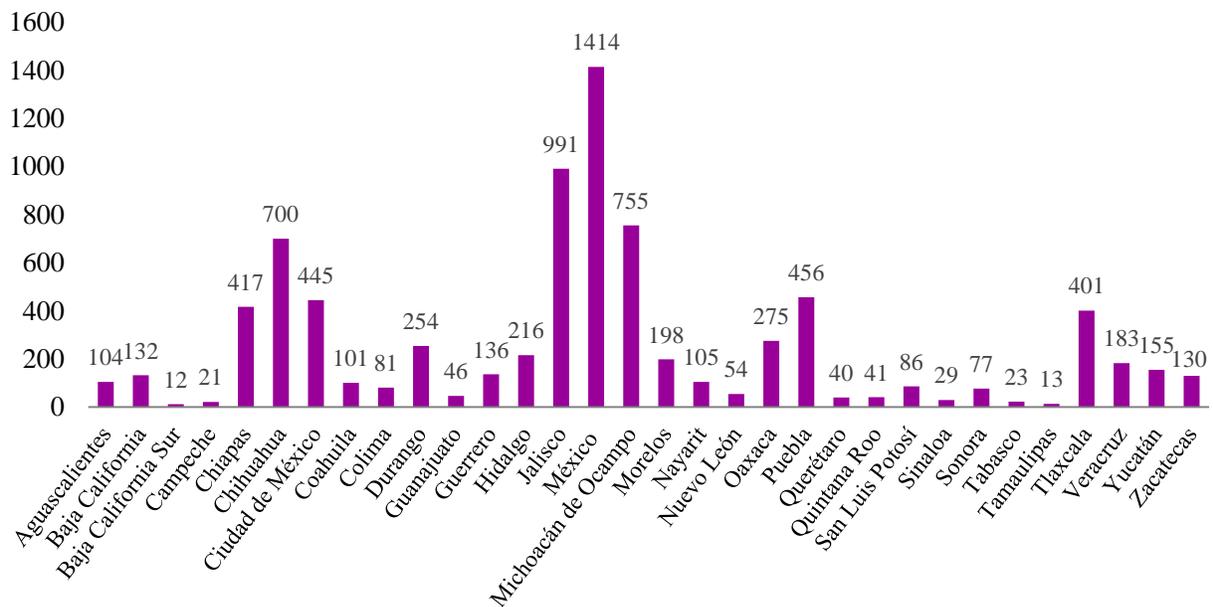


Gráfica 3. Número de incendios forestales por entidad federativa reportados en 2015

Incendios forestales reportados por CONAFOR en 2016

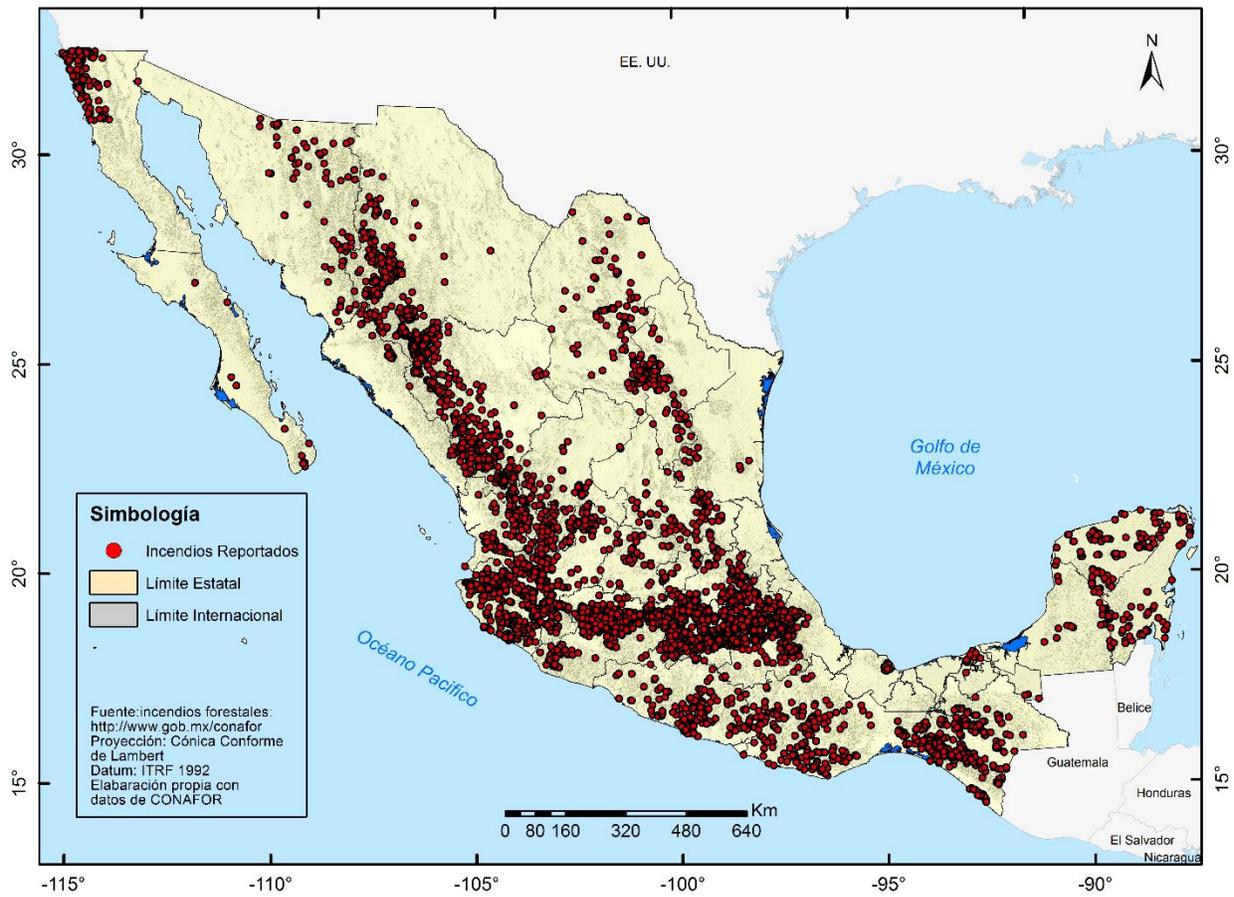


Mapa 5. En el año 2016 fueron reportados 8,083 incendios forestales con coordenadas

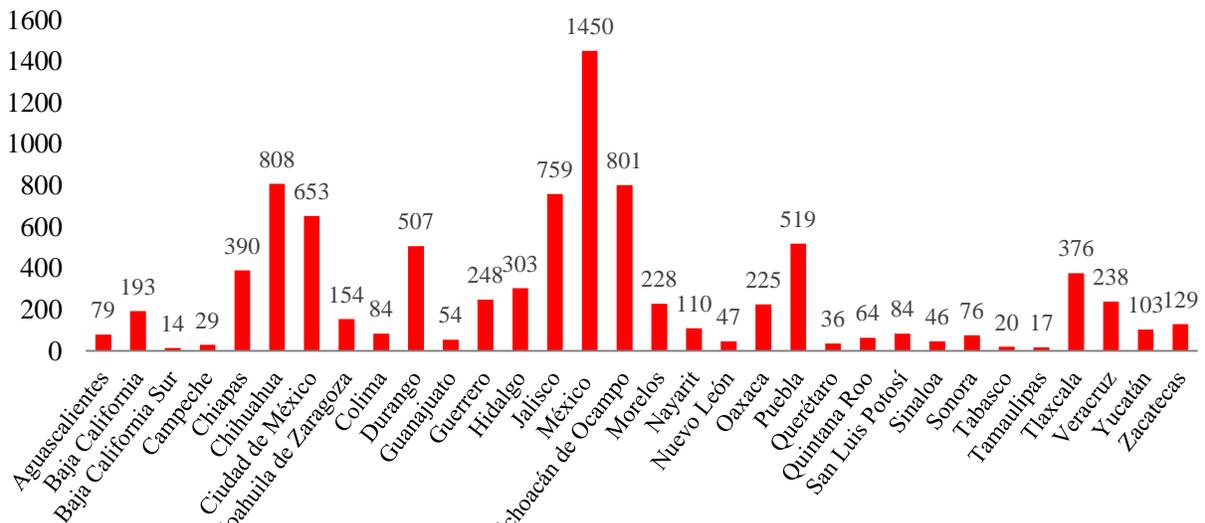


Gráfica 4. Número de incendios forestales por entidad federativa reportados en 2016

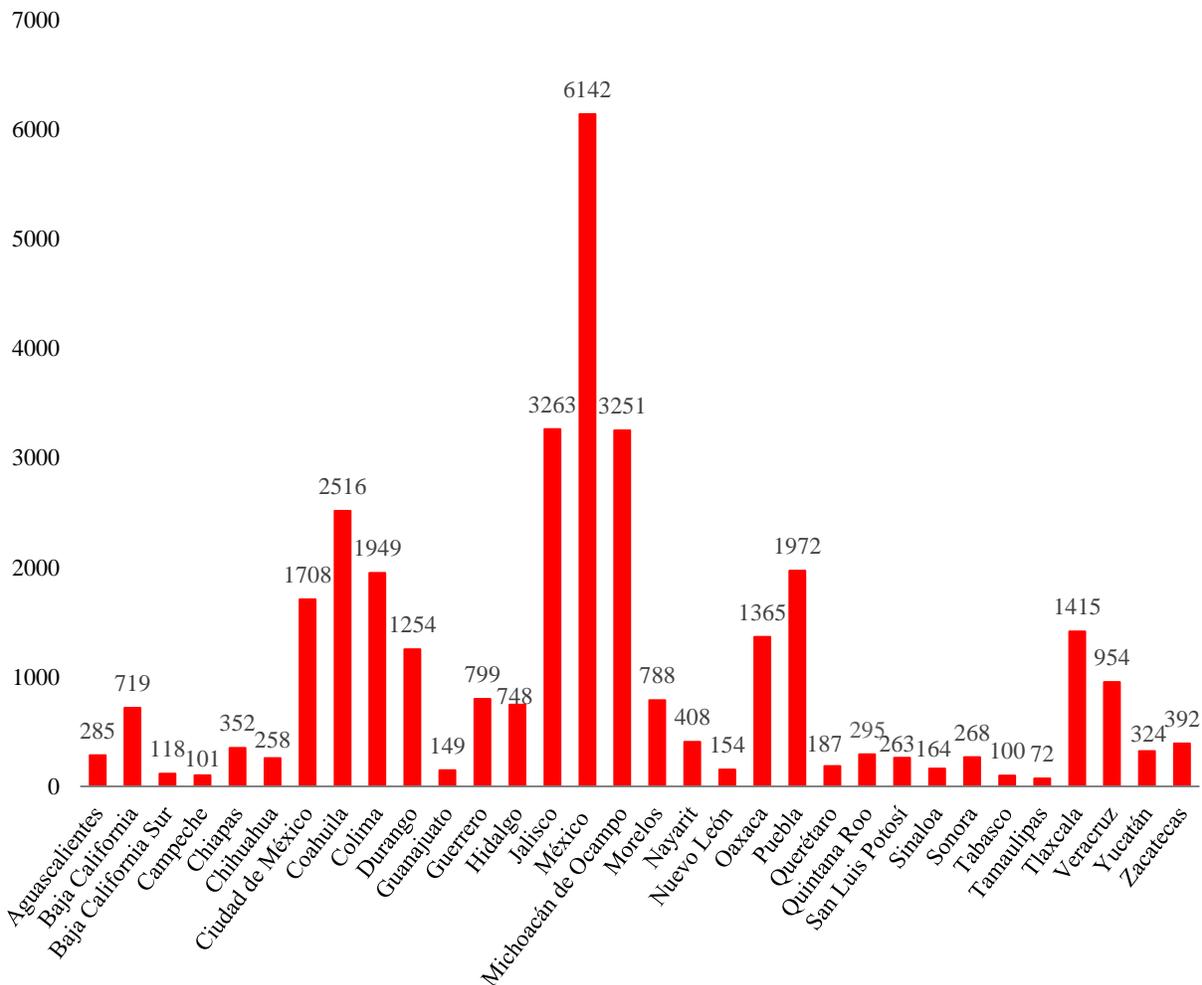
Incendios forestales reportados por CONAFOR en 2017



Mapa 6. El año 2017, se reportaron 8,839 incendios forestales con coordenadas



Gráfica 5. Número de incendios forestales por entidad federativa reportados en 2017



Gráfica 6. Total de incendios forestales por entidad federativa: 2013 - 2017

A nivel nacional, el estado que presentó más incendios en el periodo 2013 – 2017 es el Estado de México. Mientras que, Tamaulipas resultó ser la entidad que tiene la cantidad menor de incendios reportados por año.

