

## Monitoreo de incendios forestales a escala local: estudio de caso del ejido Mecayapan, México

Monitoring of forest fires at the local scale:  
Case study of the Mecayapan ejido, Mexico

Christoph Neger \*\*, Paula García-López <sup>b</sup>,  
Lilia Lourdes Manzo-Delgado <sup>c</sup>, José Manuel Espinoza-Rodríguez <sup>b</sup>

\*Autor de correspondencia: <sup>a</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Departamento de Geografía Social, Ciudad de México, México, tel.: +52 56230222 ext. 44819, neger@geografia.unam.mx

<sup>b</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, Ciudad de México, México.

<sup>c</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Laboratorio de Análisis Geoespacial, Ciudad de México, México.

### SUMMARY

Studies regarding the monitoring of forest fires generally have been based on either field records or data from satellite analysis. However, both have had limitations, such as the inaccuracy of field data and clouds, that hamper remote sensing. The objective of the present paper was to identify burnt areas of tropical rainforest, pine, and oak forest in the Mecayapan ejido, Mexico, in the years 2016 to 2020, utilizing and combining all available sources of information. This included, interviews with the actors involved in fire management and requesting the data they collect in the field. Later, thermal hotspots were consulted, and an index (Burnt Area Index for MODIS) was applied to detect burnt areas in satellite images. Then, the data of the different sources were integrated into a geographic information system, visualized in maps, and organized in tables, to permit their comparison and integration. The study shows that the combination of diverse sources is of great utility, as they allow for a more complete vision of the total burnt surface and the ecosystems affected by wildfires. Based on this result, it was recommended to establish collaboration networks for fire monitoring, which include governmental and community-based actors involved in integrated fire management, along with the entities specialized in satellite analysis.

*Keywords:* integrated fire management, burnt areas, thermal hotspots, vegetation fires, Los Tuxtlas.

### RESUMEN

Los estudios sobre el monitoreo de incendios forestales generalmente se han basado o en los registros de campo o en los datos provenientes del análisis satelital. No obstante, ambos han mostrado limitaciones, como las inexactitudes de los datos de campo o la nubosidad que dificulta la detección remota. Este trabajo tuvo como objetivo identificar las superficies afectadas por incendios de selva alta perennifolia, bosque de pino y encino en el ejido Mecayapan, México, en los años 2016 a 2020, utilizando y combinando todas las fuentes de información disponibles. Esto implicó, primero, entrevistar a los actores involucrados en el manejo del fuego y solicitar los datos que ellos recopilan en campo. Segundo, se consultaron los puntos de calor y se aplicó un índice de detección de áreas quemadas mediante imágenes satelitales (Burnt Area Index for MODIS). Tercero, los datos de las diferentes fuentes se integraron en un sistema de información geográfica, se visualizaron en mapas y se organizaron en tablas, para permitir su comparación e integración. Se demostró que la combinación de las diversas fuentes resulta de gran utilidad, permitiendo obtener una visión más completa de la superficie y los ecosistemas afectados por los incendios. A partir de este resultado, se recomendó el establecimiento de redes de colaboración para el monitoreo de los incendios forestales, que incluya a los actores gubernamentales y comunitarios involucrados en el manejo integral del fuego, sumado a las entidades especializadas en el análisis satelital.

*Palabras clave:* manejo integral del fuego, áreas quemadas, puntos de calor, incendios de vegetación, Los Tuxtlas.

### INTRODUCCIÓN

El fuego juega un papel esencial en los ecosistemas. Forma parte de la dinámica natural de muchos tipos de bosques, pero a la vez representa una amenaza en vegetación

no adaptada al fuego o cuando se alteran los regímenes naturales, a causa de la acción del ser humano (Rodríguez 2014, Kelly *et al.* 2020). Por lo tanto, para salvaguardar una conservación óptima de las áreas forestales, procesos ecológicos y además, modos de vida es de suma importan-

cia realizar actividades encaminadas al manejo integral del fuego (Castro *et al.* 2021). Esto debe estar sustentado en un análisis que incluya información disponible acerca de la incidencia de los incendios forestales. La primera fuente en este contexto son los datos de campo que provienen de los actores encargados de la supresión de los incendios y que se utilizan en distintos estudios en México, sobre todos los datos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (Pérez-Verdín *et al.* 2013, Pompa-García *et al.* 2018, Corona-Núñez *et al.* 2020). No obstante, debido a las dificultades inherentes en el levantamiento de datos en campo, estos suelen presentar faltas de precisión en cuanto a la ubicación y extensión exacta de las áreas afectadas (Zúñiga-Vásquez *et al.* 2017, González-Gutiérrez *et al.* 2020).

Por lo tanto, con la finalidad de mejorar el monitoreo de los incendios forestales, en las últimas décadas se ha introducido el estudio del impacto de este fenómeno basado en imágenes satelitales. Los primeros trabajos se realizan al inicio de los años 80 (el primero que se pudo identificar fue el estudio de Hall *et al.* (1980) en Alaska). Desde entonces, los estudios de percepción remota (información obtenida a distancia a través de un sensor remoto, como imágenes satelitales y fotografías aéreas) enfocados en incendios forestales han experimentado un auge considerable y las técnicas aplicadas se han ido mejorando continuamente. Varias investigaciones en México se basan en esta fuente para determinar la incidencia de incendios forestales en distintas áreas de estudio (Galicía *et al.* 2014, Manzo-Delgado 2016, Barrios y Escobar 2020, Manzo-Delgado y López-García 2020).

No obstante, también el análisis satelital presenta limitaciones, sobre todo debido a la resolución espacial y la frecuencia de captura de las imágenes, la presencia de nubosidad, el humo generado por los incendios (Manzo-Delgado 2016, González-Gutiérrez *et al.* 2020, Gale *et al.* 2021) y la dificultad de distinguir entre incendios forestales y quemadas agropecuarias (Thompson y Morrison 2020); este término, al contrario de los incendios, se refiere a la ignición planeada y controlada de campos agrícolas y pastizales.

Este estudio aporta a las investigaciones acerca del monitoreo de los incendios forestales y los tipos de vegetación afectada, con el enfoque en el ámbito local – crucial para la aplicación de las actividades de manejo del fuego – lo cual implica que se requiere la mayor precisión posible de los datos disponibles. El área de estudio de este trabajo es el ejido Mecayapan en Veracruz, México, el cual se ubica en el límite de la reserva de la biosfera Los Tuxtlas, un área con una biodiversidad sumamente alta, pero fuertemente amenazada por las actividades humanas, precisamente por la expansión de la frontera agropecuaria (Von Thaden *et al.* 2020). Una de las principales problemáticas para la conservación de la vegetación natural de esta zona son los incendios forestales, provocados de manera accidental e intencional, y propiciados por eventos climáticos extremos (Neger y Manzo-Delgado 2021). Según datos oficiales de la Comisión Nacional de Áreas

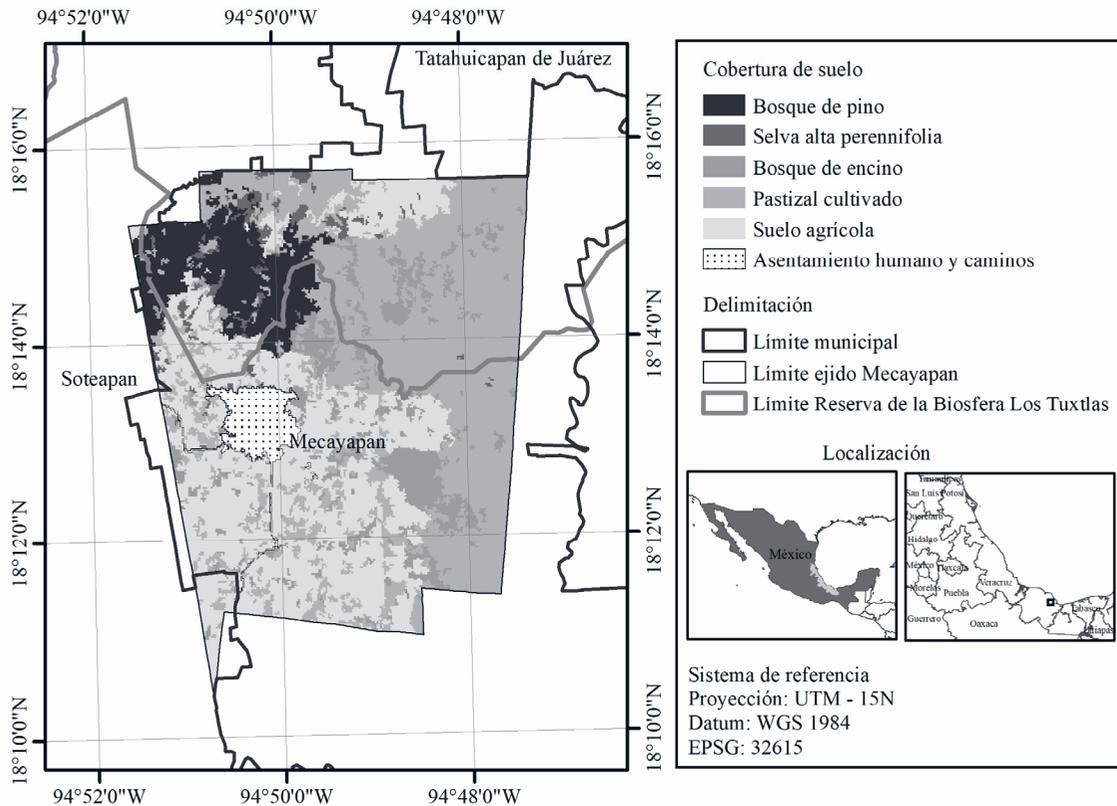
Naturales Protegidas (CONANP), el ejido Mecayapan entre 2009 y 2020, concentró el 43,1 % de las superficies quemadas de toda esta reserva, incluyendo su área de influencia. De acuerdo con la comunicación personal de administradores de la CONANP, estos datos no son totalmente exactos, sino tienden a presentar una subestimación, debido a la dificultad de delimitar los polígonos de los incendios en terrenos poco accesibles y la poca disponibilidad de recursos humanos durante la temporada alta de incendios. Adicionalmente, no incluyen los incendios forestales atendidos por otras dependencias o no atendidos por ninguna brigada.

