Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60896 • ARTÍCULOS
Núm. 115 • Diciembre • 2024 • e60896
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Análisis multitemporal de las áreas quemadas en ecosistemas tropicales de Campeche, México: causas meteorológicas y antrópicas

Multitemporal analysis of burned areas in tropical ecosystems of Campeche, Mexico: meteorological and anthropogenic causes

Alfonso Carbajal-Domínguez,* Lilia de Lourdes Manzo-Delgado,** Claudia María Monzón-Alvarado*** y Christoph Neger****

Recibido: 14/12/2024. Aceptado: 8/05/2024. Publicado: 07/11/2024.

Resumen. Cada día se pierden 20 000 hectáreas de selvas debido al fuego en la zona intertropical del planeta. La sensibilidad de las selvas al fuego se debe a la alta tasa de mortalidad que amenaza a estos ecosistemas. La investigación se centra en analizar la distribución de áreas quemadas en las selvas de la región oriental del municipio de Escárcega, Campeche, entre 2013 y 2020, y explorar su vínculo con las condiciones meteorológicas y el uso agropecuario del fuego. Para la detección de áreas quemadas, se utilizaron imágenes de satélite Landsat 8 OLI y los índices espectrales NBR y BAI. Se quemaron 29 151.82 hectáreas, que corresponde al 12.06% de la selva del área en estudio. En 2019 se registró la mayor extensión quemada, así como el incendio más extenso que corresponde con un año de altas temperaturas y baja precipitación, que confirma la relación entre las condiciones climáticas de sequía y el aumento de incendios. Se aplicaron 26 entrevistas en nueve ejidos que permitieron averiguar las causas de los incendios, entre las que destacan la caza furtiva, quemas agropecuarias y cambio de uso de suelo. La gestión adecuada del fuego es crucial para preservar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. La interacción entre acciones humanas y variables meteorológicas influye en la frecuencia de los incendios, donde un manejo inapropiado del fuego puede dar como resultado quemas descontroladas y las condiciones climáticas pueden favorecer su propagación.

Palabras-clave: análisis multitemporal, ecosistemas tropicales, incendios forestales, índices BAI y NBR, Escárcega, Campeche.

Abstract. Every day, 20,000 hectares of forests are lost due to fire in the intertropical zone of the planet. The sensitivity of forests to fire is due to the high mortality rate that threatens these ecosystems. The research focuses on analyzing the distribution of burned areas in the forests of the eastern

* Posgrado en Geografía, Unidad de Posgrado, edificio E, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. 07510. Teléfono 55 11319311. Correo electrónico: alfonsocd88@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6896-1113
** Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Investigación Científica s/n, Colonia Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México, C.P. 04510. Teléfono: 55 5623 0222 Ext: 45501Correo electrónico: llmanzo@geografia.unam.mx, ORCID: 0000-0003-4833-6497
*** Departamento de Ciencias de la Sustentabilidad, El Colegio de la Frontera Sur Unidad Campeche, CONAHCYT. Av. Rancho Polígono 2-A, Ciudad Industrial, Lerma Campeche, Camp. C.P. 24500. Teléfono: (981) 12 7 3720 Ext: 2414. Correo electrónico: cmonzon@ecosur.mx, ORCID: 0000-0001-9131-9276
**** Unidad Académica de Estudios Territoriales Yucatán, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. C. 50 419B, Centro, 97000 Mérida, Yuc. Correo electrónico: neger@geografia.unam.mx, ORCID: 0000-0001-5210-5005. *Autor de correspondencia.

region of the municipality of Escárcega, Campeche, between 2013 and 2020, and exploring its link with meteorological conditions and agricultural use of fire. For the detection of burned areas, Landsat 8 OLI satellite images and NBR and BAI spectral indices were used. A total of 29,151.82 hectares were burned, which corresponds to 12.06% of the forest in the study area. In 2019, the largest burned area was recorded, as well as the most extensive fire corresponding with a year of high temperatures and low precipitation, which confirms the relationship between drought weather conditions and increased fires. Twenty-six interviews were conducted in nine ejidos to determine the causes of the fires, including poaching, agricultural and livestock burning, and land use change. Proper fire management is crucial for preserving biodiversity and ecosystem services. The interaction between human actions and meteorological variables influences the frequency of fires, where inappropriate fire management can result in uncontrolled burning and climatic conditions can favor their spread.