En la tabla 3.7 se muestra el total de incendios por año, así como el promedio para cada uno de ellos. Para la temporada (2013 - 2017) se obtuvo un promedio de 6,540 de incendios. Siendo el Estado de México la entidad que se mantiene cerca del promedio calculado.

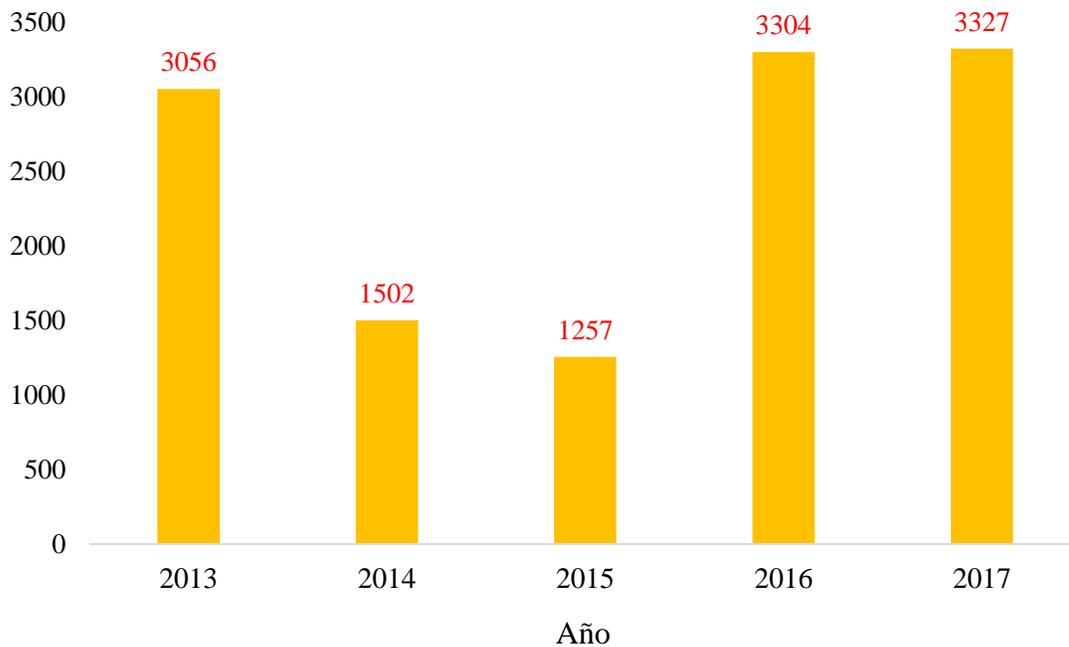
Tabla 3.7 - Promedio anual de incendios por año

| Año | Incendios Forestales | Promedio anual |
|----------------|----------------------|----------------|
| 2013 | 8,120 | 4,064 |
| 2014 | 4,250 | 2,129 |
| 2015 | 3,408 | 1,707 |
| 2016 | 8,083 | 4,046 |
| 2017 | 8,839 | 4,420 |
| Promedio Total | 6,540 | 2,489 |

Para cada uno de los años, el registro de gran cantidad de incendios mayormente se vincula a actividades relacionadas directamente con el ser humano, principalmente con las actividades agropecuarias (gráfica 7), mediante la identificación de las siguientes causas: quema de cañaveral, quema para desmontar, quema para la preparación de siembra, quema para pastoreo, quema agrícola. Así como también otras causas directamente ligadas a actividades llevadas por el ser humano.

La cantidad de incendios relacionados con actividades agropecuarias que se muestran están en función de la columna total de incendios reales de la tabla 3.6.

Gráfica 7. Cantidad de incendios relacionados con actividades agropecuarias



En la tabla 3.8 se muestra los datos en porcentaje calculados a partir de número total de incendios forestales por año relacionados a actividades agropecuarias, nuevamente utilizando el número total real de la tabla 3.6. Según los datos consultados y como se muestra en la tabla 3.8, las actividades agropecuarias son las que ocupan el mayor porcentaje en el registro de incendios forestales en el país.

Tabla 3.8 - Porcentaje de incendios relacionados con actividades agropecuarias

| Año | Incendios Forestales | Actividades Agropecuarias | Porcentaje % |
|------|----------------------|---------------------------|--------------|
| 2013 | 8,120 | 3056 | 37.64 |
| 2014 | 4,250 | 1502 | 35.34 |
| 2015 | 3,408 | 1257 | 36.88 |
| 2016 | 8,083 | 3304 | 40.88 |
| 2017 | 8,839 | 3327 | 37.64 |

3.4 Estimación de detección de incendios

La principal función del algoritmo de fuego diseñado para Landsat -8 es detectar las anomalías térmicas producto de incendios forestales de diferentes magnitudes. Pero no solo los incendios producen estas anomalías. Existen otras fuentes de calor que al momento de implementar el algoritmo en los resultados que arroja, no solo se detectan los grandes y pequeños incendios, sino que también otras anomalías asociados a fuentes que en condiciones de iluminación se confunden con la firma espectral de la quema de biomasa y que pueden causar una falsa alarma (Schroeder *et al.*, 2016).

Con el módulo diurno se pudo observar con mayor claridad la presencia de incendios de diferentes magnitudes. La combinación de dos ecuaciones (1 y 3) se obtuvieron resultados satisfactorios, tanto en la identificación de píxeles de fuego reales y falsos. De las 16 imágenes seleccionadas solo en algunas se identificaron la presencia de píxeles falsos, como se representa en la figura 25, que forma parte de una sección de la imagen (LC08_L1TP_035039_20130620_20170309_01_T1"), que para fines de resultados se tomó como ejemplo debido a la claridad de los resultados arrojados por el algoritmo.

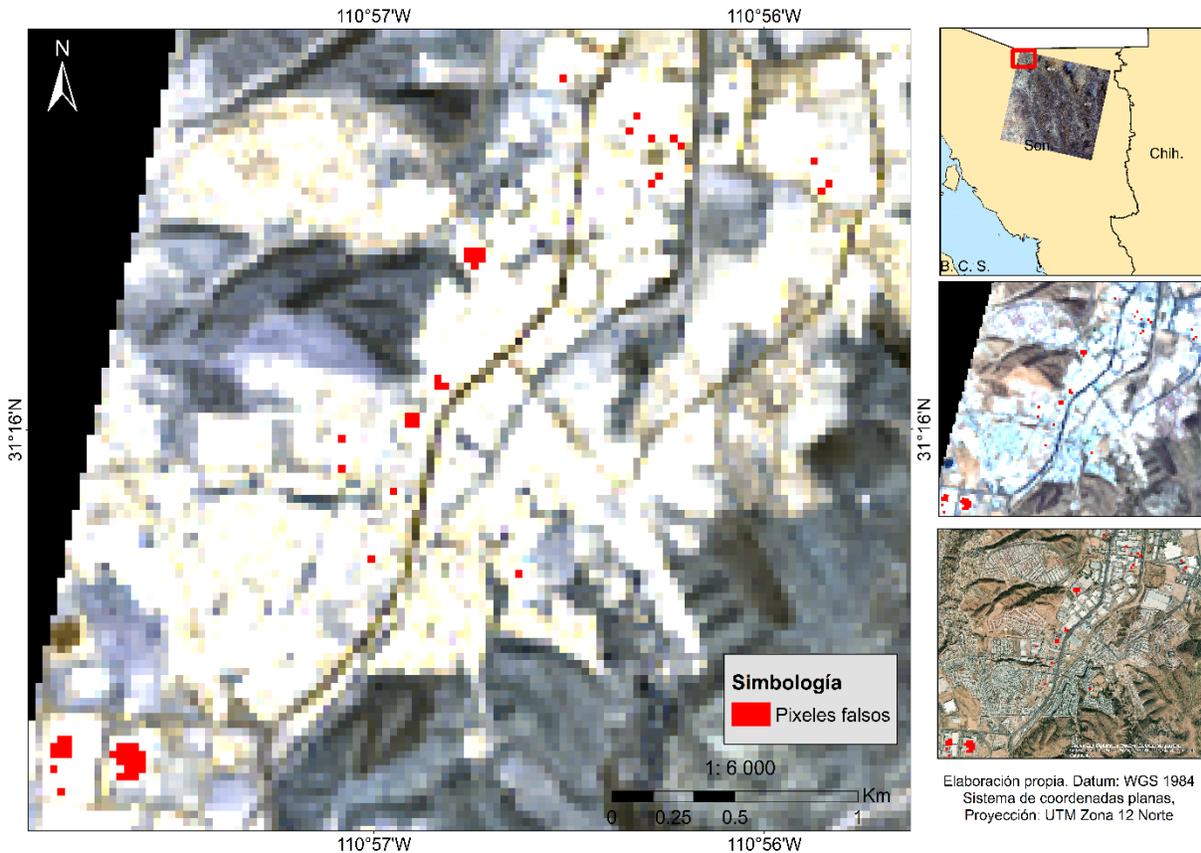


Figura 3.26 Estructuras urbanas que en condiciones de reflectancia semejan la quema de biomasa

La figura 3.26 ilustra en color natural parte de la imagen y por la reflectancia de los píxeles luminosos de las estructuras presentes se aprecia una localidad urbana. Con la combinación de las condiciones 1 y 3, los resultados fueron más evidentes y precisos en la detección de píxeles. Para el caso, esta combinación detecto píxeles falsos señalados en polígonos en color rojo. Para corroborarlo, se buscó la localidad en Google Earth y a su vez en la plantilla Basemap de ArcMap, quedando señalados como píxeles falsos.