Este trabajo parte de la hipótesis de que para un monitoreo óptimo de los incendios forestales en un espacio local se deben considerar fuentes diversas, incluyendo los registros de campo disponibles y la información proveniente del análisis satelital. El objetivo del estudio es analizar y comparar la superficie de vegetación natural afectada por incendios forestales en Mecayapan en los años 2016 a 2020, considerando e integrando las diferentes fuentes de información disponibles.

## MÉTODOS

*Área de estudio.* El ejido (modalidad de propiedad agraria en México) Mecayapan, México, tiene una extensión de 5.436,5 ha y, según el censo del 2020, tenía 5.770 habitantes. 84,6 % de la población mayor de tres años hablaba alguna lengua indígena (INEGI 2021a), principalmente el náhuatl, según las personas entrevistadas. El centro poblacional está a 350 m s.n.m. (INEGI 2021a). El ejido se encuentra en las faldas de la sierra de Santa Marta, que forma parte de la sierra volcánica de Los Tuxtlas, una de las zonas de mayor biodiversidad en México (Castillo-Campos y Laborde 2004, CONANP 2006, Villaseñor *et al.* 2018). En la segunda mitad del siglo XX, la sierra perdió más del 60 % de su cobertura forestal, debido principalmente a la expansión de la ganadería (Von Thaden *et al.* 2020). Por esta razón en 1998 se decretó la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas que abarca 155.122,5 ha (CONANP 2006), donde 2.185,5 ha están ubicadas en el norte del ejido Mecayapan (figura 1).

Si bien la mayor parte del territorio del ejido ha sido transformado, aún se encuentran remanentes importantes de vegetación natural, que reflejan la diversidad de la sierra de Los Tuxtlas: bosque de pino (541 ha), a una altitud de 400 a 600 m s.n.m. en la parte noroeste con la especie predominante *Pinus oocarpa* Shiede; bosque de encino (*Quercus* sp. L., 529 ha), distribuido por todo el ejido; y selva alta perennifolia (112 ha), en colindancia con el bosque de pino. Se trata de un ecosistema sumamente diverso y de gran importancia para la conservación de especies en peligro de extinción y endémicas de Los Tuxtlas, incluyendo especies como el mono araña *Ateles geoffroyi* Kuhl, saraguato de manto *Alouatta palliata* Gray, tamandúa mexicano *Tamandua mexicana* Saussure, hocofaisán *Crax rubra* L., paloma perdiz tuxtleña *Zentrygon carrikeri*



**Figura 1.** Cobertura de suelo y vegetación del ejido Mecayapan. Fuente: Elaboración propia con base en RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), INEGI (2021b).

Land cover and vegetation of the Mecayapan ejido. Source: Own elaboration based on RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), INEGI (2021b).

Wetmore, entre otras (Castillo-Campos y Laborde 2004, CONANP 2006, Villaseñor *et al.* 2018, cálculos de superficie con base en CONABIO 2020).

Una de las principales problemáticas de conservación en la región han sido los incendios forestales. Según Rodríguez (2014), los bosques de pino y encino en México cuentan con adaptaciones al fuego, por lo que su impacto es menos severo y puede incluso ser benéfico como parte de los procesos naturales. Por otro lado, la selva alta perennifolia es sumamente sensible al fuego y puede sufrir fuertes afectaciones, aunque algunas especies han desarrollado adaptaciones. Cuando se modifica el régimen base del fuego los efectos son adversos en el ecosistema.

*Entrevistas y recopilación de datos de campo.* El trabajo se enfocó en los años 2016 a 2020. Como fuentes se consideraron tanto datos del análisis satelital como datos de campo, lo cual se refiere a información secundaria que se solicitó a los actores involucrados en el manejo del fuego en el ejido Mecayapan, referentes a la incidencia de incendios forestales, tamaño de las áreas quemadas y tipos de vegetación afectados. Para esto se realizó una visita de campo en agosto / septiembre del 2020 para contactar y hablar de manera directa con los actores locales y de ma-

nera subsecuente entrevistas semi-estructuradas por teléfono o videollamada, con representantes de las dependencias relevantes para este estudio, cuya selección se basó en una revisión previa de información disponible en internet y de fuentes bibliográficas y en la técnica de bola de nieve. A los entrevistados se les preguntó acerca de su percepción de los incendios forestales, si llevan algún registro de estos eventos, cómo los detectan y reportan, qué actividades realizan en cuanto al manejo del fuego y si este manejo se basa en información acerca de la incidencia de los incendios forestales en la zona. Se consideraron las siguientes diez personas:

- Presidente del comisariado ejidal de Mecayapan
- Directores de protección civil del municipio Mecayapan y del municipio colindante Soteapan
- Encargado del enlace regional Coatzacoalcos de la Secretaría de Protección Civil de Veracruz
- Jefes de las brigadas comunitarias contra incendios financiadas por la CONANP, estacionadas en Soteapan y Ocotál Chico y de la brigada rural contra incendios financiada por la CONAFOR estacionada en Soteapan
- Encargado de manejo del fuego de la administración de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas (CONANP)

- Subdirector de Normatividad Forestal de la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA) de Veracruz (encargado de las brigadas contraincendios estatales, incluyendo una en Mecayapan)
- Enlace de incendios de la gerencia estatal de la CONAFOR

*Análisis de los datos de campo.* A todos los actores se les solicitaron datos de incendios forestales, no obstante, solamente la CONANP y la CONAFOR contaron con ellos, al contrario de otros actores como el ejido, por ejemplo, que no lleva un registro de estos eventos. La CONANP proporcionó las áreas quemadas en formato Shapefile, los cuales se integraron como polígonos a un sistema de información geográfica (SIG) en el programa ArcMap. Los datos de la CONAFOR fueron puestos a disposición como lista Excel con coordenadas y superficies afectadas, por lo que los datos se incluyeron en el SIG como puntos, con diferentes tamaños de acuerdo con la superficie afectada.

*Datos de percepción remota.* En el estudio se incluyeron datos del sistema de información de incendios para la gestión de recursos (FIRMS, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés), para los meses de la temporada seca cuando se presentan los incendios forestales en la zona (marzo a junio). Contiene información acerca de puntos de calor, representados como anomalías térmicas (que pueden ser incendios forestales, quemadas agropecuarias, o raras veces otras fuentes de calor, por ejemplo, de origen industrial, de acuerdo con Sofan *et al.* 2022), que se detectan mediante el sensor espectro radiométrico de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) y el sensor conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles (VIIRS, por sus siglas en inglés). Se optó por utilizar los puntos VIIRS al tener una resolución más alta (375 m) que los de MODIS (1 km). Los puntos de calor se obtuvieron de manera gratuita en formato Shapefile y fueron integrados al sistema de información geográfica (NASA 2021).

Las imágenes satelitales Landsat-8 OLI de igual manera se obtuvieron de manera gratuita, de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS 2021). Las imágenes se descargaron en formato *GeoTIFF* (*Geographic Tagged Image File Format*) para procesarlas en el programa ENVI (*Environment for Visualizing Images*) 5.3. Se eligieron las imágenes con menor nubosidad (< 70 %), para los meses marzo a junio que corresponden a la temporada seca en el área de estudio.

En las imágenes con nubosidad menor se aplicó una máscara de nubes para evitar errores al momento de aplicar el índice para la detección de áreas quemadas. El índice que se utilizó para detectar las áreas quemadas fue el BAIM (*Burnt Area Index for MODIS*), una adaptación del BAI (*Burnt Area Index*) que ofrece valores más altos en las zonas quemadas. La principal razón para la selección

de este índice fue que únicamente necesita una imagen satelital posterior al incendio, en contraste con índices basados en técnicas multitemporales. Esto permitió realizar el análisis aun para años con pocas imágenes satelitales disponibles sin nubosidad extrema. El índice se adaptó para imágenes Landsat, utilizando las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta (Gómez y Martín 2008, Bastarrika *et al.* 2011).