Keywords: multitemporal analysis, tropical ecosystems, forest fires, BAI and NBR indices, Escárcega, Campeche.

INTRODUCCIÓN

Se estima que, a nivel global, cada día se pierden 20 000 ha de selvas por el fuego en la zona intertropical del planeta, incluyendo extensas regiones de África, Asia, Oceanía, y América. Entre las causas principales destacan la deforestación y las quemas agropecuarias (Estrada y Coates-Estrada, 2003; Manzo-Delgado y López-García, 2020).

El fuego desempeña un papel crucial en el funcionamiento de los ecosistemas, permitiendo su renovación siempre que se mantenga dentro de los límites de sus regímenes naturales (Rodríguez Trejo, 2014). Sin embargo, los cambios en los regímenes de incendios forestales pueden afectar negativamente las funciones y servicios proporcionados por los ecosistemas (Moghli *et al*., 2021). Actualmente las condiciones atmosféricas están cambiando a nivel global, por lo que se esperan cambios en el comportamiento y régimen del fuego del planeta (Monzón Alvarado, 2018).

En condiciones naturales, las selvas se caracterizan por tener una baja frecuencia de incendios, con intervalos de uno cada 100 años o incluso varios siglos (Rodríguez-Trejo *et al*., 2019). No obstante, la combinación de diversos factores derivados del uso del fuego por parte del ser humano y la variabilidad de las condiciones meteorológicas, como la temperatura y la precipitación, como parte de los efectos del cambio climático (González *et al*., 2011) y el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Manzo-Delgado y López-García, 2020; Pazmiño, 2019), ha alterado el patrón de ocurrencia de incendios en las selvas, convirtiéndolos en una perturbación significativa (Pagan *et al*., 2021; Zamora-Crescencio *et al.,* 2017).

Dentro de este marco, las selvas son consideradas sensibles al fuego debido a la alta tasa de mortalidad que se produce en ellas (Rodríguez Trejo, 2014). Además, la sucesión ecológica puede tardar décadas o incluso siglos en restablecer la composición y estructura previas a un incendio (Rodríguez Trejo *et al*., 2019). Ante esta situación, es primordial conservar la gran biodiversidad de estos ecosistemas tropicales (Rodríguez-Trejo *et al*., 2011; Román-Cuesta y Martínez-Vilalta, 2006).

La estimación del área afectada por el fuego ha sido llevada a cabo mediante la observación en el terreno, empleando GPS y mapas topográficos para obtener mediciones precisas. Sin embargo, este método suele ser muy puntual y dificulta la evaluación de grandes áreas. Por esta razón, se ha procurado integrar el uso de imágenes multiespectrales obtenidas de sensores remotos para desarrollar métodos estandarizados basados en índices espectrales. Estos índices permiten identificar la superficie afectada por el fuego, logrando disminuir el tiempo de análisis y los recorridos en campo (Flores-Rodríguez *et al*., 2021; Pérez *et al*., 2022). Uno de estos índices que ha presentado buenos resultados es el Normalizado de Área Quemada (NBR, por sus siglas en inglés *Normalized Burn Ratio*) (Arellano *et al*., 2017). Asimismo, el Índice de Superficie Quemada (BAI, por sus siglas en inglés *Burnt Area Index*) también ha demostrado ser efectivo (Wu *et al*., 2022). La combinación de ambos índices ha logrado un buen desempeño con imágenes Landsat (Manzo Delgado y López García, 2013).

Estas herramientas son particularmente relevantes cuando consideramos que la transformación de las selvas del sureste de México, ya sea por prácticas agrícolas o quemas intencionadas, ha sido un factor

perturbador significativo en el último siglo (Alonso Velasco y Velázquez Torres, 2019), con distintos factores humanos y ambientales que influyen en ello, como las sequías provocadas por el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la acumulación de combustible por huracanes (Rodríguez-Trejo *et al*., 2011) y recientemente en 2019, la implementación del programa 'Sembrando Vida' (Pagan *et al*., 2021).

