UNIVERSIDAD JUÁREZ DEL ESTADO DE DURANGO

Facultad de Ciencias Forestales

“AUTOMATIZACIÓN DE LA DELIMITACIÓN DE CONGLOMERADOS DE PUNTOS DE CALOR PARA MÉXICO”

TESIS:

Marco Antonio Hernández Pérez

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN GEOMÁTICA APLICADA A RECURSOS FORESTALES Y AMBIENTALES

Durango, Durango
Mayo 2021

UNIVERSIDAD JUÁREZ DEL ESTADO DE DURANGO

Facultad de Ciencias Forestales

“AUTOMATIZACIÓN DE LA DELIMITACIÓN DE CONGLOMERADOS DE PUNTOS DE CALOR PARA MÉXICO”

TESIS:

Marco Antonio Hernández Pérez

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN GEOMÁTICA APLICADA A RECURSOS FORESTALES Y AMBIENTALES

Durango, Durango
Mayo 2021

AGRADECIMENTOS

A la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), especialmente a la Maestría en Geomática Aplicada a Recursos Forestales y Ambientales (MAGARFA) por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

A la Facultad de Ciencias Forestales por brindarme la oportunidad de seguir preparándome en esta institución “Es un orgullo ser parte de esta institución”.

El financiamiento para este trabajo fue proporcionado por el Proyecto CONAFOR-CONACYT-2018-C02-B-S-131553 “Reforzamiento al sistema nacional de predicción de peligro de incendios forestales de México para el pronóstico de conglomerados y área quemada“, financiado por el Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica y Forestal CONAFOR-CONACYT

A mi comité de tesis integrado por: Dr. Daniel José Vega Nieva, Mtro. Jaime Briseño Reyes y al Dr. Miguel Ángel Pulgarín Gámiz por sus valiosas contribuciones para mejorar este trabajo.

A todos los profesores que fueron parte de mi formación en esta etapa de mis estudios, gracias por sus enseñanzas.

A mis compañeros de grupo Gerardo, Osvaldo y Rolando. Gracias por su amistad y apoyo. Y al gran y estimado compañero Carlos Briones

Al Dr. Miguel Ángel Pulgarín Gámiz y la Dra. Emily García Montiel por su amistad y apoyo en mis estudios de posgrado.

DEDICATORIA

A mi esposa Raquel Abigail Alfaro Rueda por su apoyo incondicional para la conclusión de mis estudios de posgrado.

A mis hijos Lía Abigail, Marina Lizeth, Eliza Fernanda y Marco Antonio por ser la motivación principal da salir a delante día con día.

A mi madre Marina Aidé Pérez Blanco por su incansable apoyo y cariño.

A mis hermanos Yadhira Aidé y Brenda Janeth.

A mi asesor y amigo el Dr. Daniel José Vega Nieva por compartirme sus conocimientos y por la confianza depositada en mí.

.

El presente anteproyecto de investigación titulado **“Automatización de la delimitación de conglomerados de puntos de calor para México”,** se realizará bajo la dirección del Comité de Titulación particular indicado aprobado por la Comisión de Titulación y autorizado por la DEPI como requisito para desarrollar el proyecto de titulación correspondiente:

MAESTRÍA EN GEOMÁTICA APLICADA A RECURSOS

FORESTALES Y AMBIENTALES

DIRECTOR

Dr. Daniel José Vega Nieva _____

CODIRECTOR

G.T.F. Max Julio Almonte Noriega _____

ASESOR

Dr. Jaime Briseño Reyes _____

ASESOR

Dr. Miguel Ángel Pulgarín Gámiz _____

Durango, Dgo., mayo del 2021

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN 1
2. OBJETIVOS E HIPOTESIS 3
   2.1. Objetivos 3
   2.1.1 Objetivo General 3
   2.1.2 Objetivos específicos 3
   2.2 Hipótesis. 3
3. REVISIÓN DE LA LITERATURA 4
   3.1. Herramientas para el mapeado de área quemada y puntos de calor. ... 4
   3.2. Desarrollo de herramientas para la delimitación automatizada de conglomerados de puntos de calor. 4
4. MATERIALES Y MÉTODOS 6
   4.1. Materiales. 6
   4.1.1 Descripción del Área de Estudio 6
   4.2. Métodos 7
   4.2.1 Puntos de calor VIIRS y MODIS y área quemada MODIS C6 (MCD64A1). 7
   4.2.2. Predicción de área quemada a partir de conglomerados Alpha shape de puntos de calor VIIRS y MODIS. 8
5. RESULTADOS Y DISCUSION 10
   5.1. Resultados 10
   5.2. Discusión 13
6. CONCLUSION Y RECOMENDACIONES 14
7. LITERATURA CITADA 15

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes y estadísticos de ajuste para predecir el área quemada por Alpha Shape obtenida desde el año 2018 hasta el 2020. 10

INDICES DE FIGURAS

Figura 1. Registro histórico de número de incendios y superficie afectada por incendios forestales del periodo 2009-2018. Fuente: CONAFOR, 2020. 1

Figura 2. Ejemplo de interpolado de puntos de calor de los sensores de VIIRS y MODIS para el estimado rápido perímetros de incendios en el Sistema Europeo de Información de Incendios Forestales. 5

Figura 3. Mapa de localización del área forestal de México, considerando el mapa de Uso de Suelo Serie VI (2014), 1:250,000, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014). Áreas forestales y no forestales se muestran en verde y blanco, respectivamente; asentamientos humanos en negro y los cuerpos de agua en azul, respectivamente, de acuerdo con INEGI Mapa de Uso de Suelo VI (2014), (1:250,000). Detecciones de incendios forestales (2018–2020) que representan la supresión de incendios efectuada por el gobierno de México, a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) durante el periodo de estudio. 7

Figura 4. Ejemplo del funcionamiento de la técnica de agregación Alpha Shape. 8

Figura 5. Valores predichos (eje x) frente a observados (aje y) del área quemada MCD64A1 prevista, utilizando la Ecuación (1), a partir de la agregación de puntos de calor a 0.008, 0.002 y 0.001. La línea negra representa la línea del modelo de la correlación observada y predicha. 12

Figura 6. Evolución mensual de 2018 a 2020 del área total quemada MODIS C6 MCD64A1 (C6) área de la agregación de puntos de calor VIIRS y MODIS Alpha 0.008 (alpha). Los datos se muestran en hectáreas. La línea negra punteada representa el área Alpha 0.008 y la línea continua gris el área MODIS C6 MCD64A1.**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 7. Ejemplos de incendio seleccionado de mayo de 2018 (a,b,c), 2019 (d,e,f) y abril de 2019 (g,h,i). La línea negra representa el área total quemada MODIS C6 MCD64A1 C6. En color negro los Alpha 0.0008 (a,d,g), 0.002 (b,c,h) y 0.001 (c,f,i). En color azul las detecciones de puntos de calor VIIRS y MODIS de mayo de 2018 y abril y mayo de 2019, respectivamente. 13