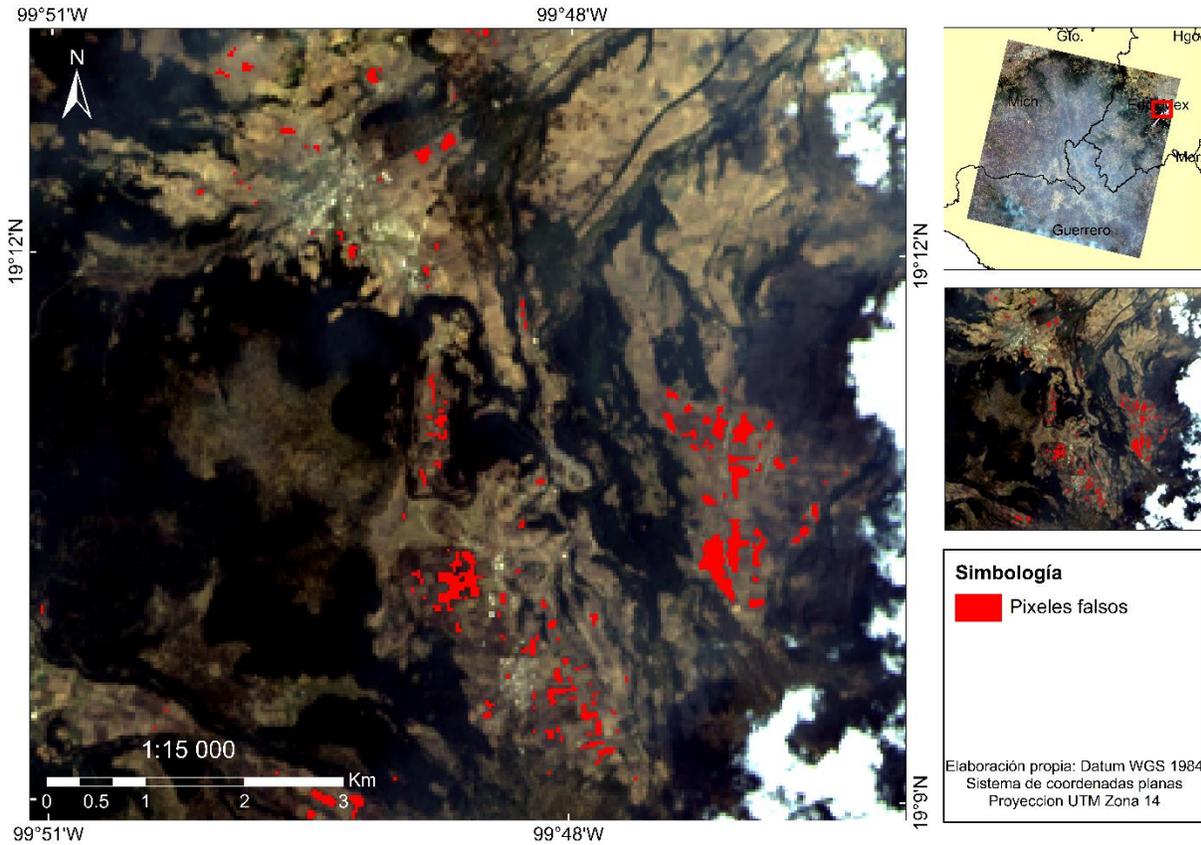


Figura 3.27 Vegetación o condiciones del suelo resultan píxeles falsos

La figura 3.27 en color natural (bandas 4-3-2), "LC08_L1TP_027047_20160503_20180131_01_T1", en la figura principal se aprecia la presencia de conjuntos de polígonos en color rojo, que de igual manera fueron detectados y señalados como píxeles falsos. Al acercar la imagen y debido a la resolución del sensor, no se pudieron distinguir las características para que el algoritmo los señalara como falsos píxeles o si los resultados se deben a ciertas características de la vegetación o del suelo. Basado en la Serie de Uso de Suelo y Vegetación VI (INEGI, 2016), señala que pertenece y es clasificado como: Agricultura de temporal anual.

A continuación, se muestra un conjunto de figuras (3.28, 3.29, 3.30, 3.31) que señalan los resultados del algoritmo en otras condiciones.

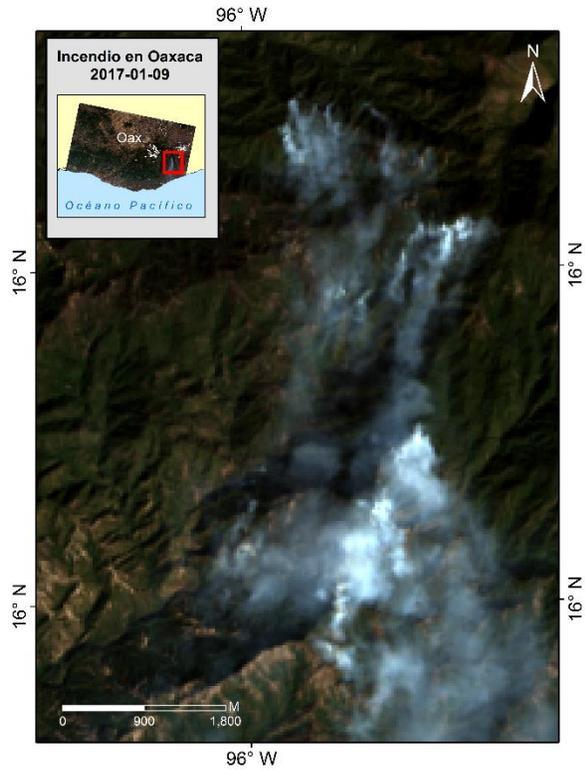


Figura 3.30 Superior izquierda, color natural

Figura 3.29 Inferior izquierda, combinación ecuación 1 y 3

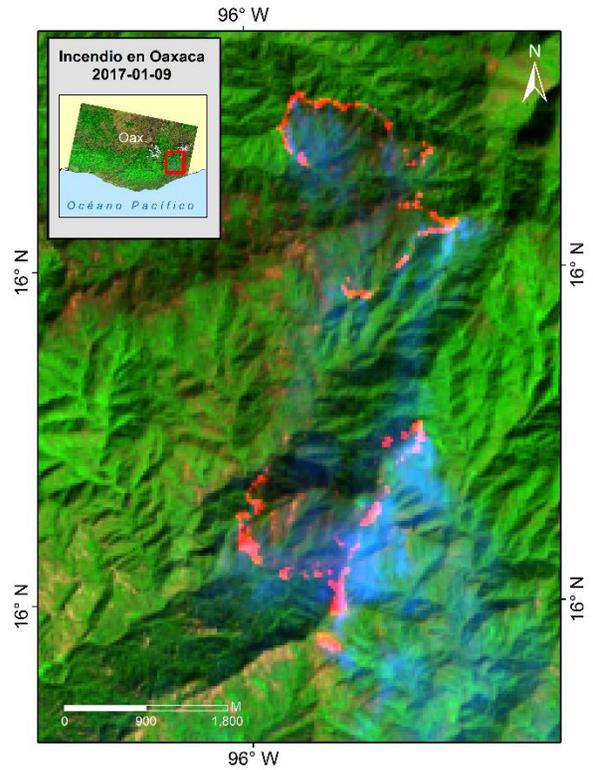
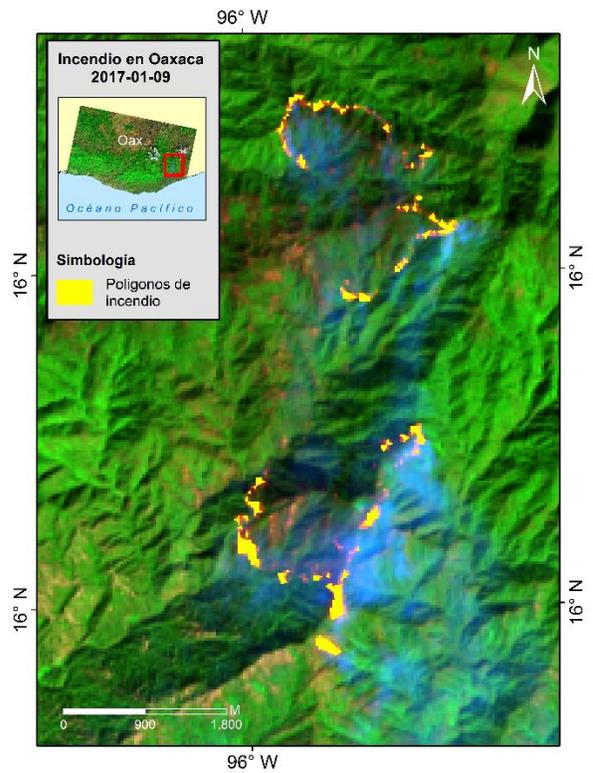
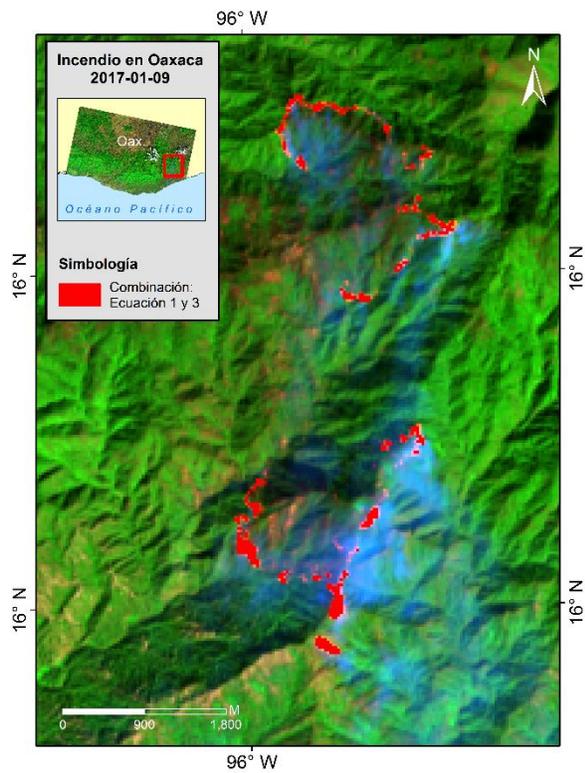


Figura 3.31 Superior derecha, falso color (7, 5, 2)

Figura 3.28 Inferior derecha, polígonos



En la figura 3.28 obtenida de la imagen "LC08_L1TP_024049_20170109_20180131_01_T1", muestra la combinación RGB de color natural utilizando las bandas OLI 4-3-2; claramente se hace visible el humo generado por el incendio forestal en cuestión. La figura 3.29, el resultado de combinación RGB de falso color basado en las bandas 7-5-2; muestra los píxeles afectados por el fuego, que se resaltan en polígonos en color naranja. En la figura 3.30, sobre la combinación de bandas anterior, se observa el resultado de la combinación de las condiciones 1 y 3 en polígonos de color rojo que cubren en su totalidad los píxeles de fuego siendo evidente la fidelidad de respuesta del algoritmo al detectar reales píxeles de fuego. En la última figura 3.31, señala en polígonos en color amarillo la unión de los píxeles de las condiciones 1 y 3, como resultado de la herramienta *single parte*, cuya función fue crear una clase de entidad que contiene entidades de parte simple generadas al separar entidades multiparte, que fueron los polígonos resultantes de la herramienta *Dissolve* trabajado previamente en las imágenes. El humo generado por el incendio no tuvo un efecto notable en el rendimiento del algoritmo, ya que los píxeles detectados se hicieron fácilmente visibles.

Las siguientes figuras 3.32 y 3.33 forman parte de otra imagen ("LC08_L1TP_022048_20140425_20170307_01_T1") y, se presenta la respuesta que el algoritmo arrojó, pero ahora en la capacidad de detección de incendios de poca magnitud.

En la figura 3.32, la sección de la imagen en color natural a simple vista no se pueden apreciar indicios de la presencia de incendios activos, salvo una mancha azul grisáceo que al no guardar relación con la cercanía de unas pequeñas acumulaciones de nubes presentes, se puede deducir alguna anomalía, como un incendios en proceso.