En este contexto, el estado de Campeche, ubicado en el sureste del país, destaca por contar con una de las redes más extensas de áreas naturales protegidas, las cuales se superponen en gran medida con vastas extensiones de tierras ejidales. Esto ha originado una escasa vigilancia, lo cual ha propiciado el cambio de uso de suelo, conflictos agrarios por la expansión de la frontera agropecuaria, tala, caza furtiva, invasión por asentamientos humanos y extracción de recursos maderables (Pérez Rodríguez *et al*., 2018).

La contribución de esta investigación radica en su capacidad para proporcionar una comprensión más profunda de las causas que han incrementado los incendios en las selvas del sureste de México, con énfasis en las condiciones meteorológicas y el uso del fuego antrópico. Al examinar ambos factores, se podrían desarrollar estrategias más efectivas de prevención y manejo. Además, al entender mejor la distribución actual de las áreas quemadas, también sería posible analizar la severidad del incendio, el impacto del fuego en la diversidad vegetal de la selva y dirigir recursos hacia la conservación y restauración de estos valiosos ecosistemas.

El objetivo de esta investigación es analizar la distribución de las áreas quemadas en las selvas de la región oriental del municipio de Escárcega, en el estado de Campeche, durante el período 2013-2020 considerando la variabilidad de las condiciones meteorológicas y el uso del fuego antrópico, para sentar una base para desarrollar estrategias efectivas de prevención de incendios a nivel ejidal. Los objetivos particulares son: 1) conocer la ubicación, extensión y vegetación afectada en las áreas quemadas, así como la frecuencia de incendios; 2) analizar las condiciones meteorológicas asociadas a los incendios en la región y (3) examinar los factores de origen humano que contribuyen a los incendios asociados a los ejidos. El análisis se basa en la utilización de puntos de calor derivados de imágenes VIIRS e índices BAI y NBR generados con imágenes de satélite Landsat 8 OLI, datos de temperatura, precipitación y eventos extremos, además de entrevistas semiestructuradas con los actores locales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El municipio Escárcega, Campeche, se divide de manera destacada en dos partes, una al este y otra al oeste (Figura 1). La zona occidental cuenta con mayor población y ha sido transformada fuertemente por las actividades humanas. Esta investigación se centra en la zona oriental, con menos densidad de población y con amplias superficies de vegetación natural. Esta zona se ubica a -90°00' y -90°40' Longitud Oeste y 18°20' y 19°00' Latitud Norte y tiene una superficie de 280 339.60 ha. Contiene 19 núcleos agrarios de tipo ejido distribuidos en la zona este del municipio. Cabe mencionar que algunos de estos núcleos agrarios se extienden también hacia los municipios Calakmul y Hecelchakán. En esta región predomina la selva mediana subperennifolia y la selva baja espinosa subperennifolia, en combinación con vegetación secundaria arbórea y arbustiva, derivada de ambas selvas, y agroecosistemas (INEGI, 2018). En la porción sur se ubica una parte del área natural protegida de Reserva de la Biosfera de Balam Kú con 110 417 ha de un total de 417 355.86 ha, en el norte se encuentra una pequeña extensión del área protegida Balam Kin con 3787 ha de un total de 102 344.15 ha. Al este, la región colinda con la Reserva de la Biosfera de Calakmul (Figura 1). El área en estudio cubre un intervalo altitudinal entre 0 y 250 m.s.n.m., con topografía plana, algunos lomeríos y llanuras de depósitos lacustres formados por suelos de tipo gleysol y leptosol (INEGI, 2001, 2010; INIFAP y CONABIO, 2008; IUSS Working Group WRB, 2015). El clima es cálido subhúmedo (Aw1), con una temperatura media anual entre 24 °C y 26 °C (García y CONABIO, 2001) y una precipitación anual entre 1000 mm y 1500 mm (Cuervo-Robayo *et al*., 2014).