RESUMEN

La detección remota por satélite proporciona información de manera inmediata sobre el análisis de incendios forestales y la evaluación posterior al incendio, incluida la estimación del perímetro y el área quemada afectada por incendio forestal. Los puntos de calor pueden ofrecer información para estimar los perímetros en tiempo real, pero se necesita analizar los algoritmos para su delimitación automatizada. El objetivo de este estudio es presentar un algoritmo de interpolado automático en código abierto a través de diferentes librería de Python (Qgis y Leaflet), con la finalidad de que delimite los conglomerados de puntos de calor detectados en las diferentes regiones de México en tiempo real, en donde se refleje el avance de la superficie y dirección de los conglomerados de puntos de calor detectadas en las áreas forestales a través de los satélites de TERRA y/o AQUA por medio del sensor de MODIS y también los datos obtenido del instrumento de monitores del sensor de VIIRS dentro del satélite Suomi NP. Los conglomerados de áreas quemadas obtenidos de los puntos de Calor de VIIRS y MODIS, fueron comparados frente al área quemada Colección 6 de MODIS. Podrán ser consultadas a través de un sitio web para apoyar la toma de decisiones de manejo del fuego.

SUMMARY

Automation of the delimitation of active fires cluster perimeters for Mexico provides immediate information on wildfire analysis and post-fire assessment, including estimation of perimeter and area burned affected by wildfire. Active fires can provide near-real-time fire perimeters, but the techniques for their automated interpolation needs to be analyzed. The objective of this study is to present an open-source automatic interpolation algorithm through different Python libraries (Qgis and Leaflet), in order to delimit the active fire clusters detected in the different regions of Mexico in real time. Interpolated active fires from TERRA and / or AQUA satellites from MODIS sensor and from the VIIRS sensor inside the Suomi NP satellite, were used to obtain fire perimeters. The interpolated fire perimeters obtained from the Modis and VIIRS Heat points were compared against the Burned Area Map Collection 6 from MODIS. They may be consulted through a website, to any interested person from different UMAFORES organizations, to the three levels of Governments, Forest Technical Service Providers, NGOs, among others.

1. INTRODUCCIÓN

El fuego juega un papel importante en los procesos naturales, en este sentido, afecta la composición del gas en la atmósfera, el clima, los biomas y los accidentes geográficos.

Las estadísticas nacionales que se muestran en la figura 1, muestran el registro de número de incendios y las superficies que se han afectado por la presencia de estos siniestros en un periodo de 10 años (CONAFOR, 2020).

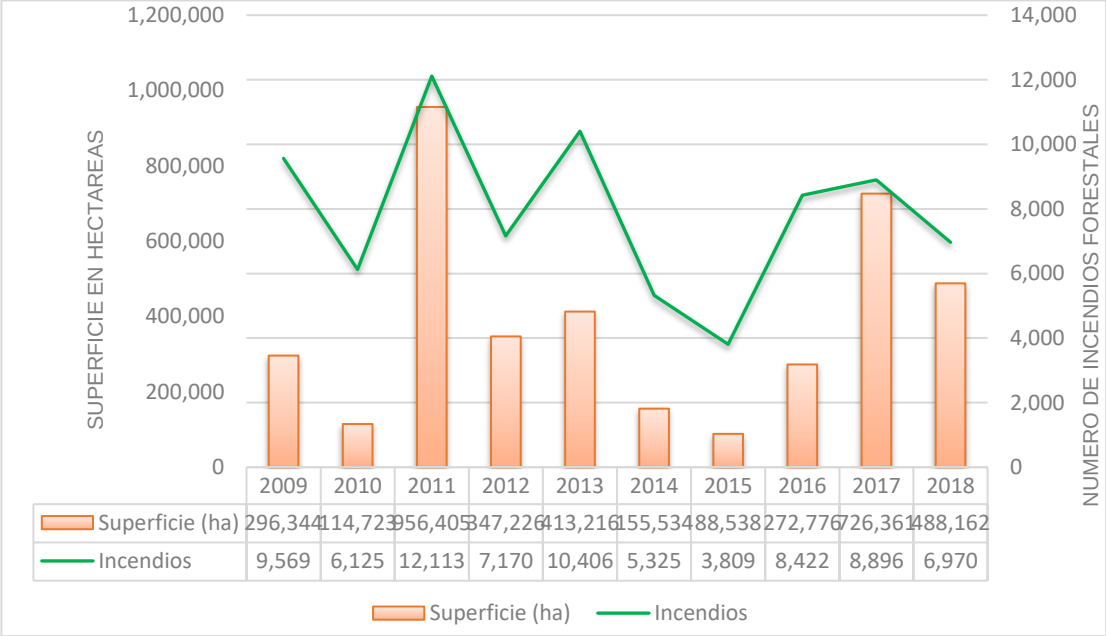


Figura 1. Registro histórico de número de incendios y superficie afectada por incendios forestales del periodo 2009-2018. Fuente: CONAFOR, 2020.

Existe una necesidad de mapear el área quemada en tiempo casi real, siendo tarea susceptibles ser realizada automáticamente a partir de la interpolación de puntos de calor, ofreciendo información actualizada con cada pase del satélite libre de sesgo de operadores manuales, ahorrando tiempo de los tomadores de decisiones, permitiendo centrar su análisis en la interpretación y toma de decisiones en base al número de conglomerados observados, su presencia en

áreas forestales y la priorización de las decisiones de combate (Artés *et al*., 2017; Briones-Herrera *et al*., 2020).

Algunos estudios han demostrado que los grupos de puntos de calor interpolados automáticamente son útiles para visualizar el progreso aproximado del perímetro del fuego e incluso calibrar el modelo de propagación del fuego, y son muy útiles para monitorear y rastrear su progreso y la planificación del combate (Loboda y Csiszar 2007; Henderson *et al.,* 2010; Thorsteinsson *et al.* 2011; Kasischke and Hoy, 2011; Veraverbeke *et al.* 2014; Chiaraviglio *et al.,* 2016, Artés *et al.,* 2017)-

Se requiere calibrar y analizar los algoritmos de interpolación de puntos de calor para los tipos de vegetación mexicana basados en el histórico de los puntos de calor, a fin de determinar rápidamente en el sistema de peligro el perímetro de grandes incendios basado en los puntos de calor VIIRS y MODIS en México.

En el siguiente trabajo, se desarrolló un algoritmo para agregar los puntos de calor VIIRS y MODIS empleando la técnica Alpha shape para mapear el área quemada a partir de los puntos de calor VIIRS y MODIS en México en un periodo de tres años, esta herramienta brindará apoyo para el monitoreo y la planificación estratégica del manejo de incendios de México.

2. OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.1. Objetivos

2.1.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema para la delimitación automatizada y priorización de conglomerados de puntos de calor para México.