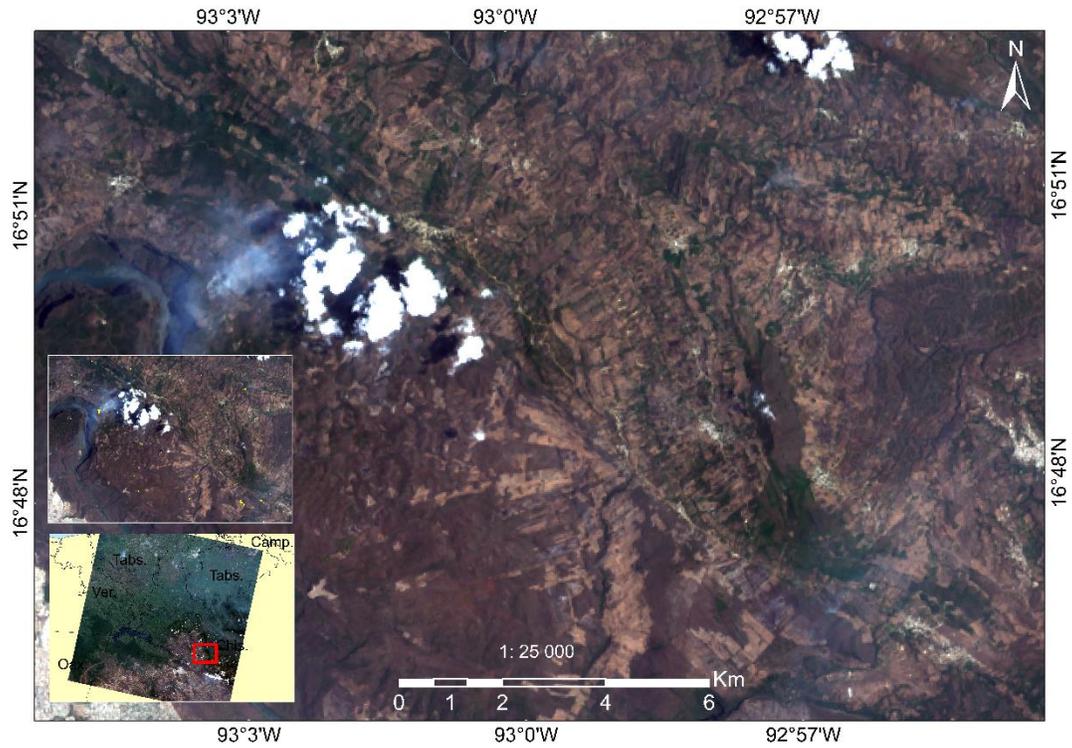


Figura 3.32 A simple inspección visual no se distingue incendio alguno

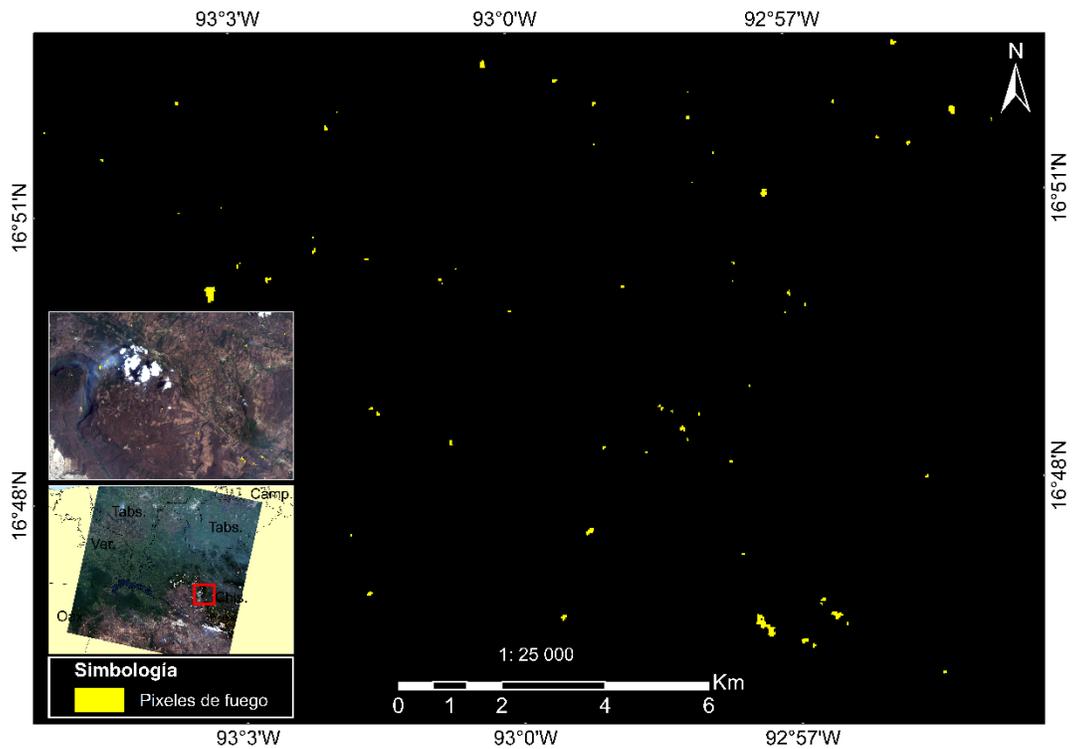


Figura 3.33 Píxeles de fuego en color amarillo indican la presencia de incendios activos

Con la figura 3.33, que se remarca sobre un fondo de pixeles de valor 0 en color negro, pixeles de fuego en color amarillo, resultado obtenido también de la combinación de las condiciones 1 y 3. Y se muestra nuevamente la capacidad de respuesta del algoritmo al detectar la presencia de varios pequeños incendios forestales activos. Que fueron corroborados en Google Earth y que son incendios relacionados con prácticas agropecuarias. Es de importancia señalar que en gran parte de la imagen completa se pudo observar varios conjuntos de incendios pequeños activos.

En la serie de imágenes a continuación, se ilustra el resultado que mostró cada una de las nueve ecuaciones utilizadas para la prueba de detección de incendios forestales. Y forma parte de la imagen "LC08_L1TP_035039_20130620_20170309_01_T1" perteneciente al estado de Sonora. Tomado como ejemplo por la magnitud del incendio forestal para y tener una mejor visualización de los resultados.

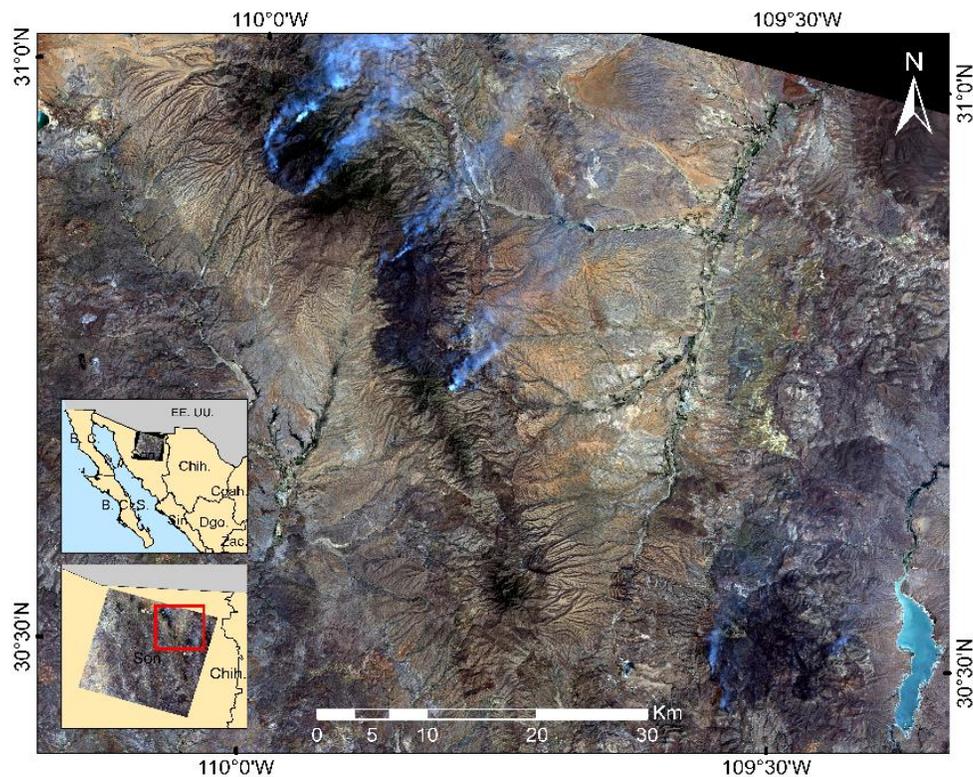


Figura 3.34 Figura referente para poder ilustrar los resultados de cada una de las ecuaciones del algoritmo de fuego

A continuación, se presentan una serie de figuras (figura 3.35, 3.36, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40, 3.41, 3.42 y 3.43) que muestran los resultados arrojados por el algoritmo de fuego.