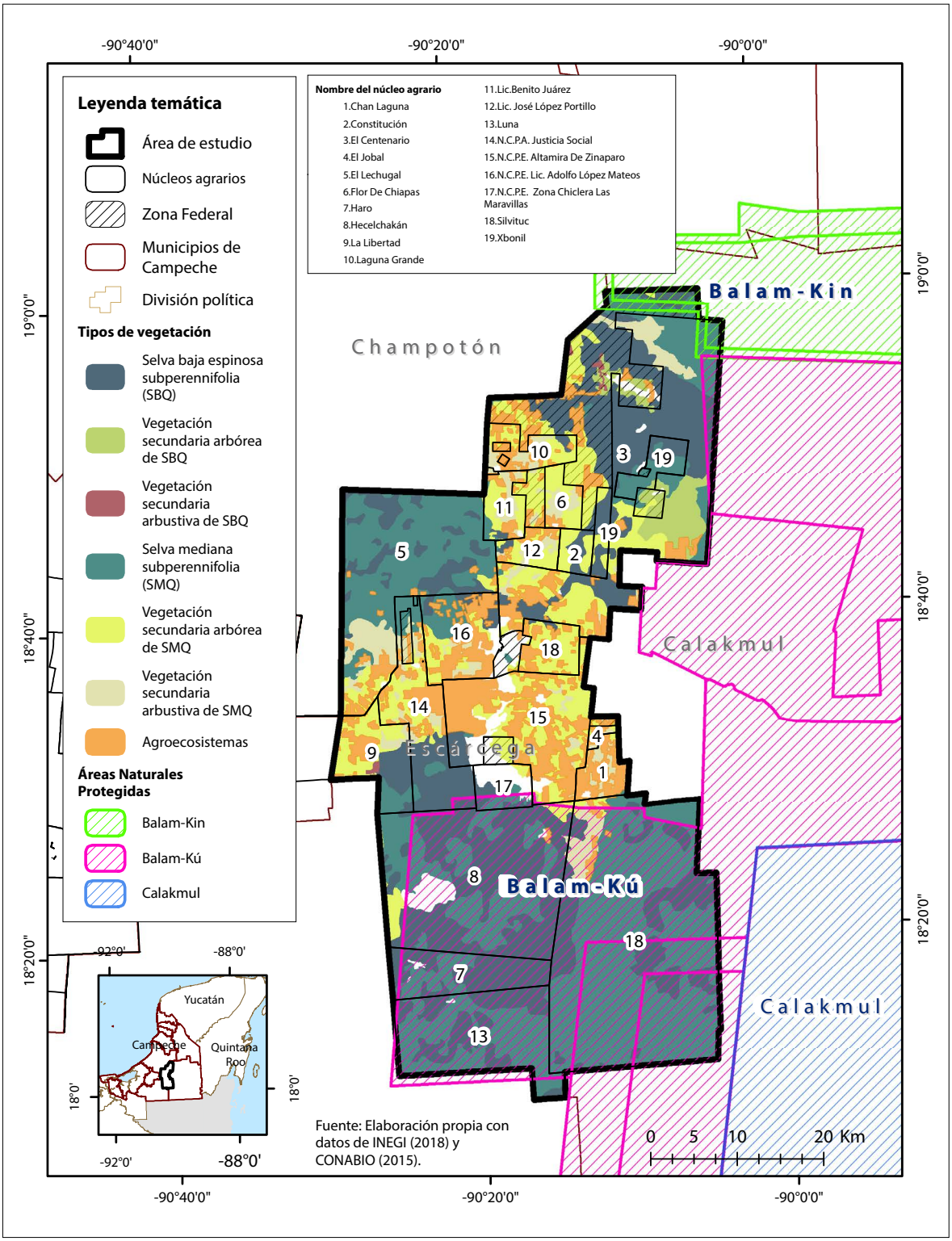

Figura 1. Localización del área en estudio.