2.1.2 Objetivos específicos

- Desarrollar la herramienta para la delimitación automatizada de conglomerados de puntos de calor para México.
- Delimitar conglomerados de puntos de calor a lo largo de la República Mexicana.

2.2 Hipótesis

- La utilización de nuevas tecnologías geoespaciales, así como los algoritmos, permite evaluar y automatizar el avance del comportamiento de los incendios forestales.

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

3.1. Herramientas para el mapeado de área quemada y puntos de calor.

Los productos de datos térmicos derivados de datos obtenidos por teledetección desempeñan funciones importantes como parámetros clave para los fenómenos biofísicos (Cho *et al.,* 2018). La Suite de Radiómetro de Imagen de Infrarrojo Visible (VIIRS) a bordo del Suomi NPP proporciona ubicaciones de fuego, superando en detección de incendios a su predecesora (MODIS) debido a su resolución espacial mejorada de 375m (Schroeder *et al.,* 2014).

El espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, detecta incendios que se están activos al momento del paso del satélite utilizando umbrales en los canales medio e infrarrojo térmico (Giglio *et al.,* 2003). Adicionalmente cada mes se realiza el mapeo de área quemada global de 500 m MODIS C6 (MCD64A1) validadas por áreas quemadas de alta resolución derivados de imágenes Landsat (Giglio *et al.,* 2018).

3.2. Desarrollo de herramientas para la delimitación automatizada de conglomerados de puntos de calor.

Varios trabajos (Loboda y Csiszar 2007; Henderson *et al.,* 2010; Thorsteinsson *et al.* 2011; Kasischke and Hoy, 2011; Veraverbeke *et al.* 2014) han demostrado la utilidad de los interpolados automatizados de conglomerados de puntos de calor para visualizar el avance aproximado del perímetro de grandes incendios e incluso para calibrar modelos de propagación de incendios (Anderson *et al.,* 2007, 2009; Coen y Schroeder 2013; Sá *et al.,* 2017; Benali *et al.* 2017; Duff *et al.,* 2018), siendo de gran utilidad en el monitoreo y seguimiento de su avance y en la planeación del combate.

Por ejemplo, el Sistema Norteamericano Wildland Fire Assessment System, cuenta con una interfaz que automáticamente identifica los conglomerados en

base a su proximidad geográfica y en el tiempo, y los muestra en tiempo real en una interfaz disponible online (https://www.wfas.net/maps/).

El sistema europeo de información de incendios forestales (EEFIS), en su sección de evaluación rápida (Rapid Damage Assessment), mapea diariamente los interpolados de puntos de calor VIIRS para mostrar estimas rápidas del avance diario de incendios (http://effis.jrc.ec.europa.eu/static/effis_current_situation/public/index.html) (Figura 2).

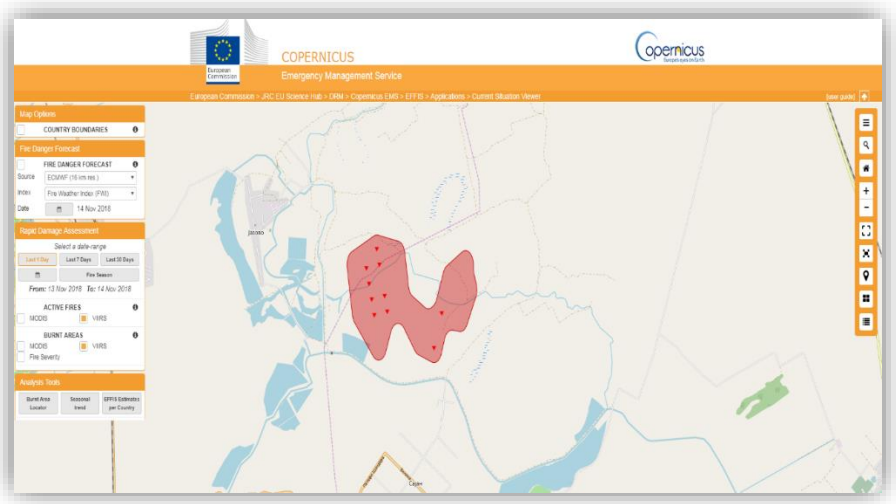


Figura 2. Ejemplo de interpolado de puntos de calor de los sensores de VIIRS y MODIS para el estimado rápido perímetros de incendios en el Sistema Europeo de Información de Incendios Forestales.

Algunos trabajos sugieren que el área inferida de los puntos de calor puede contribuir a mejorar las estimas de emisiones, particularmente en áreas donde el tamaño de los incendios están por debajo de los límites de detección de los productos de área quemada de mediana resolución (25-100ha), si bien las relaciones entre puntos de calor y estimas a gran escala de área quemada deben de ser calibradas para cada tipo de vegetación (van der Werf *et al.,* 2003, 2017; Giglio *et al.,* 2006, 2010; Randerson *et al.,* 2012; Hantson *et al.,* 2013).

Esto es particularmente prometedor para los puntos de calor de nuevos satélites como VIIRS a 375 m de resolución, que han mostrado mayor acuerdo con perímetros de incendios que otros sensores previos de mediana resolución (Oliva and Schroeder, 2015), lo que mejoraría la precisión de las estimas de perímetros en incendios de mediano y gran tamaño.

Los algoritmos de interpolado de perímetro de incendios utilizados en el sistema europeo (Chiaraviglio *et al.,* 2016, Artés *et al.,* 2017) o en otros estudios (Loboda y Csiszar 2007; Veraverbeke *et al.,* 2014), podrían ser calibrados para los tipos de vegetación mexicana en base a los históricos de puntos de calor y áreas quemadas para la delimitación de perímetros rápidos de grandes incendios en base a los puntos de calor MODIS y VIIRS en el sistema de peligro mexicano, permitiendo apoyar su monitoreo y la planeación estratégica de su combate. El estudio previo de Briones-Herrera *et al*. (2020) testó la técnica del agregado de puntos de calor mediante la herramienta *aggregate points* en ArcGIS. Existe la necesidad de evaluar algoritmos alternativos de interpolación implementables en software libre, como el alpha shape (e.g. Artés *et al*., 2017), para la delimitación de los perímetros de puntos de calor en tiempo real en México.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales.

4.1.1 Descripción del Área de Estudio

El territorio mexicano tiene una superficie de 1’964,375 km², por lo que es el decimotercer país más extenso del mundo y el tercero más grande de América Latina (INEGI, 2014). Limita al norte con los Estados Unidos de América a lo largo de una frontera de 3,155 km, mientras que al sur tiene una frontera de 958 km con Guatemala y 276 km con Belice, las costas del país limitan al oeste con el océano Pacífico y al este con el golfo de México y el mar Caribe, sumando 9,330 km, por lo que es el tercer país americano con mayor longitud en sus costas (INEGI, 2014).