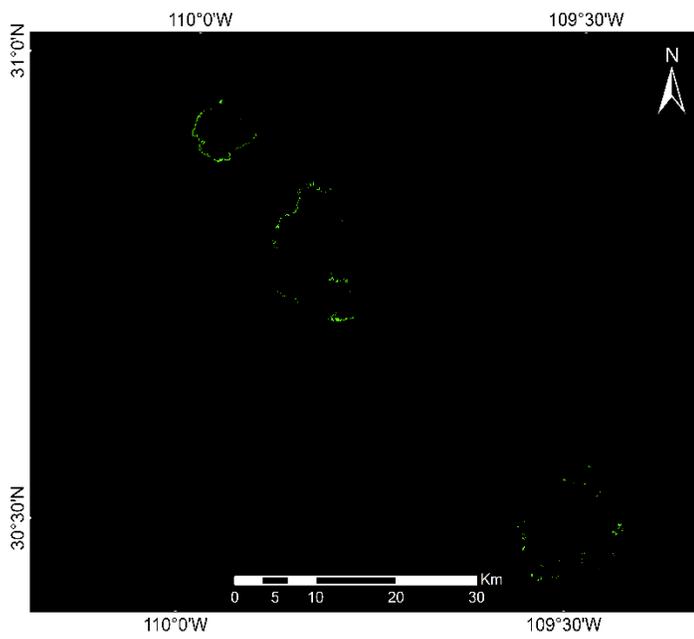


Figura 3.36 Resultado, ecuación 1

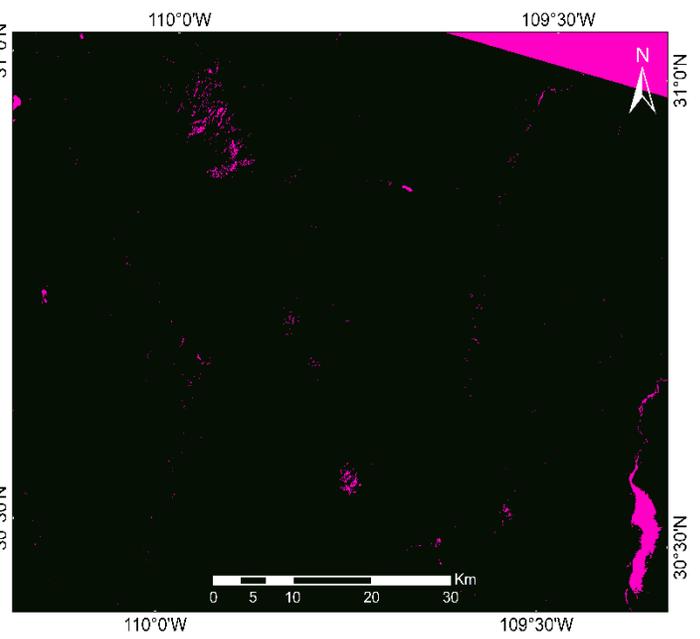


Figura 3.35 Resultado, ecuación 2

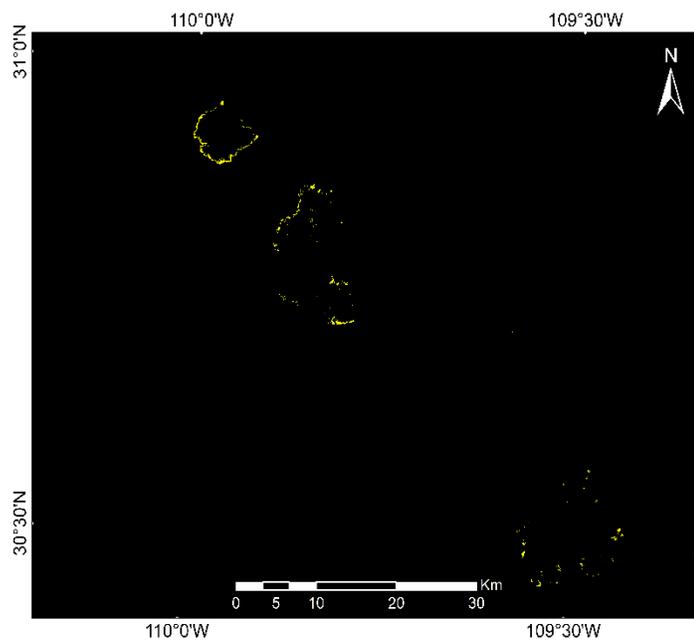


Figura 3.37 Resultado, ecuación 3

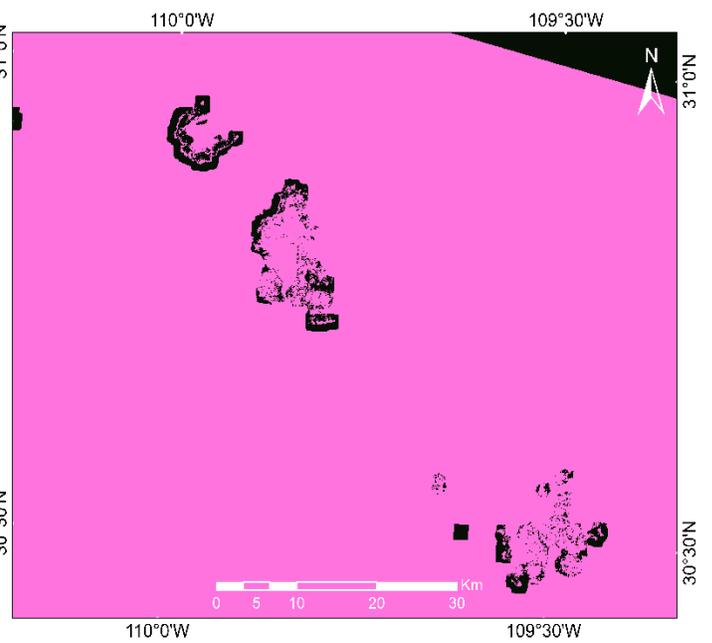


Figura 3.38 Resultado, ecuación 4

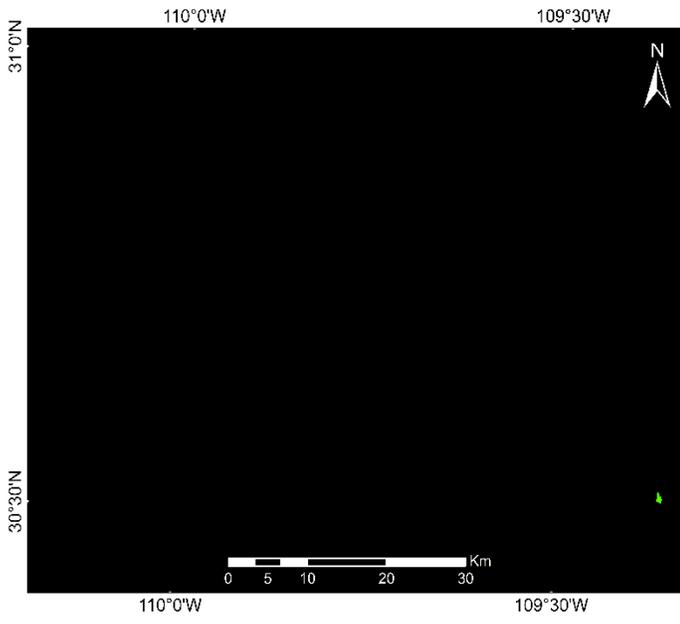


Figura 3.40 Resultado, ecuación 5

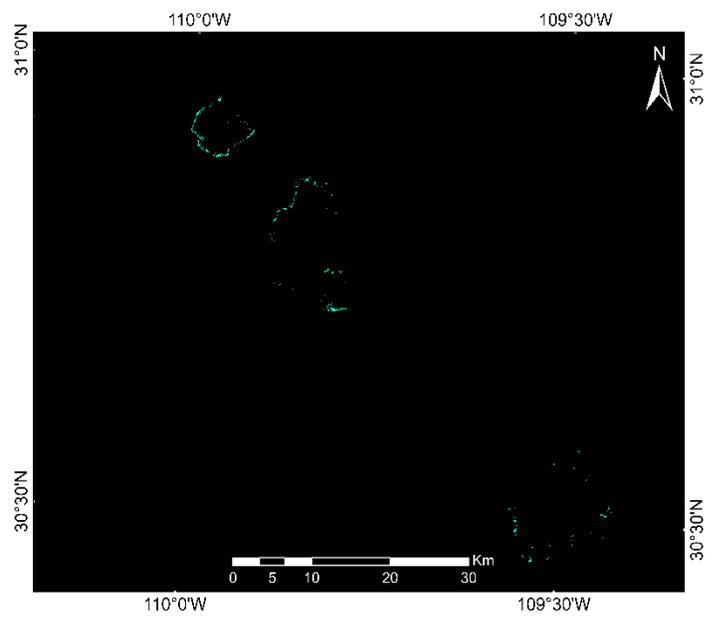


Figura 3.39 Resultado, ecuación 6

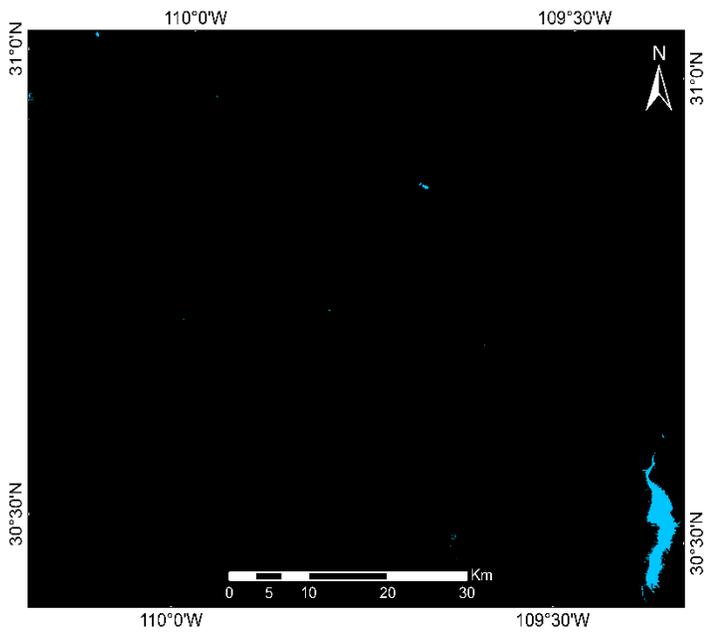


Figura 3.41 Resultado, ecuación 7

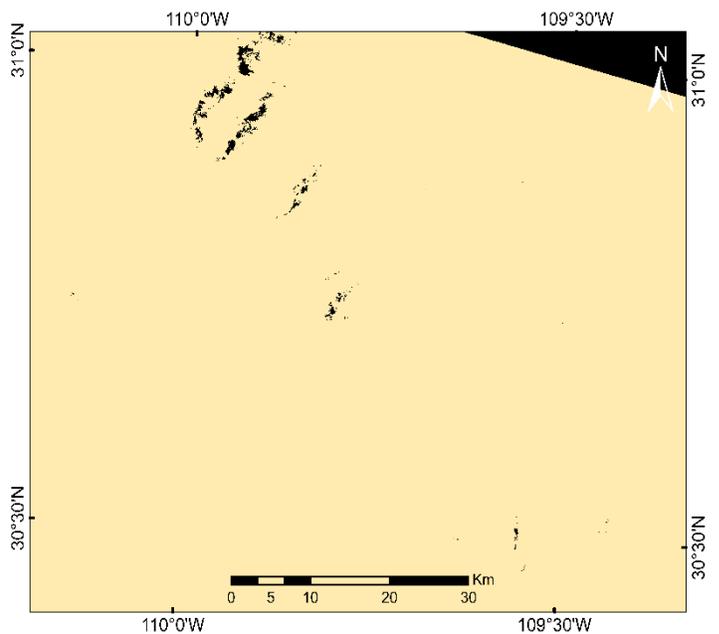


Figura 3.42 Resultado, ecuación 8

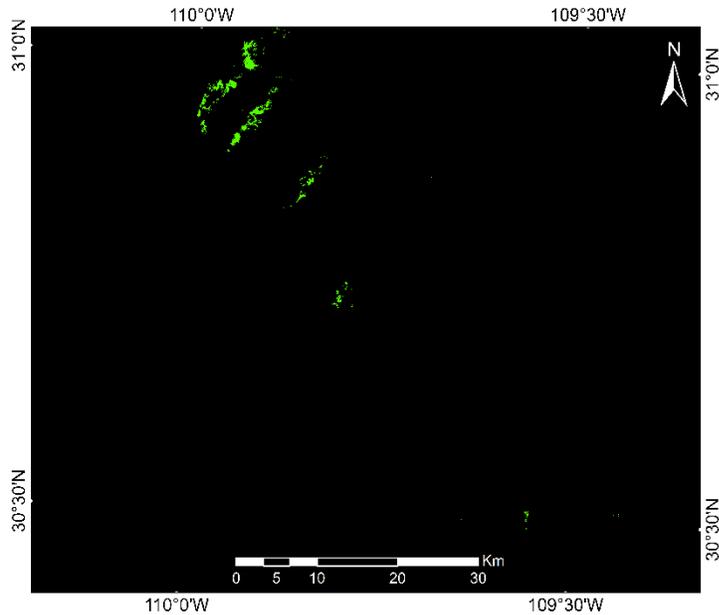


Figura 3.43 Resultado, ecuación 9

La figura 3.35 y 3.36 muestran los resultados que las ecuaciones 1 y 2, en la primera: resultado de la ecuación 1, según la ecuación está diseñada para identificar píxeles de incendio activos potencialmente reales. Y el criterio de la ecuación 2 como lo muestra la figura 3.36 su principal función es detectar incendios que pueden estar saturados, identificando además del incendio, varios elementos presentes en la imagen en color magenta. Según los resultados de la figura 3.37, que proviene de la ecuación 3, muestra píxeles de fuego candidatos a incendios potencialmente activos, identifica píxeles que la ecuación 1 no alcanzó a detectar y, como se ha mencionado anteriormente, ambas se combinaron, resultando la cobertura total de los píxeles de fuego.

La figura 3.38, 3.39 y 3.40 están definidos según las ecuaciones 4, 5, 6 y se definirán incendios activos potenciales pero deben de cumplir ciertas pruebas contextuales para ser validados y clasificarlos como posibles píxeles afectados por el fuego. Resultado del cálculo de una ventana de 61×61 píxeles de treinta metros alrededor del píxel de fuego activo potencial, figura 3.38 y 3.39, ignorando los incendios activos no ambiguos definidos por la ecuación 6 (3.40) con resultados parecidos a la figura 3.37.