Recopilación de información

Para conocer la distribución espacial y temporal de las áreas quemadas se descargaron los puntos de calor 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) (FIRMS, 2022), que se generan a partir del sensor Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) del satélite Suomi-National Polar-orbiting Partnership (S-NPP), con resolución de 375 m. De esta manera, se reunieron 7398 puntos de calor para el periodo en estudio (2013-2020), los cuales fueron organizados en formato vectorial con apoyo de un sistema de información geográfica.

Las imágenes Landsat OLI (*Path/Row* 20/47) se descargaron con apoyo del Visualizador Global del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS 2018). Se utilizaron 8 imágenes con cobertura de nubes menor a 10% de las fechas (año, mes, día): 20130729, 20140427, 20150617, 20160705, 20170606, 20180727, 20190425 y 20200513, en formato Geotiff, corregidas geométrica y radiométricamente (Level-1), en proyección UTM (*Universal Transverse* Mercator). Las imágenes se calibraron radiométricamente para obtener los valores de reflectancia en la parte superior de la atmósfera (TOA) de las bandas ópticas; así mismo, se construyó una máscara de nubes y cuerpos de agua.

La distribución de la vegetación y uso del suelo del área en estudio se determinó mediante interpretación de la cartografía nacional de vegetación y usos del suelo (serie VII) a escala 1:250 000 correspondiente del año 2018 (INEGI, 2018). Los tipos de vegetación son los siguientes: selva mediana subperennifolia (SMQ) y selva baja espinosa subperennifolia (SBQ), vegetación secundaria, incluye vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (VSA/SMQ), vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia (VSA/SBQ), vegetación secundaria arbustiva de selva de selva mediana subperennifolia (VSa/SMQ), vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa subperennifolia (VSa/SBQ).

Los datos de temperatura máxima promedio anual y precipitación acumulada anual del estado de Campeche, correspondientes al periodo 2013-2020, fueron obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2020). Además, se recopiló información sobre los episodios históricos ENOS (Golden Gate Weather Services, 2024; NOAA, 2020) y se registraron datos del monitor de sequía en México para el municipio de Escárcega (SMN, 2021).

Detección y delimitación de las áreas quemadas

El análisis de las bandas espectrales sensibles para la detección de áreas quemadas ha sido utilizado ampliamente para el desarrollo de diversos índices para agilizar la delimitación del perímetro, estimación de los niveles de daño, caracterización de la vegetación afectada y análisis del patrón espacial y temporal (Manzo-Delgado y López-García, 2020; Valdez-Zavala *et al*., 2019). Los índices más utilizados para estos fines son el NBR y BAI (Flores-Rodríguez et al., 2021), los cuales fueron seleccionados para el presente estudio.

A partir del análisis de bandas de las imágenes de satélite Landsat 8 OLI se generaron los índices espectrales NBR y BAI para evaluar la vegetación afectada por el fuego (Figura 2). BAI (Ecuación 1) utiliza los valores de reflectancia (ρ) de ρNIR (Infrarrojo Cercano) y ρRed (Rojo). Las bandas empleadas para el cálculo del índice BAI son la banda 4 Red (0.64 - 0.67 μm) y la banda 5 NIR (0.85 - 0.88 μm). En BAI los umbrales obtenidos para las áreas quemadas de selva cubren un intervalo de valores de 1 a 847.

$$BAI=\frac{1}{(0.1-\rho Red)^2+(0.06-\rho NIR)^2} \quad (1)$$

El índice NBR (Ecuación 2) maneja la región espectral de reflectancia del ρNIR (Infrarrojo cercano) y el ρSWIR (Infrarrojo de longitud de onda corta). Las bandas utilizadas en este índice fueron la banda 5 NIR (0.85 - 0.88 μm) y la banda 7 SWIR (2.11 - 2.29 μm). En NBR los umbrales obtenidos para las áreas quemadas de selva cubren un intervalo de valores de 0 a 1.