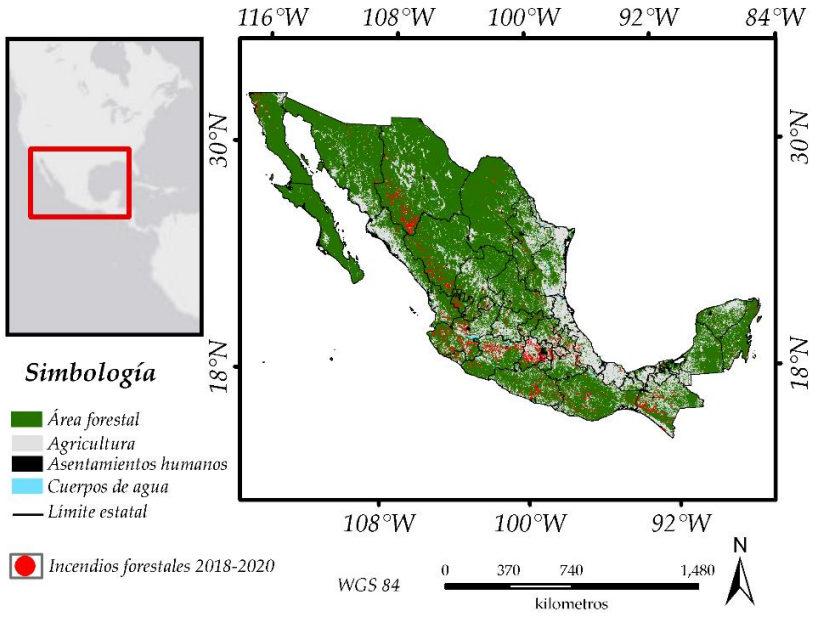


Figura 3. Mapa de localización del área forestal de México, considerando el mapa de Uso de Suelo Serie VI (2014), 1:250,000, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014). Áreas forestales y no forestales se muestran en verde y blanco, respectivamente; asentamientos humanos en negro y los cuerpos de agua en azul, respectivamente, de acuerdo con INEGI Mapa de Uso de Suelo VI (2014), (1:250,000). Detecciones de incendios forestales (2018–2020) que representan la supresión de incendios efectuada por el gobierno de México, a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) durante el periodo de estudio.

La Superficie forestal de México es de 138 millones de hectáreas (ha), equivalentes al 70% del territorio nacional. Los principales ecosistemas forestales son matorrales xerófilos (41.2%), los bosques templados (24.2%), las selvas (22.8%) y otros tipos de asociaciones de vegetación forestal (11.8%) (INEGI, 2014).

4.2. Métodos

4.2.1 Puntos de calor VIIRS y MODIS y área quemada MODIS C6 (MCD64A1).

Los datos de los Satélites de MODIS y VIIRS se descargaron del servidor de Información sobre Incendios para el Sistema de Gestión de Recursos (por sus siglas en inglés, FIRMS,

(https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/create.php). Los perímetros mensuales del área quemada del período de estudio se descargaron del servidor FTP de la Universidad de Maryland (http://modisfire.umd.edu/files/MODIS_C6_BA_User_Guide_1.2.pdf). Los perímetros del área quemada correspondieron al área quemada de la colección C6 (MCD64A1) a una resolución espacial de 500 m (Giglio *et al*., 2018).

4.2.2. Predicción de área quemada a partir de conglomerados Alpha shape de puntos de calor VIIRS y MODIS.

La predicción de los perímetros de conglomerados de puntos de calor se realizó a través de la agregación del conjunto de puntos de calor VIIRS y MODIS. Esta técnica se llevó mediante el algoritmo Alpha Shape. El concepto de Alpha Shape es un enfoque para formalizar la noción intuitiva del polígono dentro de los conjuntos de puntos espaciales. La Alpha Shape es un concepto geométrico concreto matemáticamente bien definido en donde la generalización del convex hull y un subgráfico de la triangulación de Delaunay. Dado que los conjuntos de puntos finitos, se puede derivar una familia de formas a partir de la triangulación de Delaunay del conjunto de puntos (Figura 4).

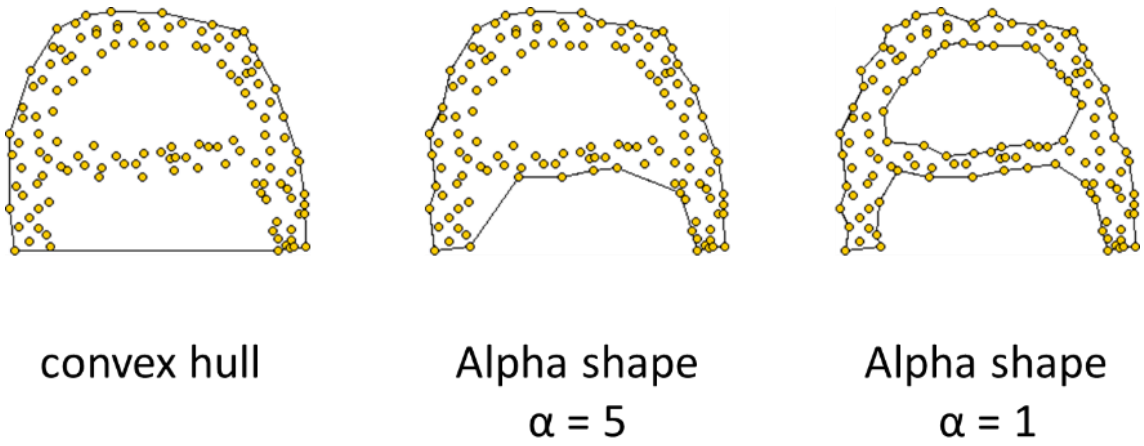


Figura 4. Ejemplo del funcionamiento de la técnica de agregación Alpha Shape.

Se analizaron los valores de alpha 0.0008, 0.001 y 0.002 para delimitar los perímetros, donde los valores más altos corresponden con perímetros más convexos, y valores más bajos con perímetros más cóncavos.

El desarrollo de conglomerados de puntos de calor a partir del sensor de MODIS, así como los fuegos activos detectados a través del sensor de VIIRS en México sobre todo en las áreas forestales, durante el periodo 2018 al 2020, se llevó a cabo mediante los softwares PyCharm 2019.3.1 (JetBrains, 2017) y Qgis 3.16.

4.2.3. Predicción del área quemada área quemada MODIS C6 a partir de los perímetros de los conglomerados de puntos de calor VIIRS y MODIS.

Se analizaron los siguientes modelos para predecir el área quemada mensual MODIS C6 (MCD64A1) a partir del perímetro agregado de los puntos de calor para los valores de alpha analizados usando la siguiente Ecuación (1):

$$BA = a \cdot x$$

donde: BA: representa el área quemada (ha) MODIS C6 MCD64A1; a: el parámetro del modelo; x: perímetro agregado de puntos de calor (ha), respectivamente.