Las figuras 3.41, 3.42 y 3.43 son el resultado de las ecuaciones restantes y principalmente muestran la identificación o captura de aguas poco profundas, píxeles de agua o sombras, estas pruebas y resultados se pueden confundir los elementos como la sombra de la presencia de nubes, en el caso

se detectó el humo generado por los incendios en cuestión como en la figura 3.42 y 3.43. En la figura 40 se resaltan la identificación de varios cuerpos de agua. Originalmente estas últimas tres ecuaciones fueron pruebas contextuales para la identificación de píxeles por ejemplo la quema de gas en el mar.

Al momento de intervenirlas, el resultado de cada una de las ecuaciones fue de 0 y 1, donde el resultado de valores mínimo fue 0 y el valor máximo 1. Y como se ilustra en cada una de ellas los de valor cero se identifican con el color negro y el valor 1, con los colores que se señalan.

3.5 Evaluación de la estimación

Como se mencionó en el principio de la investigación, la propagación de un incendio forestal depende de varios factores, tal es el caso del tipo de material vegetal. Es en esta razón que se realizó la comparación del tipo de vegetación afectados por los incendios forestales registrados por la CONAFOR con la Serie de Uso de Suelo y Vegetación VI (INEGI), para poder corroborar la precisión del algoritmo.

En la tabla 3.9 se muestra el número de incendios total reportado por CONAFOR que fueron registrados y contabilizados en función de la fecha de captura de las imágenes seleccionadas. Así como la ruta de identificación del producto, año y número de imágenes.

Tabla 3.9 - Número de incendios forestales reportados a la fecha de captura de las imágenes

| Imagen | Año | LANDSAT_PRODUCT_ID | Incendios CONAFOR |
|----------|------|--|----------------------|
| Imagen 1 | 2013 | "LC08_L1TP_026048_20130520_20170310_01_T1" | 4 |
| Imagen 2 | 2013 | "LC08_L1TP_033041_20130606_20170310_01_T1" | 4 |
| Imagen 3 | 2013 | "LC08_L1TP_035039_20130620_20170309_01_T1" | 1 |
| Imagen 1 | 2014 | "LC08_L1TP_022048_20140425_20170307_01_T1" | 2 |
| Imagen 2 | 2014 | "LC08_L1TP_034039_20140413_20170307_01_T1" | 1 |
| Imagen 3 | 2014 | "LC08_L1TP_035039_20140607_20170305_01_T1" | 2 |
| Imagen 4 | 2014 | "LC08_L1TP_025048_20140414_20170307_01_T1" | 1 |
| Imagen 1 | 2015 | "LC08_L1TP_024048_20150426_20170228_01_T1" | 1 |
| Imagen 2 | 2015 | "LC08_L1TP_026048_20150424_20170301_01_T1" | 8 |
| Imagen 1 | 2016 | "LC08_L1TP_027044_20160401_20180131_01_T1" | 7 |
| Imagen 2 | 2016 | "LC08_L1TP_033042_20160614_20170220_01_T1" | 1 |
| Imagen 3 | 2016 | "LC08_L1TP_027047_20160503_20180131_01_T1" | 7 |
| Imagen 4 | 2016 | "LC08_L1TP_029047_20160501_20170223_01_T1" | 5 |
| Imagen 1 | 2017 | "LC08_L1TP_024049_20170109_20180131_01_T1" | 3 |
| Imagen 2 | 2017 | "LC08_L1TP_033040_20170617_20170629_01_T1" | 4 |
| Imagen 3 | 2017 | "LC08_L1TP_039038_20170627_20170714_01_T1" | 3 |

Con base en la tabla anterior y a la realización previamente de buffers, se elaboró la tabla 3.10 para corroborar la presencia o la ausencia de incendios a partir del modelo en comprobación (algoritmo de fuego) y una inspección visual, marcando con 1 la presencia y con 0 la ausencia de incendios dentro de los buffers en cuestión.

Tabla 3.10 - Cantidad final de incendios identificados en las imágenes seleccionadas

| Año | Modelo | Inspección visual | Total de incendios de valor 0 |
|-------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| | 1 para presencia y 0 para ausencia | 1 para verdadero y 0 para falso | |
| 2013 | 8 | 8 | 1 |
| 2014 | 6 | 6 | |
| 2015 | 6 | 6 | 3 |
| 2016 | 15 | 15 | 5 |
| 2017 | 9 | 9 | 1 |
| Total | 44 | 44 | 10 |

En la columna “Modelo” se tiene la cantidad de incendios detectados dentro de los buffers, por el algoritmo de fuego. En la columna siguiente igualmente son las cantidades totales de corroboración de incendios a partir de la inspección visual. Y en la tercera columna, el total de los incendios de valor 0, incendios que si fueron registrados, pero no existe la presencia de alguno en cuestión.

En la tabla 3.11 se visualiza la relación de la vegetación afectada por los incendios, reportados por CONAFOR en comparación con la Serie de Uso de Suelo y Vegetación VI (INEGI).

Tabla 3.11 - Comparación de vegetación y precisión del algoritmo

| Tipo de vegetación | Suma | Total | Porcentaje |
|---|-------------|--------------|-------------------|
| BOSQUE DE ENCINO | 6 | 7 | 85.71 |
| BOSQUE DE ENCINO-PINO | 5 | 5 | 100 |
| BOSQUE DE PINO | 6 | 7 | 85.71 |
| BOSQUE DE PINO - ENCINO | 10 | 12 | 83.33 |
| BOSQUE DE TÁSCATE | 1 | 1 | 100 |
| CHAPARRAL | 2 | 3 | 66.66 |
| MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO | 0 | 1 | 0 |
| MATORRAL SUBMONTANO | 1 | 1 | 100 |
| SELVA BAJA CADUCIFOLIA | 1 | 3 | 33.33 |
| SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA | 1 | 1 | 100 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO | 1 | 1 | 100 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO | 1 | 1 | 100 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0 | 1 | 0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA | 1 | 1 | 100 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA | 1 | 1 | 100 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO | 4 | 4 | 100 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO | 1 | 1 | 100 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO - ENCINO | 1 | 2 | 50 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA | 1 | 1 | 100 |
| TOTAL GENERAL | 44 | 54 | 81.48 |

De la columna suma, 44 es la cantidad total de incendios reales presentes de acuerdo con los que para la fecha reportó la CONAFOR, y de la columna total, 54 es la cantidad total tomando en cuenta los incendios de valor 0, que son incendios reportados pero que no están presentes y que no fueron detectados por el algoritmo.

Y la precisión del modelo expresado en porcentajes, tomándolo de un 100% se obtuvo un porcentaje total del 81.48% de precisión en detección de incendios para el tipo de vegetación reportado, interpretado como un buen porcentaje al momento que algoritmo mostrara resultados.

La precisión expresada en porcentajes indica la existencia de especies afectadas por las llamas es de fácil detección por el algoritmo. El bosque de pino-encino, bosque de pino y bosque de encino, es el tipo de vegetación que más es afectada por los incendios según la tabla y, que se ven reflejados principalmente en los incendios de gran magnitud, duración de días y de origen natural. Corroborado al momento de la identificación de incendios en las imágenes. A la vez que hay otras especies que mínimamente son afectados, pero que al momento el algoritmo fue capaz de detectarlos a un 100 %.

3.6 Discusión

El algoritmo de fuego implementado en algunas zonas de país tuvo la capacidad de detectar incendios de diferentes magnitudes, claro resultado al mostrar respuestas de detectar incendios pequeños al tamaño de la resolución espacial del sensor, en su mayoría relacionado con prácticas agropecuarias y que en su mayoría no cuentan con un punto de coordenada de reporte.

De las 16 imágenes evaluadas en conjunto con las coordenadas, en varias se observó la diferencia entre el resultado de los incendios reportados y los incendios detectados por el algoritmo. La evidencia de que los puntos de coordenada no coinciden con los incendios presentes fue notorio, al igual de la distancia que existe entre ambos, además de que varias coordenadas no señalan algún incendio activo y viceversa.

La anterior afirmación da la pauta para poder explicar parte de los resultados y el conflicto respecto a algunas variables al modo de saber cómo fueron capturadas. Conflicto que surgen a raíz de que no se encontró un documento técnico que describa la forma de captura y registro de cada una de las variables en la base de datos.

Tal y como señalan Oom *et al.*, (2016) en su artículo *Highlighting biome-specific sensitivity of fire size distributions to time-gap parameter using a new algorithm for fire event individuation*, con un algoritmo presentado para identificar grupos de incendios activos individuales, utilizando datos de incendios satelitales MODIS. El algoritmo que han utilizado se basa en la codificación en las relaciones de contigüidad espacio-tiempo relevantes entre parches de incendios activos con la misma fecha de combustión, donde las distribuciones de tamaño de incendio muestran poca sensibilidad al parámetro de intervalo de tiempo en áreas de tierras de cultivo, donde los eventos de incendio individuales tienden a ser pequeños y el porcentaje anual de área quemada no es muy grande.

En los mapas presentados en el principio del capítulo, se muestra la distribución de los incendios para cierta temporalidad, y se puede visualizar la concentración espacial de los incendios en diferentes regiones del país.

Como lo señala Zúñiga *et al.*, (2017) Al analizar la distribución de los incendios forestales (2005-2015), utilizando información de sensores remotos y datos de campo recopilados por CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) y MODIS. Comparando ambas fuentes de información para identificar patrones de agrupamiento, a través del análisis de "puntos de calor".

Tomando como referencia el proyecto de investigación que proponen los autores antes citados, y la propuesta que realizó el sustentante se corroboró, por un lado, que la presencia de gran cantidad de "puntos calientes" sobrestiman datos y cantidad reales de los incendios ya que el sistema reconoce cualquier radiación infrarroja emitida por el fuego dando como resultado píxeles o puntos calientes falsos. Tal como lo demostró también en el algoritmo de fuego para Landsat-8. Donde se pudo detectar la presencia de píxeles falsos, pertenecientes a fuentes principalmente estructuras urbanas que semejan la firma espectral de un incendio forestal.

La afectación de cierto tipo de vegetación como es el caso del pino-encino, que fue corroborado, y que marca una precisión del 100 % al ser implementado el algoritmo, esto al momento de la comparación de reportes de la vegetación afectada reportados por las dos dependencias de gobierno mencionados anteriormente. Pompa y Hernández (2012) lo muestran en lo ocurrido en el período del 2001 a 2010 en Durango, México, que identificaron una distribución espacial agrupada notable en los ecosistemas de coníferas. Los ecosistemas del área de estudio que tuvieron mayor incidencia

de puntos de calor fueron el bosque de pino encino y el pastizal. También evaluado por medio del agrupamiento de puntos de calor.

Prácticamente el algoritmo de fuego implementado en la presente investigación, los resultados fueron satisfactorios, a sabiendas de que el algoritmo se aplicaría en una escala nacional. La propuesta llevada a cabo fue tomada de (Schroeder *et al.*, 2016), de igual manera (Kumar & Roy, 2017) la tomaron para ofrecer una versión mejorada de la misma en 2017. En ambas, las pruebas se realizaron utilizando imágenes de diferentes partes del mundo. Originalmente en la investigación llevada por el sustentante fueron más de 20 imágenes que se utilizaron para la prueba, en todas se evidenció la presencia de incendios forestales por medio de la identificación de píxeles, pero se fueron descartando imágenes debido a que la investigación estuvo acorde a puntos de coordenadas de incendios forestales ocurridos en el país, reportados por CONAFOR en la temporada antes mencionada.