$$NBR=\frac{\rho_{NIR}-\rho_{SWIR}}{\rho_{NIR}+\rho_{SWIR}} \quad (2)$$

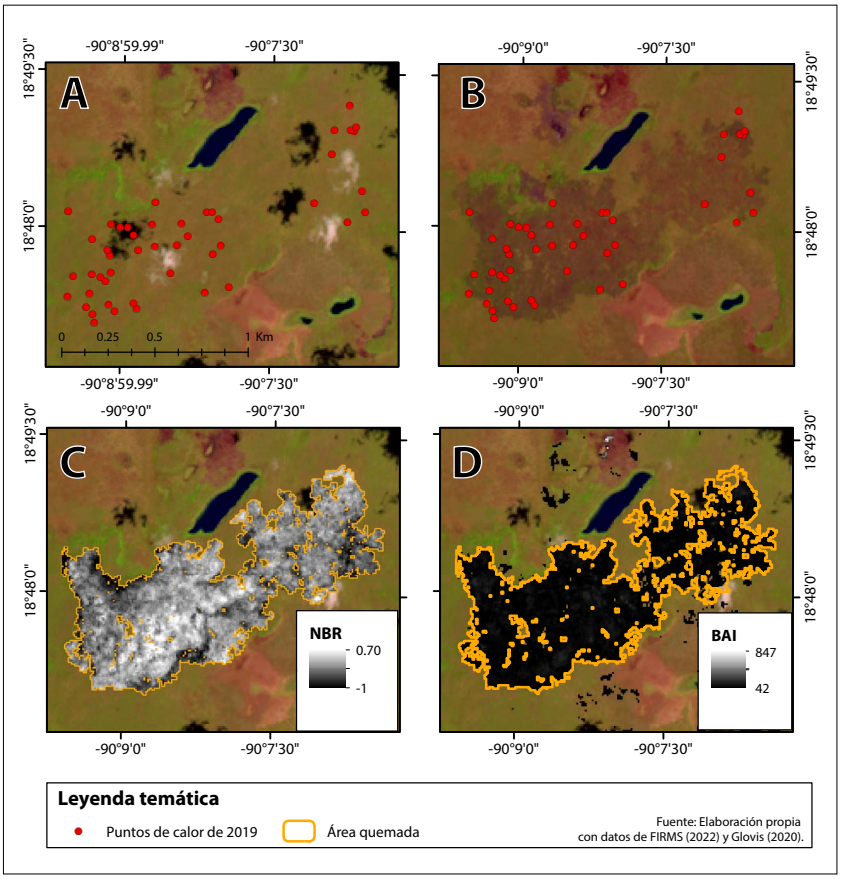

Figura 2. Procesamiento de áreas quemadas. En las imágenes A (pre incendio, 24 de marzo de 2019) y B (posincendio, 25 de abril de 2019) se muestran los compuestos de falso color RGB 754 en Landsat 8. En rojo se muestran los puntos de calor (VIIRS). En las imágenes C y D se muestran los índices NBR y BAI generados con la imagen posincendio del 25 de abril de 2019. La línea naranja muestra el límite final del área quemada.

Cartografía anual del área quemada

La representación espacial del área quemada se generó utilizando las capas vectoriales de los polígonos NBR y BAI. Se agruparon todas las correspondientes al mismo año, y se eliminaron las superficies con una extensión menor a dos hectáreas. Esta exclusión se realizó debido a la resolución espacial de los datos, ya que incluir áreas muy pequeñas podría introducir confusión y ruido en el análisis (Manzo-Delgado y López-García, 2020). Las áreas quemadas anuales fueron caracterizadas por tipo de vegetación (selvas y la vegetación secundaria) y ejidos.

Evaluación de la confiabilidad de las áreas quemadas

Para evaluar la confiabilidad de la cartografía de las áreas quemadas, se seleccionó el año 2019, dado que fue un año representativo del periodo en estudio con el mayor número de puntos de calor. Se utilizó una imagen Sentinel-2 con resolución espacial de 10 metros, superior a la del Landsat 8 OLI que tiene 30 metros (Anaya y Chuvieco, 2012). La fecha de la imagen Sentinel-2 fue captada diez días después (05 de mayo de 2019) que la imagen Landsat 8 OLI (25 de abril de 2019) que se utilizó para delimitar el área quemada.