Después de este paso, se revisaron visualmente las imágenes y se adaptaron los intervalos BAIM para delimitar áreas quemadas, lo cual se tuvo que revisar para cada imagen, debido a diferencias en los valores de píxeles (Manzo-Delgado y López-García 2020). Las áreas resultantes se exportaron como polígonos en formato Shapefile y fueron integradas al SIG. Como siguiente paso, mediante un análisis visual de la imagen satelital se eliminaron los polígonos que obviamente no pertenecían a áreas quemadas, como ríos y sombras de nubes que no se habían eliminado con la máscara.

*Integración de las fuentes de datos.* Considerando que todas las fuentes presentan limitaciones (en el cuadro 1 se resumen las principales), se realizó una integración de todas ellas. Con apoyo del SIG los polígonos de áreas quemadas se superpusieron con el mapa de cobertura del suelo a 30 metros de México para el año 2015 (CONABIO 2020), para calcular la superficie afectada por tipo de vegetación. Lo mismo se realizó con los polígonos de áreas quemadas de la CONANP. En el caso de los registros de la CONAFOR los tipos de vegetación afectados fueron especificados en la base de datos. Para obtener una imagen completa de la incidencia de incendios, se hizo una superposición de los polígonos de la CONANP y de los resultados del análisis de las imágenes Landsat-8 OLI, eliminando manualmente las áreas quemadas duplicadas y uniendo las áreas restantes. A esto se agregaron, también de manera manual, con base en el análisis cartográfico, las sumas de hectáreas de los incendios reportados por la CONAFOR que no se identificaron en ninguna de las dos fuentes anteriores. Además, se sumaron las diferencias en caso de que las áreas quemadas reportadas por esta instancia fueran más grandes que en las otras fuentes.

## RESULTADOS

*Análisis de las fuentes de información.* En las entrevistas realizadas se documentó que en el territorio del ejido Mecayapan coincidieron diversos actores participando en el combate de los incendios forestales: las direcciones de protección civil de dos municipios, y un total de cuatro brigadas contraincendios, financiadas por la CONANP (dos), la CONAFOR (una) y la SEDEMA (una). También los pobladores del ejido en algunas ocasiones han participado en el combate como voluntarios. Según la información proporcionada en las entrevistas, los diferentes actores, incluyendo el comisariado ejidal, se encontraron en contacto

permanente y se coordinaron en el caso de incendios que sobrepasaron la capacidad de una brigada. Primero, los incendios se atendieron por la brigada más cercana o por el personal de protección civil. Al alcanzar un mayor tamaño el incendio, se solicitó la ayuda de las otras brigadas y direcciones de protección civil, y se le invitó a la población a participar de manera voluntaria en actividades auxiliares.

Al contrario de la buena cooperación en el combate de incendios, en las entrevistas también se comentó que no hubo coordinación en cuanto al monitoreo de los incendios forestales. La mayoría de los actores mencionados no llevó un registro continuo y detallado de los incendios atendidos. Solamente la brigada de la CONAFOR reportó al enlace de incendios de esta institución en el estado de Veracruz y las brigadas de la CONANP reportaron a la dirección de la Reserva de la Biosfera. Cabe mencionar que la brigada de la CONAFOR no en todos los años estuvo activa, ya que su presencia está asociada a la disponibilidad de presupuesto, por lo tanto, los canales de comunicación entre las dependencias fueron diferentes cada año. Estos registros se basaron completamente en la revisión en campo e incluyeron información acerca de las coordenadas geográficas, la superficie afectada y tipo de ecosistema afectado que, sin embargo, de acuerdo con los mismos actores entrevistados, no siempre fueron exactos. Esto, como lo comentaron los entrevistados, se debió por un lado a dificultades de la accesibilidad del

terreno y por otro lado a la falta de recursos humanos. En tiempos con mayor incidencia de incendios de lo común, en ocasiones las brigadas solo realizaron una aproximación de superficie y tipos de vegetación afectados, para dedicar más tiempo y energías al control y combate del fuego.

*Comparación e integración de las fuentes.* Al comparar la información de las diferentes fuentes, se pudieron identificar grandes diferencias, sobre todo entre los datos obtenidos en campo y el análisis satelital (cuadro 2). A continuación, se detallan estas diferencias por año y se mapea la ubicación de los incendios.

Para el 2016 solamente fue posible utilizar una imagen satelital (23 de mayo), debido a la alta nubosidad en las demás imágenes durante la temporada seca. A pesar de esto, se detectó una cantidad considerable de áreas quemadas (328 ha) mediante el análisis satelital (figura 2). De esto, el 10,4 % correspondió a áreas forestales. También se detectaron 19 puntos de calor, los cuales no siempre coincidieron con las áreas quemadas, lo cual puede significar que no se contó con una imagen satelital apta para el análisis para esta fecha, o porque fue una fuente de calor distinta a un incendio forestal o una quema agropecuaria

La CONANP reportó diez incendios con una superficie quemada de 136,4 ha, de las cuales 76,6 ha afectaron áreas de cultivo y pastizales. La mayoría de los incendios regis-

**Cuadro 1.** Fortalezas y debilidades de las fuentes de datos.

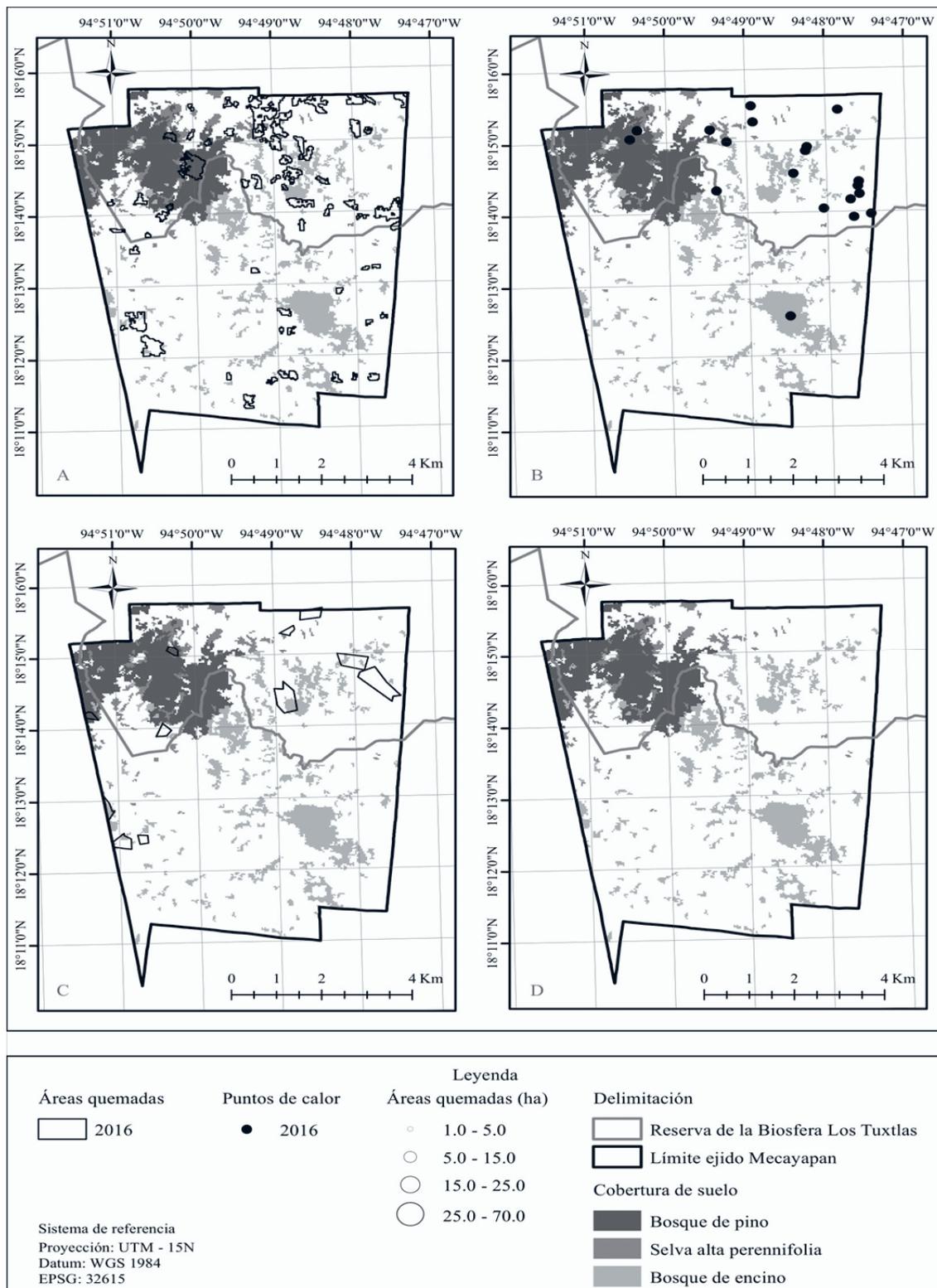
Strengths and weaknesses of the data sources.