En relación también con la vegetación afectada como se describe en la tabla anterior, en una investigación de Escobar (2016), con series de tiempo a nivel regional con imágenes Landsat implementó el algoritmo ISO-DATA de clasificación digital para la identificación de cubiertas vegetales, para la obtención de valores de biomasa relacionados con la estructura del bosque de pino-encino de la Sierra de San Miguelito, San Luis Potosí, México. Mostrando como resultado un porcentaje alto de material vegetal disponible para la ocurrencia de incendios, principalmente bosque de pino encino con vegetación secundaria (Chaparral) siendo esta vegetación antes mencionada con una de las que mayor afectación por incendios forestales en el país, según la misma fuente y que se puede corroborar en la tabla 3.6.

Finalmente, uno de los objetivos principales del presente estudio era corroborar la calidad de datos de incendios forestales a través de la implementación de un algoritmo de fuego a una escala nacional utilizando imágenes Landsat-8. Los resultados de precisión del algoritmo en la identificación de incendios forestales activos muestran la confiabilidad al obtener un porcentaje de 81.4% (resultado obtenido a partir de la suma total de los resultado de los incendios detectados por el modelo (algoritmo) y la suma total de la inspección visual) en la identificación de la vegetación afectada al igual de su capacidad de detectar incendios de diferentes magnitudes y en mínima cantidad la presencia de píxeles de fuego falsos, que principalmente se visualizaron en zonas urbanas.

3.7 Ventajas y desventajas del algoritmo

La lucha y el estudio sobre el fuego seguirán realizándose a través de diferentes procedimientos para poder así encontrar la manera más eficaz de combatirlos y prevenirlos. Los tipos de resultados dependerán de los objetivos de cada estudio y su procedimiento, acorde a la disponibilidad de datos e información a utilizar.

En los estudios y técnicas sobre incendios, por más precisas que sean, siempre existirán ventajas y desventajas al momento de llevar a cabo su implementación y que se reflejan en los resultados que se obtienen.

A continuación, se describen las ventajas y desventajas que se pudieron reconocer al momento de ir trabajando el algoritmo de fuego.

3.7.1 Ventajas

- La fidelidad en la detección de incendios de diferentes magnitudes. El algoritmo, con base a los resultados que arrojo, se pudo obtener desde varios conjuntos de pixeles hasta un solo pixel (30 x 30m) de fuego.
- A partir de los resultados se puede obtener y realizar de una manera precisa la visualización, el conteo y localización de los incendios.
- El análisis de imágenes con el algoritmo de fuego puede permitir la creación de una mayor calidad de datos que permitirá tener un conteo más preciso de la cantidad de incendios que realmente suceden y que no se reportan.
- La implementación del algoritmo resulta muy confiable y en términos económicos, resulta poco costoso debido a que los insumos se encuentran disponibles de manera gratuita a través de diferentes plataformas de descarga.

3.7.2 Desventajas

De igual manera existen una serie de desventajas, las cuales dificultan y obstaculizan las respuestas del rendimiento del algoritmo. A continuación, se mencionan algunas:

- Una de las mayores desventajas es la temporalidad de captura de las imágenes Landsat (resolución temporal), ya que el tiempo de revisita de este es de cada 16 días, por lo que en este rango de días se tendrá la misma imagen y zona de captura, y entonces resulta difícil obtener información sobre el ámbito que se está estudiando.
- La disponibilidad de imágenes en tal rango de días no garantiza la obtención de imágenes de calidad, esto debido a elementos presentes, como el porcentaje de nubes durante la captura en países tropicales.

3.7.3 Aprovechamiento de la implementación del algoritmo de detección de incendios

El uso de la percepción remota (Landsat-8) y los datos con los que se van a trabajar, fungen como herramientas, técnicas y fuentes que complementan el estudio de fenómenos, para el caso la distribución espacial y detección de incendios forestales.

Si bien, los resultados que se obtuvieron en la presente investigación podrían ayudar en mejorar la calidad de los datos u obtener nuevos, también se deben de tener en cuenta todos aquellos factores tanto naturales como antropogénicas para poder tener un panorama más general sobre todo lo que implica el estudio de incendios forestales en México.

Con base en la literatura consultada sobre investigaciones utilizando diferentes plataformas de percepción remota en relación con incendios forestales, en su mayoría están dirigidas al desarrollo e implementación de algoritmos que tienen la finalidad el mapeo de áreas quemadas y la gravedad de los incendios. Con la plataforma Landsat-8 fueron o son pocas las investigaciones propuestas sobre la detección de incendios utilizando imágenes y la implementación o diseño de un algoritmo creado específicamente para tales imágenes. Además de algunos estudios con series temporales de Landsat son investigaciones que cubren grandes áreas y en muchos casos no existen datos de campo para validar o corroborar resultados.

Como se ha mencionado, las imágenes de satélite Landsat son categorizadas como imágenes de resolución media pero como se pudo corroborar, tiene la capacidad de lograr una alta precisión de resultados en función de las grandes áreas que abarca cada imagen.

El trabajo aquí presentado resulta actualizado al proponer la implementación de un algoritmo de detección de incendios que originalmente fue implementado a escala global y que se puede utilizar para estudios a nivel regional, o también para una escala más local, complementando con datos del mismo nivel, y poder corroborar la confiabilidad de los datos resultantes.

◆ Conclusiones ◆

Al utilizar los datos de registro de incendios forestales a través de CONAFOR, se identificaron algunos errores, principalmente en la captura de los puntos de coordenadas de los incendios. Errores que conducen a la posibilidad de poder identificarlos en la forma en como los datos se recopilan en campo, por ejemplo: costos, la accesibilidad, conocimiento del lugar, el tiempo, tipo de equipo y su precisión, herramientas, tipo de personal, entre otros. Errores que no influyeron en la implementación del algoritmo pero que se pudo evidenciar al momento que utilizaron los datos y mostraron los resultados.

En todas las imágenes se detectaron píxeles de fuego y algunos también fueron señalados a través de coordenadas reportadas. Pero también el algoritmo detectó más píxeles (incendios) que no fueron registrados, en mayoría pertenecientes a actividades relacionadas a prácticas agropecuarias. La presencia de píxeles detectados y sin su previo registro es un claro indicativo que en diferentes temporadas y regiones del país ocurren más incendios de los que se reportan.

En el caso de las actividades agropecuarias, de los 32,700 incendios forestales reportados en la temporada 2013-2017, fueron 12,446 incendios catalogados como actividades agropecuarias que son el mayor porcentaje (38.06 %) de número de incendios reportados, además los que no fueron reportados, en su mayoría CONAFOR los cataloga como incendios de impacto mínimo.

La importancia de tener en cuenta la cuestión de las actividades agropecuarias y sus causas particulares (quema para preparación de siembra, quema para pastoreo, quema para desmontar, entre otros), radica al detectarse incendios sin ser reportados, e implica cuestionarse del por qué no se reportan este tipo de incendios, si existen algún tipo de permiso o regulaciones para quienes se dedican a las actividades agropecuarias.

Cuestionarse si son catalogados de impacto mínimo, porque son tomados en cuenta en las bases de datos, o simplemente se prioriza que tipo de incendios forestales se deben atender y registrar.

Así también preguntarnos sobre la capacidad y alcance sobre el tema de prevención y el control de los incendios forestales que en México son llevados a cabo por el Programa Nacional de Protección contra Incendios Forestales, programa que opera la CONAFOR. Institución responsable de la instrumentación y coordinación de estas actividades; sin embargo, el acceso y la recopilación de datos (especialmente las coordenadas) puede que se complique principalmente a factores logísticos y operativos que pueden llegar a restringir la cantidad y la calidad de los datos, como se pudo evidenciar en los insumos y los resultados.

Los incendios forestales seguirán siendo parte importante en la dinámica de los ecosistemas terrestres, y serán clasificados según su grado de afectación. Pero a su vez también seguirán surgiendo y perfeccionándose mejores herramientas y técnicas que permitan contrarrestar su impacto en las diferentes escalas.

Con la ayuda de nuevas tecnologías como lo son las técnicas basadas en percepción remota que a través de la manipulación de imágenes de satélites y algoritmos matemáticos se puede dar pronósticos, seguimiento, monitoreo y la propagación de los incendios forestales en tiempo real o multitemporal, esto desde la frontera de la técnica.

Como lo es la plataforma Landsat, el cual permite el libre acceso a su disponibilidad de imágenes, y que en el presente proyecto de investigación se corroboró la función de un algoritmo de detección de incendios desarrollado para Landsat -8, que se implementó en zonas del territorio Mexicano a través de una selección de imágenes en conjunto con datos de incendios forestales. Lo que nos permitió entender la relación que existe en la cantidad de incendios detectados y los incendios registrados, y poder comprender y contribuir al análisis sobre la pérdida de superficie forestal causada por los incendios forestales.

Y qué a través de los resultados obtenidos se pudo observar la detección de incendios de diferentes magnitudes según CONAFOR, debido a sus características de resolución espacial del sensor también se pudo detectar incendios de impacto y mínima magnitud en las imágenes. Así, las técnicas de percepción remota para la detección de incendios forestales, complementado con datos disponibles de ubicación de los incendios, posibilita la capacidad de tener información complementaria de los incendios que suceden, pero no son registrados y que con la capacidad y calidad del algoritmo se pueden obtener información sobre cómo se manejan los datos de incendios a distintas escalas en el país.

Aun teniendo como mayor limitante la temporalidad de las imágenes de Landsat, fue posible obtener y validar nuevos datos sobre incendios forestales o revalidar y complementar los ya existentes. Permitiendo entender cómo se están generado los datos de incendios en el país.

Al existir una gran cantidad de incendios relacionados con las actividades agropecuarias reportados y no reportados, hace que se deriven a partir del presente trabajo de investigación una contribución sobre una aproximación sobre la ocurrencia de incendios. Principalmente con las que las actividades humanas tiene influencia y contrarrestar los de ocurrencia natural, que representan un porcentaje menor, pero con mayor afectación.

Por todo lo anterior planteado en el proyecto de investigación se tiene la posibilidad no de poder reducir la cantidad y el promedio de incendios forestales que ocurren en el país, pero sí de tener una mejor perspectiva sobre manejo y calidad de datos de estos.

Bibliografía

- Argentina.gob.ar. (2016). El fuego. Recuperado de: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/>.
- Arias, H. A., Zamora, R. M., & Bolaños, C. V. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, RapidEye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39-59.
- ARTMO (Automated Radiative Transfer Models Operator). (sin fecha). Radiative Transfer Models. (En línea). Recuperado de <https://artmtoolbox.com/radiative-transfer-models/atmospheric-rtms.html>
- Blanco, J., García, D., Castellnou, M., Molina, D., Grillo, F., & Pous, E. (2008). Curso básico de incendios forestales. (En línea). Recuperado de <https://www.scribd.com/doc/219159208/Curso-Basico-de-Incendios-Forestales>.
- Bond, W. J., & Keane, R. (2017). Fires, ecological effects of. Reference Module in Life Sciences. doi: 10.1016/B978-0-12-809633-8.02098-7.
- Brizuela, A., Aguirre, C., & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *Memorias. Teledetección. Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Madrid, España, 21.
- Butler, M. J. A., Mouchot, M. C., Barale, V., & LeBlanc, C. (1990). Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio (No. 639.2028 BUTa). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/t0355s/T0355S00.HTM#toc>.
- Camacho, J. A. A., Díaz-Ramírez, A., Figueroa, R. I. A., & Rosas, V. Q. (2015). Red de sensores inalámbrica para la detección de incendios forestales. *Research in Computing Science*, 107, 73-85.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2004). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas Nacional de Desastres.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2014). Incendios Forestales. Serie fascículos. México
- Chávez, P. S. Jr. (1988). An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data, *Remote Sensing of Environment*, 24 , 459-479.
- Chávez, P. S. Jr. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- Chávez, P. S. Jr., C. s. Stuart, and J. A. Anderson (1991). Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat T M and SPO T Panchromatic, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(3), 295—303.