Los modelos se analizaron a dos niveles: (1) área quemada del perímetro del incendio individual; (2) suma mensual total del área quemada. Los modelos para predecir el área quemada (Ecuación 1)) se ajustaron con regresiones lineales (LM) empleando el paquete “lm” del software R (R Core Team, 2017 Vienna, Austria). Los modelos se evaluaron utilizando el coeficiente de determinación de regresión no lineal (R^2) como criterio estadístico, junto con el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo del modelo (Bias). El R^2 se definió como el coeficiente de correlación cuadrado entre los valores medidos y estimados y el error cuadrático medio (RMSE) (Ryan, 1997).

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Resultados

Se muestran los coeficientes y bondad de ajuste de los modelos por año a nivel individual, así como a nivel suma mensual total, en la tabla 1. Los valores más altos de R^2 se obtuvieron para alpha 0.001 y 0.008, generalmente con valores de aproximadamente 0.7, para los 3 años analizados. El valor más bajo de error cuadrático medio se obtuvo para el alpha de 0.008 en los tres años analizados. Para este valor de alpha se obtuvo el coeficiente más cercano a 1 (aproximadamente de 0.9 a 0.7, según el año) para los 3 años analizados, por tanto, mostrando predicciones más cercanas a los perímetros observados de MODIS C6.

Tabla 1. Coeficientes y estadísticos de ajuste para predecir el área quemada por Alpha Shape obtenida desde el año 2018 hasta el 2020. Donde: Alpha corresponde a la distancia Alpha; coeficientes y estadísticos de ajuste para nivel individual de incendio y suma mensual total.

	Coeficiente	**Estadísticos de ajuste**		
Alpha	**a**	**R^2**	**RMSE (ha)**	**Bias (ha)**
NIVEL INDIVIDUAL DE INCENDIO				
2018				
0.002	0.196691 ±0.007846	0.31	5328	275
0.001	0.8405 ±0.0135	0.70	1126	-7
0.0008	0.92015 ±0.01443	0.71	1060	37
2019				
0.002	0.147529 ±0.003105	0.55	12427	296
0.001	0.652524 ±0.007295	0.76	1257	37
0.0008	0.8135 ±0.0103	0.71	1086	35
2020				
0.002	0.131641 ±0.003131	0.58	22906	169
0.001	0.515369 ±0.008379	0.67	1806	44
0.0008	0.6939 ±0.0115	0.64	1197	55
SUMA MENSUAL TOTAL (2018-2020)				
0.002	0.180433±0.008242	0.94	54430	19458
0.001	0.58415±0.01863	0.97	38440	12881
0.0008	0.77995±0.02104	0.98	33990	10458

*

A nivel de suma mensual total, el mejor ajuste se obtuvo para el alpha de 0.008, con un R^2 de 0.98 y el valor más reducido de error cuadrático medio y sesgo (tabla 1). La evolución temporal del área total quemada mensual C6 observada y pronosticada durante los años 2018, 2019 y 2020 para alpha 0.008, se muestra en la Figura 6. Se observa un buen acuerdo para predecir el área total mensual.

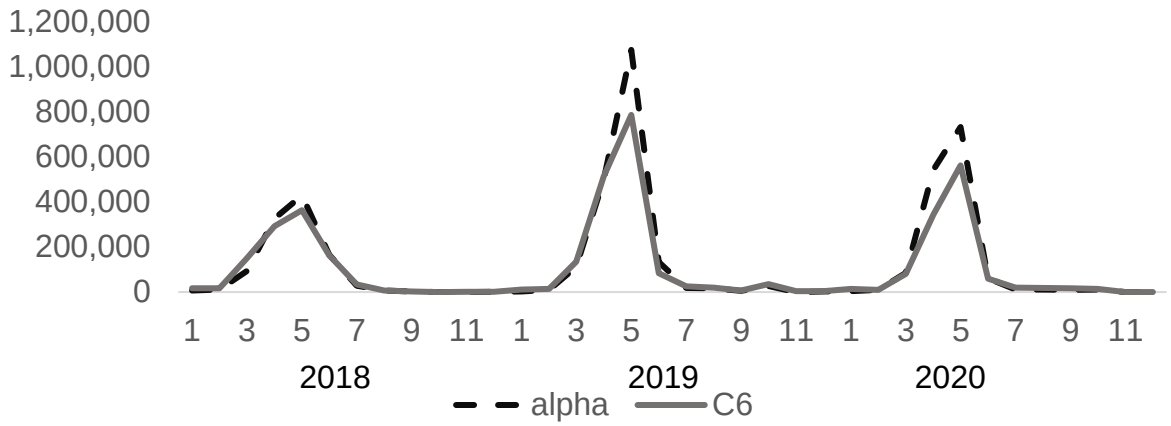


Figura 5. Evolución mensual de 2018 a 2020 del área total quemada MODIS C6 MCD64A1 (C6) área de la agregación de puntos de calor VIIRS y MODIS Alpha 0.008 (alpha). Los datos se muestran en hectáreas. La línea negra punteada representa el área Alpha 0.008 y la línea continua gris el área MODIS C6 MCD64A1.

Los valores predichos frente a observados de los modelos para predecir el área quemada MODIS C6 MCD64A1 a nivel individual desde la agregación de puntos de calor VIIRS y MODIS anuales se muestran en la figura 5.

.