Fuente de datos	Fortalezas	Debilidades
Datos de campo	Información detallada sobre tipo de vegetación, impacto, etc.	Registros incompletos e imprecisos, dificultades para acceder a los datos
Imágenes satelitales	Acceso gratuito, posibilidad de detección de manera posterior	Nubosidad, humo, resolución, frecuencia de imágenes baja, dificultad para distinguir quemadas e incendios
Puntos de calor	Acceso gratuito, detección posterior, facilidad de manejo de datos	Falta de exactitud en delimitación de área quemada, fuente de calor inespecífica

**Cuadro 2.** Áreas quemadas y puntos de calor en el ejido Mecayapan por año según las fuentes consultadas. Fuente: Elaboración propia con base en NASA (2021), USGS (2021) y datos solicitados a la CONANP y la CONAFOR.

Burnt areas and thermal hotspots in the Mecayapan ejido per year, according to the considered sources. Source: Own elaboration based on NASA (2021), USGS (2021), and data requested from CONANP and CONAFOR.

Año	Puntos de calor VIIRS	Imágenes Landsat-8 OLI	Registros CONANP	Registros CONAFOR	Suma de los registros y ajuste
2016	19	328,0 ha	136,4 ha	0,0 ha	435,6 ha
2017	32	122,8 ha	137,7 ha	180,8 ha	334,0 ha
2018	22	146,0 ha	2,0 ha	52,5 ha	187,4 ha
2019	69	736,0 ha	194,4 ha	167,0 ha	899,1 ha
2020	15	49,4 ha	19,0 ha	-	68,4 ha



**Figura 2.** Áreas quemadas y puntos de calor en el ejido Mecayapan (2016): imágenes Landsat-8 OLI (A), puntos de calor VIIRS (B), datos de CONANP (C) y de CONAFOR (D). Fuente: Elaboración propia con base en RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), NASA (2021), USGS (2021) y datos solicitados a CONAFOR y CONANP.

Burnt areas and thermal hotspots in the ejido Mecayapan in 2016: Landsat-8 OLI images (A), VIIRS thermal hotspots (B), data from CONANP (C), and CONAFOR (D). Source: Own elaboration based on RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), NASA (2021), USGS (2021), and data requested from CONAFOR and CONANP.

trados por la CONANP se reflejan también en las áreas quemadas detectadas mediante el análisis satelital, aunque existen diferencias en la delimitación. No hubo registros de la CONAFOR en 2016 en el ejido. Al sumar los datos del análisis satelital y de la CONANP se obtuvieron 464,4 ha, sin embargo, al eliminar las áreas duplicadas (28,8 ha), el resultado de la superficie quemada total para este año es de 435,6 ha. El 79,6 % de esta superficie fueron cultivos y pastizales (345,9 ha). En cuanto a la vegetación forestal, en el bosque de pino se afectaron 58,5 ha, en el bosque de encino 22,6 ha y en la selva alta perennifolia 8,6 ha, los cuales solo fueron reportados por la CONANP.

Para el 2017 (figura 3) se identificaron más puntos de calor (32), aunque las superficies de áreas quemadas según el análisis satelital fueron menores (122,8 ha). No obstante, en este año fue alto el porcentaje de la vegetación natural quemada, con 47,2 ha (38,4 %). Fue mayor el número de áreas quemadas registradas por CONAFOR (180,8 ha) y CONANP (137,7 ha), concentrándose principalmente en las áreas forestales, con una destacada coincidencia entre los registros de las dos dependencias.

También reportaron un gran porcentaje de vegetación natural afectado (el 74,4 % según la CONANP y el 100 % de los registros de la CONAFOR). Con respecto a las imágenes satelitales, en 2017 solamente se pudieron utilizar las de marzo y julio, por lo que no quedó reflejado parte del tiempo de mayor incidencia de incendios forestales. Aun así, también en este año se detectaron áreas quemadas no registradas en los datos oficiales. En suma, la superficie afectada en 2017 fue de 344 ha que se repartieron entre 110,8 ha cultivos y pastizales, 107,4 ha bosque de pino, 46,9 ha bosque de pino, 18,3 ha bosque de pino-encino, 19 ha bosque de encino-pino y 38,8 ha selva alta perennifolia. Llama la atención el alto porcentaje (67,8 %) que ocupó la vegetación forestal en este año, que superó a todos los demás años del lapso estudiado en este trabajo.

Para el caso del 2018 (figura 4), el análisis satelital arrojó 22 puntos de calor en el ejido y 146 ha quemadas. De estos, 30,1 ha correspondieron a vegetación natural. Solamente hubo un incendio reportado por la CONANP en este año, con una extensión de 2 ha. Este también se encuentra en los registros de la CONAFOR (aunque con una superficie de solamente 0,3 ha), pero no apareció en el análisis satelital. La CONAFOR reportó varios incendios en este año con una superficie total de 52,5 ha. Al combinar las fuentes, para el año en total se llega a una superficie quemada de 187,4 ha, con el 61,9 % (115,9 ha) en las áreas de cultivos y pastizales.

El 2019 (figura 5) fue el año con el número más alto de puntos de calor (69) y áreas quemadas (736 ha) según el análisis satelital. La superficie quemada correspondió al 13,5 % de todo el territorio del ejido. Gran parte se detectó dentro de la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera, no obstante, afectó en su mayoría pastizales y áreas de cultivo. La vegetación forestal solamente ocupó el 11 % de toda la superficie quemada y también fue el año

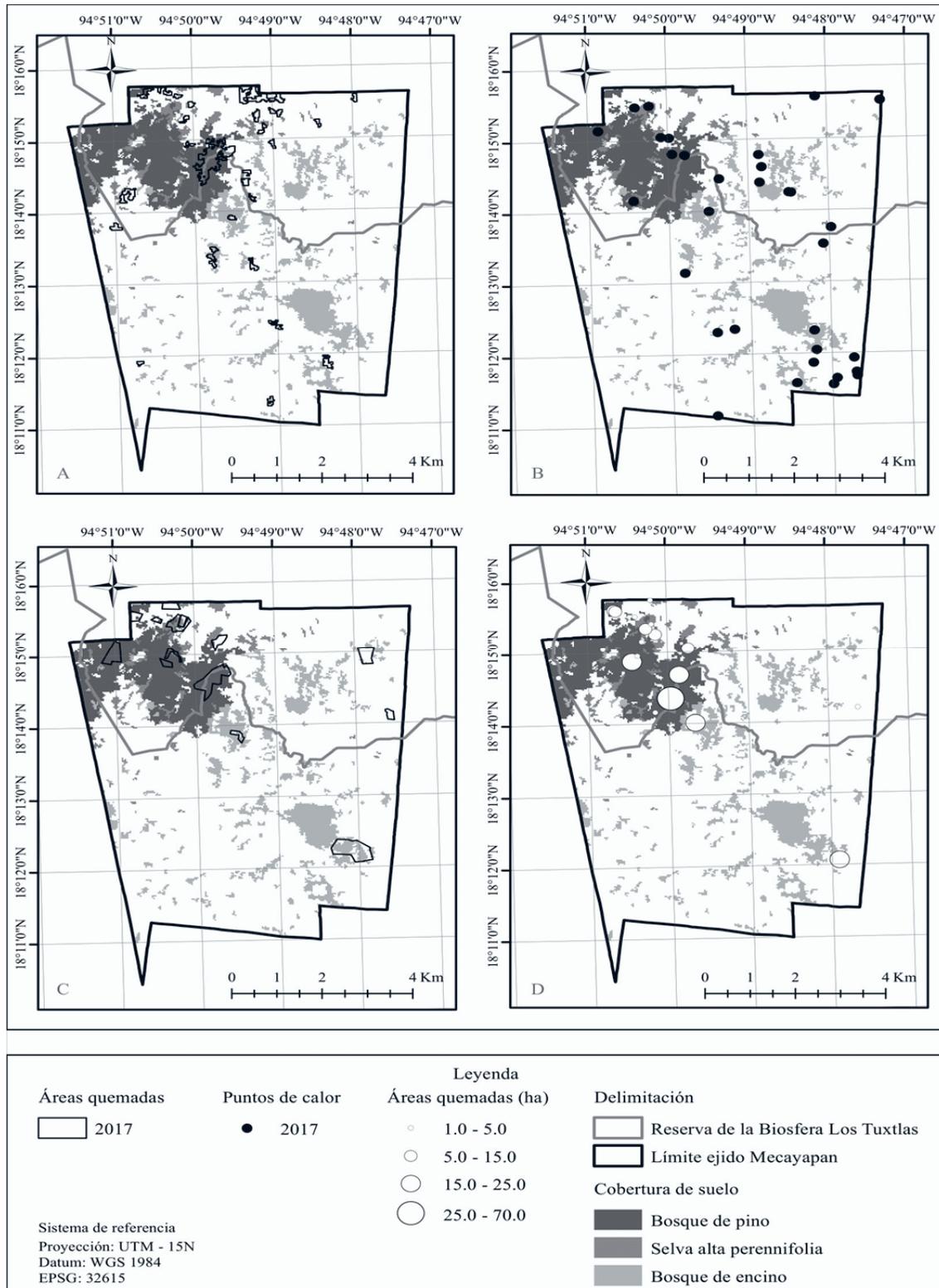
con mayor afectación en el periodo en estudio, con un total de 80,9 ha.