- Cheng, D., Rogan, J., Schneider, L., & Cochrane, M. (2013). Evaluating MODIS active fire products in subtropical Yucatán forest. *Remote Sensing Letters*, 4(5), 455-464.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2018). Datos Abiertos de México - Incendios forestales. (En línea). Recuperado de: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/incendios-forestales>
- Cruz-López, M. I. (2013). Sistema de Alerta Temprana de Incendios Forestales en México. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Obtenido de: <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.33.48/doc/p0524.pdf>
- Cruz-López, M. I., López-Saldaña, G., Ressler, R., & Colditz, R. (2011). Sistema de alerta temprana para incendios forestales en México. Mas, JF. Coord., *Aplicaciones Del Sensor MODIS Para El Monitoreo Del Territorio*
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2014). Programa Nacional Forestal 2014-2018. Recuperado de <http://www.dof.gob.mx>
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2011). Tercera sección. Lineamientos de operación específicos del fondo de desastres naturales. Recuperado de: <https://www.gob.mx>
- ESA (European Space Agency). (Sin Fecha) Ejercicio 1: representación de las imágenes de satélite. Recuperado de: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Disasters_ES/SEMFZR66AQH_1.html
- Escobar Carmona, R. (2016). Estimación de biomasa forestal de la sierra de San Miguelito por medio de imágenes de satélite (Tesis de Maestría). (En línea). Recuperado de: <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/462/3/TMIPICYTE8E72016.pdf>
- European Commission, (2018). Active Fire Detection. Recuperado de: <http://effis.jrc.ec.europa.eu/about-effis/technical-background/active-fire-detection/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal*.
- Fontal, B. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. Ed, Escuela Venezolana para la enseñanza de la química. Pag 1-151.
- Giglio, L., Csiszar, I., Restás, Á., Morisette, J. T., Schroeder, W., Morton, D., & Justice, C. O. (2008). Active fire detection and characterization with the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 3055-3063.
- Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178, 31-41.

- González Alonso, F. (1993). Aplicación de la Teledetección espacial al estudio de los incendios forestales. Detección de incendios en Galicia. Congreso Forestal Español. Recuperado de: http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/view/14895/14738
- Hernández, H.J. 2011. Procesamiento Digital de Imágenes. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, U. de Chile. 38 pp. (ISBN 978-956-353-324-8).
- Hernández-Hostaller, N. (2016). Evaluación de tecnologías de sensores para la detección temprana de incendios forestales. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(4), 123-138.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). (2007). TELEDETECCIÓN. Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano. Bogota, Colombia. (En línea). Recuperado de: <https://docplayer.es/11503697-Mejora-de-los-sistemas-de-cartografia-del-territorio-colombiano-capitulo-3-teledeteccion-union-europea-centro-internacional-de-agricultura-tropical.html>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2016). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Union). Escala: 1:250 000. Edición 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- ITT Visual Information Solutions. (2009). ENVI - Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide, Version 4.7, pp. 44.
- Julio, G., & Giroz, G. (1975). Notas sobre el comportamiento del fuego y su aplicación en el control de incendios forestales. *Bosque*, 1(1), 18-27.
- Kant, Y., Prasad, V. K., & Badarinath, K. V. S. (2000). Algorithm for detection of active fire zones using NOAA AVHRR data. *Infrared physics & technology*, 41(1), 29-34.
- Kumar, S. S., & Roy, D. P. (2017). Global operational land imager Landsat-8 reflectance-based active fire detection algorithm. *International Journal of Digital Earth*, 11(2), 154-178.
- Labrador, M., Évora, J., & Arbelo, M. (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias. España. (En línea). Recuperado de: http://www.gmrcanarias.com/wp-content/uploads/2016/01/20_catalogo_satelites_es.pdf
- LAEFF (Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental). (Sin fecha). Capítulo 1. Propiedades de la radiación electromagnética. PARTNeR. Recuperado de: https://partner.cab.intacsic.es/printable_section.php?Section=Curso_Fundamentos_Capitulo_1
- LaNGIF (Laboratorio Nacional de Geoprocamiento de Información Fitosanitaria). (2009). Aplicación de la percepción remota a la vigilancia epidemiológica. Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria: Recuperado de <http://langif.uaslp.mx/documentos/privada/PercepcionRemota20100415.pdf>

- Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., & Benson, N. C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), 319-345.
- Lin, L., Meng, Y., Yue, A., Yuan, Y., Liu, X., Chen, J., & Chen, J. (2016). A spatio-temporal model for forest fire detection using HJ-IRS satellite data. *Remote Sensing*, 8(5), 403. Recuperado de: <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/5/403/htm>
- Lira, J. (2011). *La Percepción Remota*. (UNAM, Ed.) México.
- MappingGIS. (2018) 6 opciones para descargar imágenes Landsat GRATIS: (En línea). Recuperado de: <https://mappinggis.com/2015/05/como-descargar-imagenes-landsat/>
- Martínez, M. J. M., Martínez, J. M. P., & Rosales, Y. F. O. (2004). Implementación de un algoritmo para la detección de fuegos usando imágenes GOES. *Incendios forestales en México: métodos de evaluación*, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, 29-44.
- Matson, M., & Dozier, J. (1981). Identification of Subresolution High Temperature Sources Using Thermal IR Sensor: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/291670850_IDENTIFICATION_OF_HIGH_TEMPERATURE_SOURCES_USING_THE_THERMAL_INFRARED_SENSORS_ONBOARD_THE_NOAA-6_SATELLITE.
- Murphy, S. W., de Souza Filho, C. R., Wright, R., Sabatino, G., & Pabon, R. C. (2016). HOTMAP: Global hot target detection at moderate spatial resolution. *Remote sensing of environment*, 177, 78-88.
- NASA.a. (2018). Landsat 8. Recuperado de: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/>
- NASA.b. (2018). Landsat 8 Overview. Recuperado de: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview/>
- NASA.c. (2018). NASA Covers Wildfires from Many Sources. California Institute of Technology: Recuperado de: <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7046>
- Navia, J. A., & Rivera Morales, L. E. (2016). Análisis multitemporal de coberturas en la subzona hidrográfica alto río Cauca utilizando imágenes satelitales Landsat. Universidad de Manizales. Colombia. Recuperado de: <http://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2806/trabajo%20version%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Oom, D., Silva, P. C., Bistinas, I., & Pereira, J. (2016). Highlighting biome-specific sensitivity of fire size distributions to time-gap parameter using a new algorithm for fire event individuation. *Remote Sensing*, 8(8), 663.

- Pathak, V. N., Pandya, M. R., Shah, D. B., Trivedi, H. J., Patel, K. D., Sridhar, V. N., & Singh, R. P. (2014). Inter Comparison of Atmospheric Correction Models-SACRS2, FLAASH and 6SV Using Resourcesat-2 AWiFS Data. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(8), 881.
- Plana, E., Font, M., & Serra, M. (2016). Los incendios forestales: guía para comunicadores y periodistas. CTFC. Recuperado de http://efirecom.ctfc.cat/docs/efirecomperiodistes_es.pdf.
- Pompa García, M., & Hernández González, P. (2012). Determinación de la tendencia espacial de los puntos de calor como estrategia para monitorear los incendios forestales en Durango, México. *Bosque (Valdivia)*, 33(1), 63-68.
- QUAC. (2009), Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide.
- Reuter, F. (2009). Principios de teledetección. Universidad Nacional De Santiago Del Estero, Serie Didáctica N3379, 01p.
- Richter, R. (2014), ATCOR-2/3 User Guide, Version 8.3.1.
- Rodríguez Martín, J. (2014). Corrección atmosférica de imágenes de satélite por métodos de aprendizaje automático. (Tesis Doctoral) Universidad de Valladolid.
- Rodríguez Trejo, D. A. (1996). Incendios Forestales. (U. A. Chapingo, Ed.) México: Mundi-prensa.
- Schowengerdt, R. A. (2006). Remote sensing: models and methods for image processing. (3rd ed), Academic Press.
- Schroeder, W., Morisette, J. T., Csiszar, I., Giglio, L., Morton, D., & Justice, C. O. (2005). Characterizing vegetation fire dynamics in Brazil through multisatellite data: Common trends and practical issues. *Earth Interactions*, 9(13), 1-26.
- Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., & Csiszar, I. A. (2014). The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 143, 85-96.
- Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., Quayle, B., Lorenz, E., & Morelli, F. (2016). Active fire detection using Landsat-8/OLI data. *Remote sensing of environment*, 185, 210-220.
- Schroeder, W., Prins, E., Giglio, L., Csiszar, I., Schmidt, C., Morisette, J., & Morton, D. (2008). Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2711-2726.
- SEILAF (Sistema de Entrenamiento Integrado de Lucha Antiincendios Forestales). (Sin fecha). Factores que afectan al comportamiento del incendio. Recuperado de: <http://www.seilaf.com/descarga-documentos/formacion/50>

- SEMAR (Secretaría de Marina). (2009). Percepción Remota. Recuperado de: <http://2006-2012.semar.gob.mx/informacion-sector/ciencia/ermexs/temas-de-interes/384-percepcion-remota.html>.
- SMN. (sin fecha). Detección y Seguimiento de Incendios Forestales en México. Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/incendios-forestales-descripcion>
- SNIGF (Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal). (2018). Informes de históricos de Incendios Forestales. Recuperado de: <https://snigf.cnf.gob.mx/incendios-forestales/>
- Soca Flores, R. (2017). Corrección atmosférica SMAC para imágenes del sensor OLI del satélite Landsat-8, (Tesis de Licenciatura) Universidad Nacional de san Cristóbal de Huamanga. Perú
- USGS (United States Geological Survey). (2016). Landsat—Earth observation satellites (ver. 1.1, August 2016): U.S. Geological Survey Fact Sheet 2015–3081, 4 p., <http://dx.doi.org/10.3133/fs20153081>.
- USGS (United States Geological Survey).a. (2017). Landsat Project Description. Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/landsat-project-description>.
- USGS (United States Geological Survey).a. (2018). Landsat Project Description. Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/landsat-project-description>.
- USGS (United States Geological Survey).b. (2017). Landsat Missions: Imaging the Earth Since 1972. Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>
- USGS (United States Geological Survey).b. (2018). Landsat Missions Timeline. Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>.
- USGS (United States Geological Survey).c. (2018). Glossary and Acronyms. Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/glossary-and-acronyms>.
- USGS (United States Geological Survey).d. (2018). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook - Section 2 | Landsat Missions. Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-l8-data-users-handbook-section-4>
- Vellozas, T., Púa, M., Mello, E. D., & Cardozo, J. (2010). Incendios forestales y su afectación al medio ambiente, prevención y combate. Instituto Militar de estudios superiores Escuela de Ingeniería Militar. Montevideo (Uruguay). Recuperado de: <https://docplayer.es/58449082-Incendios-forestales-y-su-afectacion-al-medio-ambiente-prevencion-y-combate.html>
- Viera González, P. M. (2014). Estudio del acoplamiento de un colector solar con fibras ópticas plásticas para la iluminación de interiores (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Zúñiga-Vásquez, J. M., Cisneros-González, D., Pompa-García, M., Rodríguez-Trejo, D. A., & Pérez-Verdín, G. (2017). Modelación espacial de incendios forestales en México: una integración de dos bases de datos. *Bosque (Valdivia)*, 38(3), 563-574.