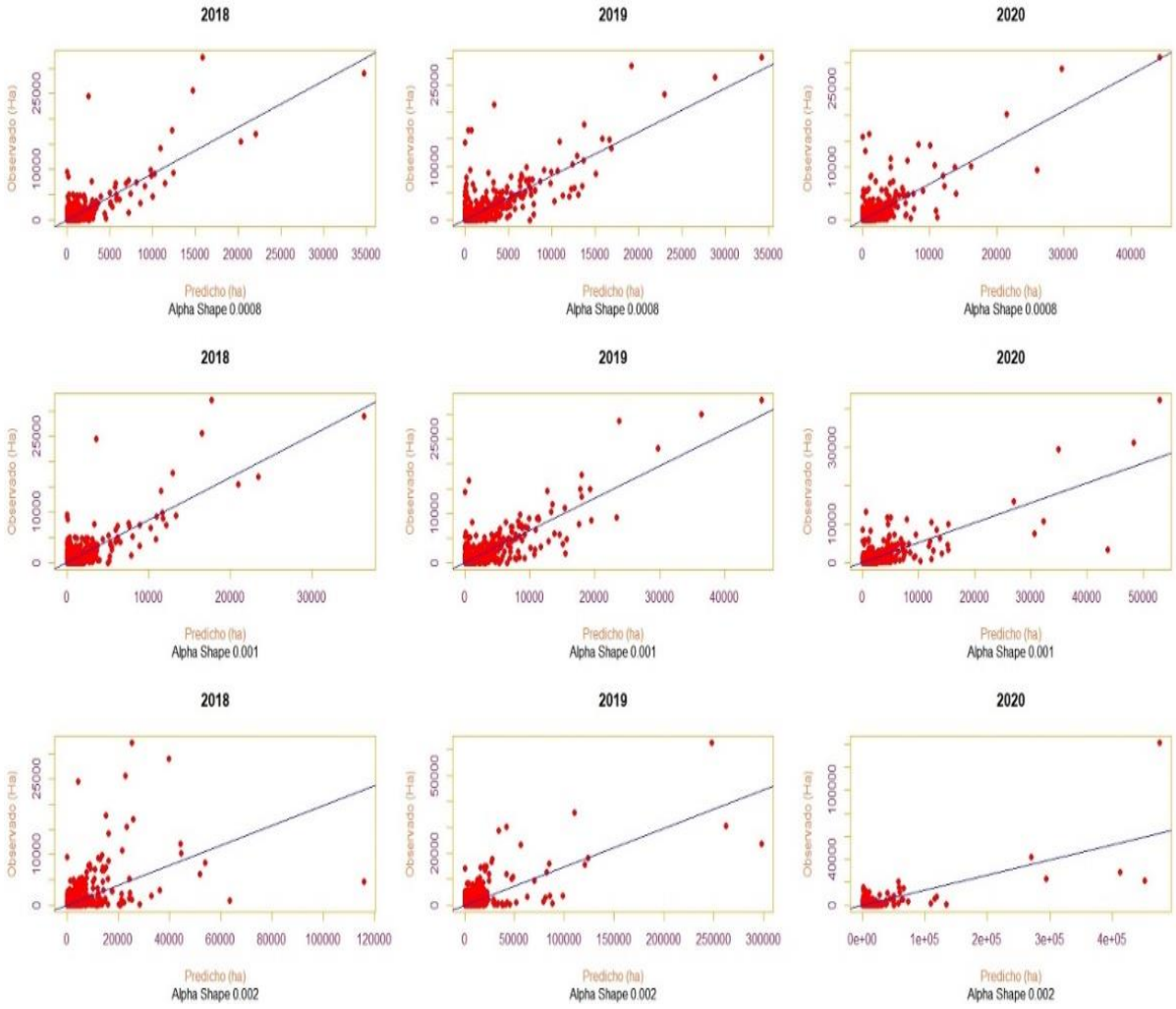


Figura 6. Valores predichos (eje x) frente a observados (aje y) del área quemada MCD64A1 prevista, utilizando la Ecuación (1), a partir de la agregación de puntos de calor a 0.008, 0.002 y 0.001 para nivel individual. La línea negra representa la línea del modelo de la correlación observada y predicha.

Se muestran ejemplos de perímetros predichos con los 3 valores de alpha analizados para dos incendios ocurridos en mayo del 2018 y 2019 en la figura 7.

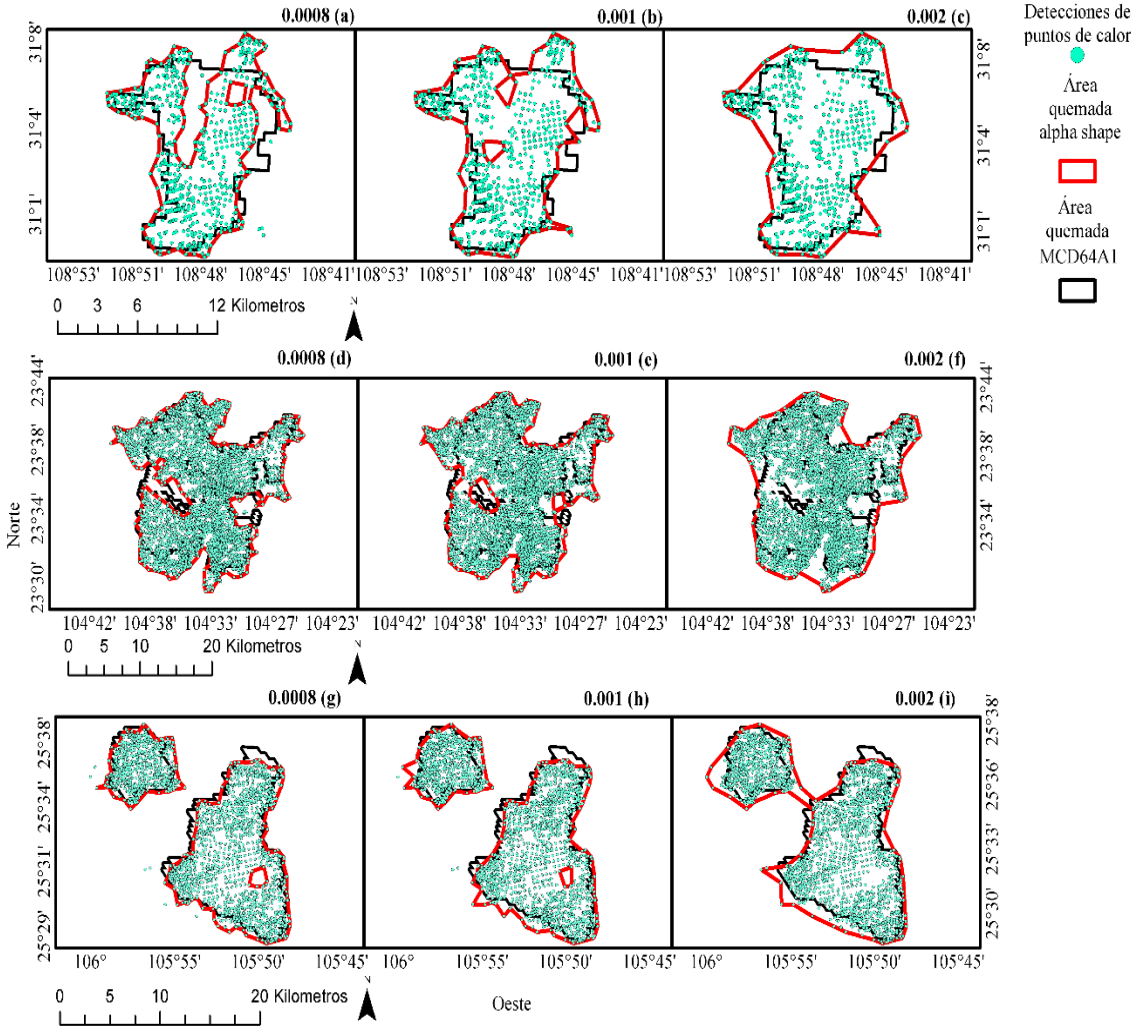


Figura 7. Ejemplos de incendios seleccionados de mayo de 2018 (a,b,c), 2019 (d,e,f) y abril de 2019 (g,h,i). La línea negra representa el área total quemada MODIS C6 MCD64A1 C6. En color rojo se muestran los perímetros interpolados con valores de alpha 0.0008 (a,d,g), 0.002 (b,c,h) y 0.001 (c,f,i). En color azul se muestran las detecciones de puntos de calor VIIRS y MODIS de mayo de 2018 y abril y mayo de 2019, respectivamente.