En este sentido, también el área quemada reportada por la CONANP (194,4 ha) y la CONAFOR (167 ha) fue alto, pero mucho menor que la delimitada en las imágenes satelitales. Mientras que el 100 % de los incendios reportados por la CONAFOR ocurrieron en zonas de vegetación natural, en los datos de la CONANP los cultivos y pastizales abarcaron el 88,6 %. La suma de áreas quemadas para este año, al combinar las diferentes fuentes, fue de 899,1 ha, principalmente en las áreas de cultivos y pastizales, con 660 ha (73,4 %). Con respecto a la vegetación forestal se afectaron 76 ha de bosque de pino, 25,3 ha de bosque de encino y 131,8 ha de bosque de pino-encino.

En 2020 (figura 6), el análisis de las fuentes satelitales dio como resultado la menor cantidad de puntos de calor (15) y de hectáreas quemadas (49,4 ha). La vegetación natural afectada incluso fue de solo 1,4 ha. Sin embargo, es de mencionar que la imagen satelital más tardía que se pudo utilizar para la temporada seca de este año fue del 18 de mayo, y esta tuvo una nubosidad alta. Por lo tanto, no se detectaron varios incendios forestales registrados por la CONANP alrededor de esta fecha. No obstante, también la cifra total de áreas quemadas reportada por la CONANP fue muy baja (19 ha). Los datos de la CONAFOR aún no estaban disponibles al momento de realizar este estudio. La suma total de áreas quemadas para este año fue de 68,4 ha (cultivos y pastizales: 51,3 ha; bosque de pino: 15,8 ha; y bosque de encino: 1,4 ha).

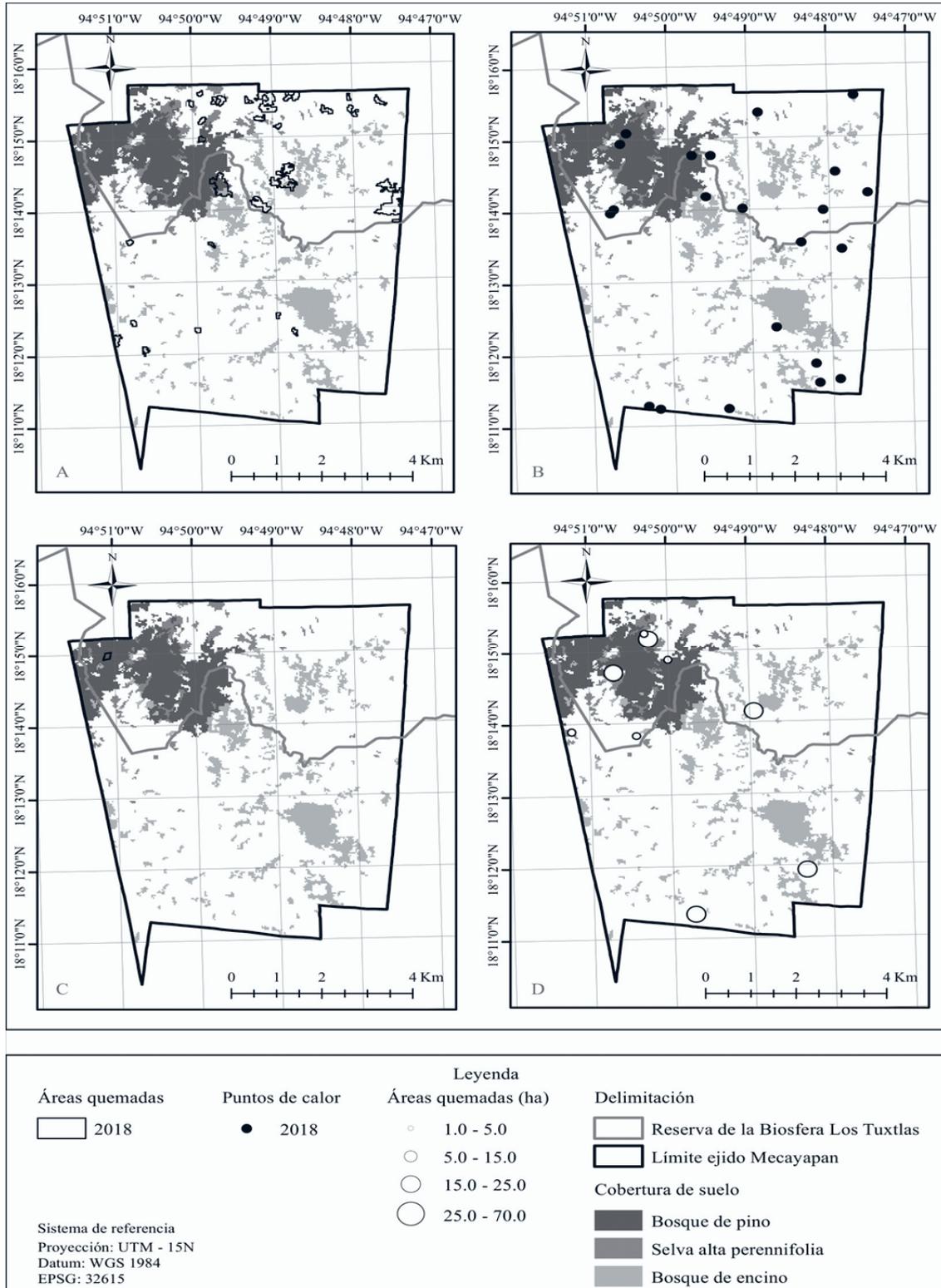
El cuadro 3 resume las cifras para los cinco años estudiados y demuestra nuevamente las grandes diferencias entre las fuentes de datos. Las cifras de CONANP y CONAFOR fueron, por mucho, menores a las del análisis de imágenes satelitales, pero esto tuvo que ver en parte con el hecho que no incluyeron quemas agrícolas controladas que podrían estar incluidas en el análisis satelital y, en el caso de la CONAFOR, en general no incluyen incendios en zonas agrícolas y pastizales. Al contrario, como se describe en los párrafos anteriores, muchos incendios reportados por CONANP y CONAFOR no fueron registrados en las imágenes satelitales, debido a la nubosidad que dificulta su detección, o se encontraron representados con un menor número de hectáreas afectadas en el caso de un lapso considerable entre el incendio y la toma de la imagen satelital.

En total, al combinar las diferentes fuentes, más de dos tercios de las superficies quemadas (67 %) fueron ocupados por las áreas de cultivos y pastizales; como se mencionó anteriormente, buena parte de estas áreas podrían relacionarse con quemas agrícolas controladas, no a incendios forestales. En cambio, las áreas quemadas en vegetación natural fueron considerados incendios forestales, con una afectación total de 633,5 ha. De éstas, 53,4 ha se presentaron en selva alta perennifolia y un total de 596,8 ha en vegetación adaptada al fuego que se repartió entre bosque de pino, bosque de encino, bosque de encino-pino y bos-



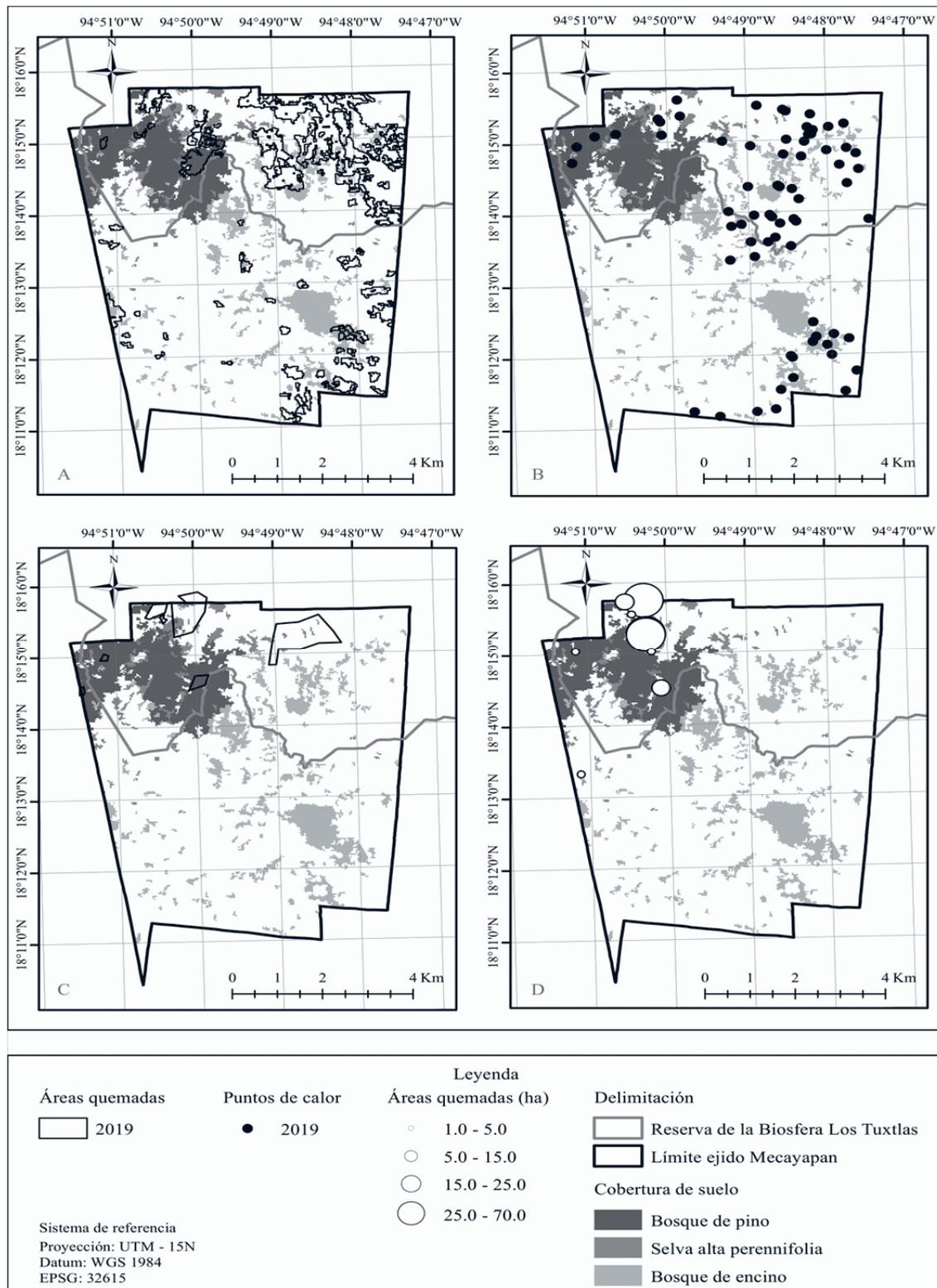
**Figura 3.** Áreas quemadas y puntos de calor en el ejido Mecayapan (2017): imágenes Landsat-8 OLI (A), puntos de calor VIIRS (B), datos de CONANP (C) y de CONAFOR (D). Fuente: Elaboración propia con base en RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), NASA (2021), USGS (2021) y datos solicitados a CONAFOR y CONANP.

Burnt areas and thermal hotspots in the ejido Mecayapan (2017): Landsat-8 OLI images (A), VIIRS thermal hotspots (B), data from CONANP (C), and CONAFOR (D). Source: Own elaboration based on RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), NASA (2021), USGS (2021), and data requested from CONAFOR and CONANP.



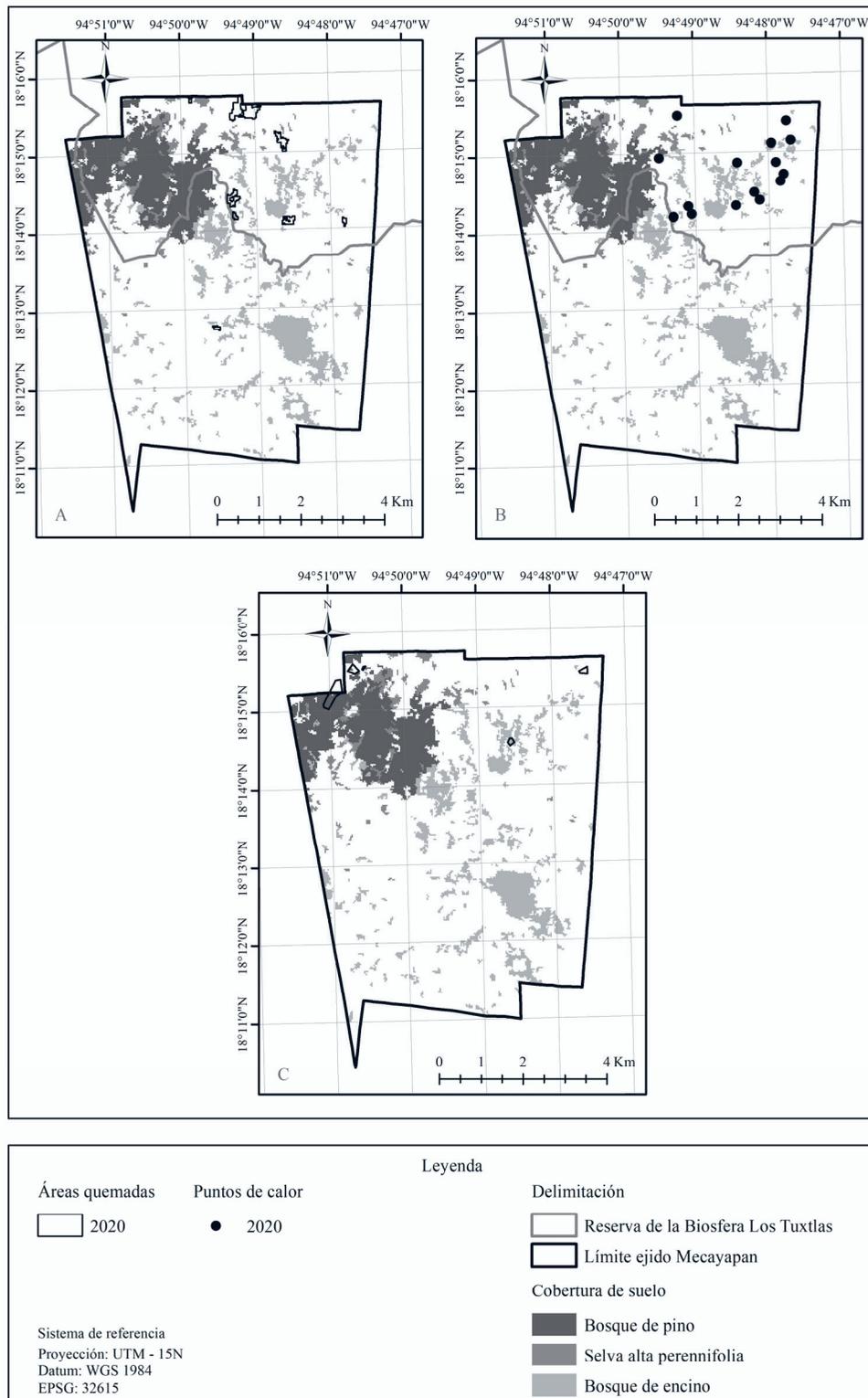
**Figura 4.** Áreas quemadas y puntos de calor en el ejido Mecayapan (2018): imágenes Landsat-8 OLI (A), puntos de calor VIIRS (B), datos de CONANP (C) y de CONAFOR (D). Fuente: Elaboración propia con base en RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), NASA (2021), USGS (2021) y datos solicitados a CONAFOR y CONANP.

Burnt areas and thermal hotspots in the Mecayapan ejido (2018): Landsat-8 OLI images (A), VIIRS thermal hotspots (B), data from CONANP (C), and CONAFOR (D). Source: Own elaboration based on RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), NASA (2021), USGS (2021), and data requested from CONAFOR and CONANP.



**Figura 5.** Áreas quemadas y puntos de calor en el ejido Mecayapan (2019): imágenes Landsat-8 OLI (A), puntos de calor VIIRS (B), datos de CONANP (C) y de CONAFOR (D). Fuente: Elaboración propia con base en RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), NASA (2021), USGS (2021) y datos solicitados a CONAFOR y CONANP.

Burnt areas and thermal hotspots in the Mecayapan ejido (2019): Landsat-8 OLI images (A), VIIRS thermal hotspots (B), data from CONANP (C), and CONAFOR (D). Source: Own elaboration based on RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), NASA (2021), USGS (2021), and data requested from CONAFOR and CONANP.



**Figura 6.** Áreas quemadas y puntos de calor en el ejido Mecayapan (2020): imágenes Landsat-8 OLI (A), puntos de calor VIIRS (B) y datos de CONANP (C). Fuente: Elaboración propia con base en RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), NASA (2021), USGS (2021) y datos solicitados a CONANP.

Burnt areas and thermal hotspots in the Mecayapan ejido (2020): Landsat-8 OLI images (A), VIIRS thermal hotspots (B), and data from CONANP (C). Source: Own elaboration based on RAN (2019), CONABIO (2020), CONANP (2021), NASA (2021), USGS (2021), and data requested from CONANP.

**Cuadro 3.** Áreas quemadas por tipo de vegetación y uso de suelo de 2016 a 2020 en el ejido Mecayapan. Fuente: Elaboración propia con base en NASA (2021), USGS (2021) y datos solicitados a la CONANP y la CONAFOR.

Burnt areas per vegetation type and land use from 2016 to 2020 in the Mecayapan ejido. Source: Own elaboration based on NASA (2021), USGS (2021), and data requested from CONANP and CONAFOR.