5.2. Discusión

El estudio actual demuestra el potencial de la agregación Alpha con puntos de calor de MODIS y VIIRS para la evaluación del perímetro de grandes incendios, tanto para incendios individuales como para la estimación del área total quemada. A diferencia de estudios anteriores que se han centrado principalmente en los perímetros de incendios individuales, principalmente a escalas locales (Li *et al*., 2000; Oliva and Schroeder, 2015) o el área total quemada a escalas

globales (Giglio *et al*., 2006 y 2010; van der Werf *et al*., 2017), el estudio evaluó el rendimiento de la agregación puntos de calor para ambos niveles de análisis, en una amplia área de estudio y período de estudio.

A nivel individual, los perímetros individuales se predijeron con un R^2 de aproximadamente 0.7. El área quemada mensual total se predijo con un R^2 de 0.98. Los valores más altos de área quemada fueron en los meses de abril y mayo (Figura 6), particularmente en el año de 2019, año acompañado de sequía que ha sido documentado junto con otros años secos en México, además del patrón de ignición humana factores que afectan la ocurrencia de incendios como ya se ha venido reportando en trabajos anteriores como Vega-Nieva *et al*., 2018 y 2019.

Los resultados sugieren potencial de la técnica de interpolado alpha para ser empleada operacionalmente mediante herramientas de SIG libre para mapear los perímetros de área quemada en México. Estudios futuros se podrían centrar en ampliar el periodo de estudio, así como analizar las variaciones de los parámetros de interpolación entre tipos de combustibles en el país.

6. CONCLUSION Y RECOMENDACIONES

Los perímetros Alpha shape fueron obtenidos con la finalidad de predecir las áreas quemadas a partir de los puntos de calor de VIIRS y MODIS a través de los geoprocesos que ya están implementados en software libre, a pesar de las limitaciones inherentes a sus resoluciones temporales y espaciales actuales, los perímetros de incendios a partir de la agregación de puntos de calor pueden servir como una estimación temprana casi en tiempo real de la gran extensión aproximada del incendio que puede refinarse una vez que estén disponibles productos más detallados (Giglio *et al*., 2006; Oliva and Schroeder, 2015;Briones-Herrera *et al*., 2020)

La agregación de incendios activos de VIIRS y MODIS para la generación de perímetros de incendios demostró un potencial para predecir estimaciones tempranas aproximadas de la magnitud del tamaño de los incendios individuales, particularmente para incendios grandes, por ejemplo, como se realizó en Briones-Herrera *et al*., 2020, en el cual se empleó la técnica aggregate points técnica convex hull para obtener perímetros de grandes y pequeños incendios, similar a lo realizado en este estudio. No obstante, la técnica usada en el presente estudio puede ser empleada mediante el uso de software libre.

Los perímetros delimitados por puntos de calor pueden servir como una primera estimación disponible de la progresión de los incendios grandes para respaldar el control y la gestión operativos de incendios casi en tiempo real. Además, pueden proporcionar una estimación útil de ubicaciones aproximadas donde se pueden descargar imágenes de alta resolución para monitorear el tamaño y la severidad del incendio (Eidenshink *et al*., 2007; Parks *et al*., 2018), esta última apoyando la toma de decisiones tanto para la planificación de la restauración del ecosistema a largo plazo.

7. LITERATURA CITADA

Anderson, K.; Englefield, P.; Little, J.; Reuter, G. 2009. An approach to operational forest fire growth predictions for Canada. Int J Wildland Fire, 18:893–905.

Anderson, K.; Reuter, G.; Flannigan, M. 2007. Firegrowth modeling using meteorological data with random and systematic perturbations. Int J Wildland Fire, 16:174–182.

Artés, T.; Boca, R.; Liberta, G.; San-Miguel, J. 2017. Non-supervised method for early forest fire detection and rapid mapping. Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment Paphos, Cyprus. Proceedings Volume 10444.

Benali, A.; Sa, A.; Ervilha, A.; Trigo, R.; Fernandes, P.; Pereira, J. 2017. Fire spread predictions: sweeping uncertainty under the rug. Science of The Total Environment, 187-196.

Breiman, L.; Friedman, J.; Olshen, R.; Stone, C. 1984. Classification and regression trees. Chapman and Hall, New York, USA, 368.

Briones-Herrera, C.I., Vega-Nieva, D.J., Monjarás-Vega, N.A., Briseño-Reyes, J., López-Serrano, P.M., Corral-Rivas, J.J., Alvarado-Celestino, E., Arellano-Pérez, S., Álvarez-González, J.G., Ruiz-González, A.D., Jolly, W.M., Parks, S.A. 2020. Near Real-Time Automated Early Mapping of the Perimeter of Large Forest Fires from the Aggregation of VIIRS and MODIS Active Fires in Mexico. Remote Sens. 12, 2061.

Chiaraviglio, N.; Artés, T.; Bocca, R.; Lopez-Pérez, J.; Gentile, A.; San-Miguel-Ayanz, J.; Cortés, A.; Margalef, T. Automatic fire perimeter determination using MODIS hotspots information. IEEE 12th Int. Conf. e-Sci. (e-Science) 2016, 2016, 414-423.

Cho, K.; Kim, Y.; Kim, Y. 2018. Disaggregation of Landsat-8 thermal data using guided SWIR imagery on the scene of a wildfire. Remote Sens.; 10 1, 105.

Coen, J.; Schroeder, W. 2013. Use of spatially refined satellite remote sensing fire detection data to initialize and evaluate coupled weather-wildfire growth model simulations. Geophys Res Lett, 5536-5541.

Comisión Nacional Forestal. CONAFOR 2020. Obtenido de https://www.gob.mx/conafor

Duff, T.; Cawson, J.; Cirulis, B.; Nyman, P.; Sheridan, G.; Tolhurst, K. 2018. Conditional Performance Evaluation: Using Wildfire Observations for Systematic Fire Simulator Development. Forests 2018, 9-189.

Eidenshink, J.; Schwind, B.; Brewer, K.; Zhu, Z.L.; Quayle, B.; Howard, S. A project for monitoring trends in burn severity. Fire Ecol. 2007, 3, 3-21.

Giglio, L.; Boschetti, L.; Roy, D.; Humber, M.; Justice, C. 2018. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product, Volume 217. Remote Sensing of Environment, 72-85.

Giglio, L.; Descloitres, J.; Justice, C.; Kaufman, Y. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. Remote Sensing of Environment, 273-282.

Giglio, L.; Randerson, J.; Van DerWerf, G.; Kasibhatla, P.; Collatz, G.; Morton, D. 2010. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. Biogeosciences, 7, 1171–1186.