Vegetación y uso de suelo	Imágenes Landsat-8 OLI	Registros CONANP	Registros CONAFOR	Suma de áreas ajustada
Bosque de pino	157,8 ha	116,7 ha	121,1 ha	275,8 ha
Bosque de encino	35,9 ha	57 ha	42 ha	132
Bosque de encino-pino y pino-encino	-	-	189 ha	189 ha
Selva alta perennifolia	0 ha	28,6 ha	48,0 ha	53,4 ha
Subtotal vegetación natural	193,7 ha	202,3 ha	400,1 ha	633,5 ha
Cultivos y pastizales	1.188,4 ha	287,2 ha	0 ha	1.287,7 ha
Total	1.382,1 ha	489,5 ha	400,1 ha	1.921,2 ha

que de pino-encino (las últimas dos categorías solamente se reportan en los datos de la CONAFOR).

## DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio reflejaron claramente lo que se planteó en la hipótesis, de que para el monitoreo óptimo de los incendios forestales en un lugar determinado es recomendable contar con fuentes de datos diversos, dadas las limitaciones de cada una de estas. Con esto, el trabajo aportó a la literatura acerca de la combinación de distintas fuentes de datos en el monitoreo de los incendios forestales (Zúñiga-Vázquez *et al.* 2017, González-Gutiérrez *et al.* 2020, Neger y Manzo-Delgado 2021), sobre todo para el caso de estudios locales, que requieren un alto grado de detalle y donde no es suficiente basarse en una sola fuente para conocer la incidencia real de este fenómeno.

Los datos de percepción remota (puntos de calor e imágenes satelitales) que han sido utilizados en distintos estudios anteriores en México (Galicia *et al.* 2014, Manzo-Delgado 2016, Barrios y Escobar 2020, Manzo-Delgado y López-García 2020), ofrecen ventajas en cuanto a su accesibilidad (disponibilidad gratuita e inmediata) y la facilidad de analizarlos en gabinete con el apoyo de índices especializados. Sin embargo, los puntos de calor en sí son solo un indicio que podría haber un incendio, pero requieren una verificación adicional (Sofan *et al.* 2022); además no son de utilidad para delimitar áreas quemadas de manera detallada. Al contrario, las imágenes satelitales fueron la fuente que mayor número de áreas quemadas identificó en este estudio.

Es importante considerar las limitaciones para este tipo de análisis. En el presente estudio, se confirmó la problemática reportada por Thompson y Morrison (2020), de distinguir entre incendios forestales y quemas agropecuarias controladas, ya que gran parte de la superficie delimitada correspondió a áreas de cultivo y pastizales. Sin embargo,

sería erróneo clasificar simplemente todas estas áreas quemadas como quemas controladas, ya que varios incendios descontrolados afectan también las parcelas cultivadas, como lo reflejan los registros de la CONANP. Además, se resaltó otra desventaja de los datos satelitales: en Mecayapan como área caracterizada por el clima tropical húmedo, aun en la temporada seca se pudo observar frecuentemente una alta nubosidad que dificulta o casi imposibilita en algunos años la identificación de áreas quemadas mediante las imágenes satelitales. No obstante, el presente trabajo también mostró que, a pesar de las problemáticas mencionadas, el análisis satelital representa un recurso valioso para complementar los caminamientos y la verificación de las áreas quemadas de los datos oficiales en campo.

Fueron evidentes los escasos datos de campo, donde se documentó mediante las entrevistas aplicadas que muchos de los actores no llevan ningún registro y que existe una descoordinación en cuanto al monitoreo de los incendios atendidos. Solamente dos dependencias sí llevan registros, pero en estos es notable la falta completa o la cantidad muy baja de registros en ciertos años (sobre todo de la CONAFOR en 2016 y la CONANP en 2018), y también la delimitación poco precisa de los polígonos que se aprecia en las figuras 2 a 6, y que podría ser mejorada tomando como referencia las imágenes satelitales. Entre las dos fuentes, la CONANP aportó un mayor número de áreas quemadas, pero si se consideran solamente las zonas forestales, es mayor el número que resulta del registro que tiene la CONAFOR, aunque también esta fuente presenta faltas de datos importantes, lo cual es notable, ya que ha sido utilizada previamente por distintos estudios aplicados en el país (Pérez-Verdín *et al.* 2013, Pompa-García *et al.* 2018, Corona-Núñez *et al.* 2020).

Aparte de la combinación de imágenes satelitales y datos de campo que ya había sido recomendado por Zúñiga-Vázquez *et al.* (2017), en este trabajo también se mostró la relevancia de utilizar diferentes fuentes de campo, en caso de ser disponibles, para completar la base de datos. Sería

particularmente interesante en este contexto poder incluir no solo datos de organismos federales sino también de actores comunitarios, municipales y estatales que participan en el combate de los incendios. En el presente trabajo, esto no se logró, dado que muchos de estos actores no llevan registros o no los hacen públicos.

El monitoreo de incendios forestales es un campo de estudio dinámico con el desarrollo de innovaciones continuas. En este sentido, tanto el análisis satelital como el registro en campo tienen el potencial de volverse más eficaces, por ejemplo, utilizando mecanismos de aprendizaje automático (Thompson y Morrison 2020), la utilización de drones (López-Vicente *et al.* 2021) o la verificación mediante transectos o caminamientos en el terreno (Flores *et al.* 2021). Sin embargo, aun con estas mejoras, es poco probable que se logre obtener en el futuro cercano un registro completo de incendios forestales para un área determinada con base en una sola fuente. Por lo tanto, para obtener una base de datos lo más completa posible, que pueda ser de utilidad para el manejo del fuego, es indispensable combinar todas las fuentes disponibles. En el presente caso fueron cuatro fuentes consultadas, dos de ellas registros de campo; en otras áreas podrían ser incluso más.

La integración de las diferentes fuentes de información subrayó la alta incidencia de incendios forestales en el ejido Mecayapan e indicó que existen deficiencias desde el punto de vista del concepto de manejo del fuego integral (Castro *et al.* 2021), a pesar de la buena coordinación y organización con respecto al combate que reportaron los entrevistados. Si bien la mayor parte ocurrió en zonas de áreas de cultivo y pastizales, fue considerable la suma de áreas quemada de 633,5 ha en vegetación natural; además, una buena parte de esta vegetación quemada se encontró dentro de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas. En parte se trató de vegetación sensible al fuego, con efectos devastadores para la naturaleza. Otra parte fueron bosques con vegetación adaptada, pero la frecuencia de incendios y su concentración en los mismos lugares en años repetidos podría llevar también ahí a una degradación del ecosistema.

## CONCLUSIONES

Para realizar un manejo integral del fuego en un área local, es indispensable contar con datos precisos y lo más completo posibles acerca de la incidencia de los incendios y las áreas afectadas. El estudio se enfoca en el ejido Mecayapan, México, donde anualmente se registra una incidencia notable de incendios forestales. Mediante la aplicación de entrevistas se identifican dos fuentes de datos de campo (registros de CONANP y CONAFOR) y se integran dos fuentes más con base en el análisis satelital (puntos de calor VIIRS e imágenes satelitales Landsat). Se demuestra que ninguna de estas fuentes genera un registro completo, debido a limitaciones inherentes en los procesos de recopilación de información. Sin embargo, al combinar las diferentes fuentes, estas se complementan y pueden

disminuir los errores en la interpretación de cada una de las fuentes (por ejemplo, de confundir quemas agrícolas controladas e incendios forestales).

Se recomienda que este tipo de combinación de fuentes de datos vaya más allá de un estudio aislado como fue el presente caso, al establecimiento de un monitoreo coordinado entre las instituciones que llevan los registros de campo y que analizan los datos satelitales. En estudios futuros se sugiere revisar cómo se podrían diseñar procesos semejantes, y cuáles serían los factores necesarios para que funcionen de manera exitosa. Además de esto, cada una de las fuentes presentadas tiene el potencial de ser optimizada, utilizando nuevas tecnologías que faciliten tanto la detección remota como el levantamiento de datos en campo.

Para lograr un monitoreo continuo y coordinado, sería deseable el establecimiento de redes de colaboración entre los organismos que trabajan en el análisis satelital y de las dependencias presentes en campo. Mediante este mecanismo, se podría trabajar también en incluir y capacitar a otros actores que realizan actividades de manejo del fuego pero que no suelen levantar registros, y de homogeneizar las metodologías aplicadas. Sería particularmente importante contar con datos por parte de las comunidades, que tienen la ventaja de conocer sus territorios mucho mejor que cualquier actor externo. Además, al estar directamente en los lugares afectados, podrían aportar información relevante como los ecosistemas afectados y la intensidad de los incendios.

Los resultados de este trabajo muestran también la necesidad de atender la problemática de la alta incidencia de incendios en el ejido y en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, en áreas de uso agropecuario y en la vegetación natural, especialmente la que es sensible al fuego. Por lo tanto, se deben aumentar los esfuerzos para establecer una estrategia eficaz de manejo del fuego integral, basándose en la buena cooperación de las brigadas en el combate que se reportó en las entrevistas, pero incluyendo también un mayor esfuerzo en la prevención y la participación activa de la comunidad, para evitar los efectos negativos del fuego para la biodiversidad y para la sociedad.

## FINANCIAMIENTO

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IA300521.

## AGRADECIMIENTOS

Les damos las gracias a la CONAFOR (Enlace estatal en Veracruz) y la CONANP (Dirección de Operación Regional y Dirección de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas) por poner a disposición sus datos de incidencia de incendios forestales, y a todas las personas que pudimos entrevistar y que nos compartieron su conocimiento de la temática estudiada.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Christoph Neger (CN) desarrolló la idea del manuscrito y revisó la literatura acerca del área de estudio. Christoph Neger y Lilia de Lourdes Manzo Delgado (LLMD) revisaron la literatura relevante y diseñaron la metodología. CN, José Manuel Espinoza Rodríguez (JMÉR) y Paula García López (PGL) recopilaron los datos; CN, PGL, LLMD y JMÉR realizaron el análisis de los datos satelitales; CN y PGL analizaron los datos de campo de las instituciones y prepararon las figuras y tablas; CN escribió el primer borrador, después PGL, LLMD y JMÉR lo revisaron y complementaron. Todos los autores aprobaron la versión final del manuscrito.

## REFERENCIAS

- Bastarrika A, E Chuvieco, MP Martín. 2011. Mapping burned area from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment* 115(4): 1003-1012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.005>
- Barrios RJ, RE Escobar. 2020. Análisis de la problemática de los incendios forestales y sus implicaciones en la pérdida de cobertura forestal en Cintalapa, Chiapas. *Revista de Geografía Agrícola* (65): 63-83. DOI: <https://doi.org/10.5154/rga.2020.65.04>
- Castillo-Campos G, J Laborde. 2004. La Vegetación. In Guevara S, J Laborde, G Sánchez-Ríos eds. Los Tuxtlas: el paisaje de la Sierra. Xalapa, México. Instituto de Ecología. p. 231-285.
- Castro F, P Morgan, P Fernandes, C Hoffman. 2021. Integrated fire management. In Castro F, P Morgan, P Fernandes, C Hoffman eds. Fire science: From chemistry to landscape management. Cham, Suiza. Springer Link. p. 509-597.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, MX). 2020. Cobertura del Suelo de México a 30 metros, 2015. Mexico City, Mexico. Consultado 15 oct. 2021. Disponible en <http://geoport.al.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/nalcmismx15gw.html>
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, MX). 2006. Programa de Conservación y Manejo: Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, versión extensa. Mexico City, Mexico. Consultado 10 nov. 2021. Disponible en [https://simec.conanp.gob.mx/pdf\\_libro\\_pm/138\\_libro\\_pm.pdf](https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/138_libro_pm.pdf)
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, MX). 2021. Información Espacial de las Áreas Naturales Protegidas. Mexico City, Mexico. Consultado 15 oct. 2021. Disponible en [http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info\\_shape.htm](http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm)
- Corona-Núñez RO, F Li, JE Campo. 2020. Fires represent an important source of carbon emissions in Mexico. *Global Biogeochemical Cycles* 34(12): e2020GB006815. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GB006815>
- Flores JG, AG Flores, E Gottfried-Burguett. 2021. Evaluación de la concentración de carbono y estimación del potencial de emisiones GEI en combustibles forestales. *E-CUCBA* (17): 156-164. Consultado 15 oct. 2021. Disponible en <http://e-cucba.cucba.udg.mx/index.php/e-Cucba/article/view/224>
- Gale MG, GJ Cary, AIJM Van Dijk, M Yebra. 2021. Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour. *Remote Sensing of Environment* 255: 112282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112282>
- Galicia L, ML Cuevas, LM González, S Couturier. 2014. Detección del cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia* 39(6): 368-374. Consultado 26 jul. 2021. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33931213002>
- González-Gutiérrez I, JF Mas-Causel, LM Morales-Manilla, KA Ocegüera-Salazar. 2020. Thematic accuracy of hotspots and wildfires in Michoacán, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 26(1): 17-35. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2019.01.011
- Gómez I, MP Martín. 2008. Estudio comparativo de índices espectrales para la cartografía de áreas quemadas con imágenes MODIS. *Revista de Teledetección* 29: 15-24. Consultado 11 sep. 2021. Disponible en <https://digital.csic.es/bitstream/10261/157342/1/Revista-AET-29-2.pdf>
- Hall DK, JP Ormsby, L Johnson, J Brown. 1980. Landsat digital analysis of the initial recovery of burned tundra at Kokolik River, Alaska. *Remote Sensing of Environment* 10(4): 263-272. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90086-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(80)90086-3)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, MX). 2021a. Censo de Población y Vivienda 2020. Aguascalientes, Mexico. Consultado 12 ene. 2022. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, MX). 2021b. Marco Geoestadístico. Aguascalientes, Mexico. Consultado 15 oct. 2021. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>
- Kelly LT, KM Giljohann, A Duane, N Aquilué, S Archibald, E Batllori, AF Bennett, ST Buckland, Q Canelles, MF Clarke, MJ Fortin, V Hermoso, S Herrando, RE Keane, FK Lake, MA McCarthy, A Morán-Ordóñez, CL Parr, JG Pausas, TD Penman, A Regos, L Rumpff, JL Santos, AL Smith, AD Syphard, MW Tingley, L Brotons. 2020. Fire and biodiversity in the Anthropocene. *Science* 370(6519): eabb0355. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abb0355>
- López-Vicente M, A Cerdà, H Kramer, S Keesstra. 2021. Post-fire practices benefits on vegetation recovery and soil conservation in a Mediterranean area. *Land Use Policy* 111: 105776. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105776>
- Manzo-Delgado LL. 2016. Incendios forestales de gran relevancia: algoritmos y sensor MODIS para su detección y monitoreo. In Mocada JO, A López eds. Geografía de México. Mexico City, Mexico. Universidad Nacional Autónoma de México. p. 334-349.
- Manzo-Delgado LL, J López-García. 2020. Análisis espacial y temporal de áreas quemadas 1998, 2003 y 2015 en la Reserva de la Biosfera Montes Azules, Chiapas, México. *Bosque* 41(1): 11-24. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0717-92002020000100011>
- NASA (National Aeronautics and Space Administration, US). 2021. FIRMS: Fire Information for Resource Management System. Washington, USA. Consultado 20 ago. 2021. Disponible en <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>

- Neger C, LL Manzo-Delgado. 2021. La evaluación de la gestión del riesgo de los incendios forestales en áreas naturales protegidas tropicales: el caso de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas (México). *Cuadernos Geográficos* 60(3): 95-128. DOI: <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i3.16236>
- Pérez-Verdín G, MA Márquez-Linares, A Cortés-Ortiz, M Salmerón-Macias. 2013. Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques* 19(2): 37-58. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192339>
- Pompa-García M, J Camarero, DA Rodríguez-Trejo, DJ Vega-Nieva. 2018. Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico. *Chinese Geographical Science* 28: 25-37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11769-017-0928-0>
- RAN (Registro Agrario Nacional, MX). 2019. Catastro Rural. Mexico City, Mexico. Consultado 20 sep. 2021. Disponible en <https://datos.gob.mx/busca/organization/ran?page=2>
- Rodríguez DA. 2014. Incendios de vegetación: Su ecología, manejo e historia, Vol. 1. Mexico City, Mexico. Biblioteca Básica de Agricultura, Colegio de Posgraduados. 891 p.
- Sofan P, F Yulianto, AD Sakti. 2022. Characteristics of false-positive active fires for biomass burning monitoring in Indonesia from VIIRS data and local geo-features. *International Journal of Geo-Information* 11(12): 601. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi11120601>
- Thompson DK, K Morrison. 2020. A classification scheme to determine wildfires from the satellite record in the cool grasslands of southern Canada: considerations for fire occurrence modelling and warning criteria. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20: 3439-3454. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-20-3439-2020>
- USGS (United States Geological Survey, US). 2021. GloVis. Reston, USA. Consultado 11 sep. 2021. Disponible en <https://glovis.usgs.gov/app>
- Von Thaden JJ, J Laborde, S Guevara, P Mokondoko-Delgadillo. 2020. Dinámica de los cambios en el uso del suelo y cobertura vegetal en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas (2006-2016). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 91: e913190. DOI: <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3190>
- Villaseñor JL, E Ortiz, A Campos-Villanueva. 2018. High richness of vascular plants in the Tropical Los Tuxtlas region, Mexico. *Tropical Conservation Science* 11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1940082918764259>
- Zúñiga-Vásquez JM, D Cisneros-González, M Pompa-García, DA Rodríguez-Trejo, G Pérez-Verdín. 2017. Spatial modeling of forest fires in Mexico: an integration of two data sources. *Bosque* 38 (3): 563-574. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000300014>

Recibido: 13/08/22  
Aceptado: 08/07/23