Giglio, L.; Randerson, J.T.; van der Werf, G.R., Kasibhatla, P.S., Collatz, G.J., Morton, D.C., DeFries, R.S. Assessing variability and long-term trends in

burned area by merging multiple satellite fire products. Biogeosciences 2010, 7, 1171-1186.

Giglio, L.; Van DderWerf, G.; Randerson, J.; Collatz, G.; Kasibhatla, P. 2006. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 957-974.

Hantson, S.; Padilla, M.; Corti, D.; Chuvieco, E. 2013. Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence. Remote Sensing of Environment, 131, 152-159.

Henderson, B.; Ichoku, C.; Burkholder, B.; Brauer, M. 2010. Jackson The validity and utility of MODIS data for simple estimation of area burned and aerosols emitted by wildfire events. International Journal of Wildland Fire, 844-852.

Hessl, A.; Miller, J.; Kernan, J.; Keenum, D.; McKenzie, D. 2007. Mapping paleo-fire boundaries from binary point data: comparing interpolation methods. Professional Geographer, 591:87-104.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía-México). Guía Para la Interpretación de Cartografía: Uso del suelo y Vegetación. Escala 1, 250, 000: Serie VI]; 2014, Ed. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Mexico City, Mexico. Available online: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/pro ductos/nueva_estruc/702825092030.pdf (accessed on 24 June 2020).

JetBrains. Pycharm. 2017, [online] JetBrains. Available online: https://www.jetbrains.com/pycharm/ (accessed on 11 April 2019).

Jolly, W.; Vega, D. 31 de Julio de 2018. Future work for the Mexican Fire Danger System. Presentación oral en el Primer taller de capacitación y entrenamiento del Sistema de Predicción de Peligro de incendios forestales para México. Obtenido de http://forestales.ujed.mx/incendios/incendios/pdf/MattJolly18_FutureWork.pdf

Kasischke, E.; Hoy, E. 2012. Controls on carbon consumption during Alaskan wildland fires. Global Change Biology 18, 685-699.

Koutsias, N.; Kalabokidis, K.; Allgower, B. 2004. Fire occurrence ¨ patterns at landscape level: beyond positional accuracy of ignition points with kernel density estimation methods. Nat. Resour. Modell.; 17 4, 359-376.

Li, Z.; Nadon, S.; Cihlar, J. Satellite-based detection of Canadian boreal forest fires: Development and application of the algorithm. Int. J. Remote Sens. 2000, 21, 3057-3069.

Loboda, T.; Csiszar, I. 2007. Reconstruction of fire spread within wildland fire events in Northern Eurasia from the MODIS active fire product. Global and Planetary Change 56, 258-273.

Oliva, P. and Schroeder, W. Assessment of VIIRS 375m active fire detection product for direct burned área mapping. Rem. Sens. Environm. 2015, 160, 144–155, ISSN 0034-4257.

Parks, S.A.; Holsinger, L.M.; Voss, M.A.; Loehman, R.A.; Robinson, N.P. Mean Composite Fire Severity Metrics Computed with Google Earth Engine Offer Improved Accuracy and Expanded Mapping Potential. Remote Sens. 2018, 10, 879. 60.

Q-Gis, QGIS.org, 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. http://www.qgis.org

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria. Available online: https://www.R-project.org/ (accesado el 21 de marzo del 2021).

Randerson, J.; Chen, Y.; Van DerWerf, G.; Rogers, B.; Morton, D. 2012. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. Obtenido de https://doi.org/10.1029/2012JG002128

Sá, A.; Benali, A.; Fernandes, P.; Pinto, R.; Trigo, R.; Salis, M.; Pereira, J. 2017. Evaluating fire growth simulations using satellite active fire data. Remote Sens. Environ.; 190, 302-317.

Salmon, J.M.; Hao, W.M.; Miller, M.E.; Nordgren, B.; Kaufman, Y.; Li. R. Validation of two MODIS singlescene fire products for mapping burned area: Hot spots and NIR spectral test burn scars. In Proceedings of the 4th International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Innovative Concepts and Methods in Fire Danger Estimation. Emilio Chuvieco, Pilar Martín and Chris Justice (Editors). Ghent, Belgium, 5-7 Junio 2003.

Schroeder, W.; Oliva, P.; Giglio, L.; Csiszar, I. 2014. The new VIIRS 375 m active fire detection data product: algorithm description and initial assessment. Remote Sens. Environ.; 143, 85-96.

Scott, A. 2009. Forest fire in the fossil record, en Fire effects on soils and restoration strategies. Science Publishers, 1-37.

Sistema Europeo de Informacion de Incendios Forestales EEFIS. 2018. Obtenido de http://effis.jrc.ec.europa.eu/static/effis_current_situation/public/index.html

Sistema Norteamericano Wildland Fire Assessment System. 2018. Obtenido de https://www.wfas.net/maps/

Thorsteinsson, T.; Magnusson, B.; Gudjonsson, G. 2011. Large wildfire in Iceland in 2006: size and intensity estimates from satellite data. International Journal of Remote Sensing 32, 17-29.

van der Werf, G.; Randerson, J.; Collatz, G.; Giglio, L. 2003. Carbon emissions from fires in tropical and subtropical ecosystems. Global Change Biology, 547–562.

van der Werf, G.R.; Randerson, J.T.; Giglio, L.; van Leeuwen, T.T.; Chen, Y.; Rogers, B.M.; Mu, M.; van Marle, M.J.E.; Morton, D.C.; Collatz, G.J.; e al. Global fire emissions estimates during 1997–2016. Earth Syst.Sci. Data. 2017, 9, 697–720, doi:10.5194/essd-9-697-2017.

Vega-Nieva, D.J.; Nava-Miranda, M.G.; Calleros-Flores, E.; López Serrano, P.M.; Briseño-Reyes, J.; López- Sánchez, C.; Corral-Rivas, J.J.; Montiel-Antuna, E.; Cruz-Lopez, M.; Ressl, R.; *et al*. Temporal patterns of active fire density and its relationship with a satellite fuel greenness index by vegetation type and región in Mexico during 2003-2014. Fire Ecology 2019a, 15, 1-19, doi:10.1186/s42408-019-0042-z.

Vega-Nieva, D.J.; Nava-Miranda, M.G.; López Serrano, P.M.; Briseño-Reyes, J.; López-Sánchez, C.; Corral-Rivas, J.J.; Cruz-Lopez, M.; Ressl, R.; Cuahtle, M.; Alvarado, E.; *et al*. Developing Models to Predict the Number of Fire Hotspots from an Accumulated Fuel Dryness Index by Vegetation Type and Region in Mexico. Forests, 2018, 9, 190.

Veraverbeke, S.; Sedano, F.; Hook, S.; Randerson, J.; Jin, Y.; Rogers, B. 2014. Mapping the daily progression of large wildland fires using MODIS active fire data. Obtenido de https://doi.org/10.1071/WF13015