La delimitación de los polígonos de las áreas quemadas en las imágenes Sentinel-2 se realizó mediante la aplicación del índice NBR. Posteriormente, las áreas quemadas se convirtieron a formato vectorial. La validación consistió en sobreponer ambos polígonos de áreas quemadas derivados de las imágenes y seleccionar 31 regiones al azar con área quemada en selva tropical superior a dos ha, representando una superficie de 885.80 ha. En cada región se cuantificó la superficie interceptada y las diferencias entre ambos polígonos. Los resultados

se organizaron en matrices de confusión para estimar la precisión, los errores de omisión, los errores de comisión y el coeficiente Kappa (Manzo Delgado y López García, 2013).

Entrevistas semiestructuradas

Se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas (Hammer y Wildavsky, 1990), focalizadas en las actividades y costumbres locales potencialmente relacionadas con la ignición y propagación de incendios. Estas entrevistas se realizaron entre junio de 2022 y enero de 2023. El acercamiento con la autoridad ejidal fue clave para dar a conocer el interés de la investigación e identificar a los participantes de las entrevistas. Se llevaron a cabo 26 entrevistas en nueve de los 19 núcleos agrarios seleccionados: Justicia Social, Adolfo López Mateos, Silvituc, Constitución, Xbonil, El Lechugal, El Centenario, Laguna Grande y Benito Juárez. Se entrevisto a ejidatarios (10), autoridades locales (comisarios) (9) y brigadistas o voluntarios que combaten incendios forestales (7). Las preguntas planteadas eran de naturaleza abierta. Estas se ajustaron para reflejar las variadas experiencias y puntos de vista de los participantes. En todas las entrevistas se aplicaron las guías de consentimiento previo, libre e informado. Las respuestas obtenidas fueron transcritas y analizadas cuantitativamente. En este proceso, las respuestas fueron codificadas en temas clave, y se identificaron patrones y tendencias emergentes en las respuestas.

RESULTADOS

Validación de la superficie de las áreas quemadas

Las 31 áreas utilizadas para la validación cubrieron una superficie de 885.80 hectáreas, que se distribuyeron en cinco tipos de selva, cinco áreas en SBQ, tres en SMQ, tres en VSA/SBQ, tres en VSa/SMQ y 17 en VSA/SMQ (Figura 3).

El valor promedio del índice Kappa obtenido fue de 88.75% con un error de omisión promedio de 1.72% y un error de comisión del 12.86%. La precisión obtenida en promedio fue de 95.91%, entre las áreas quemadas de Sentinel-2 y Landsat 8 OLI (Tabla 1). Los errores de omisión promedio se debieron al desfase en la fecha de adquisición de la imagen Sentinel-2 con 10 días posteriores a la imagen Landsat 8 OLI, lo que sugiere que los incendios continuaron avanzando, cubriendo más superficie quemada.

Distribución de las áreas quemadas

En el periodo 2013-2020 se delimitaron 2182 polígonos de área quemada que cubren una superficie total de 29 151.82 ha en la región oriental del municipio de Escárcega. En 2013, se presentó la menor superficie afectada con 926.75 ha que representan 0.77 % de la vegetación de selva en el área en estudio (241,720 ha); en tanto que, 2019 acumuló el máximo de superficie con 11 027.91 ha (4.56 %), seguidos por 2020 y 2016 con 5812.86 ha (2.40 %) y 5120.16 ha (2.12 %). El área quemada de mayor tamaño se registró en 2019 con 2203.14 ha (Tabla 2).

Áreas quemadas por tipos de vegetación de selva

En el periodo estudiado, la SMQ y sus variantes de vegetación arbórea (VSA/SMQ) y arbustiva (VSa/SMQ) acumularon un total de 23 958 ha quemadas. Esto representa el 82.19% de la superficie total quemada. Por otro lado, la Selva Baja Espinosa Subperennifolia (SBQ) y sus variantes de vegetación arbórea (VSA/SBQ) y arbustiva (VSa/SBQ) registraron 5193 ha quemadas, lo que equivale al 17.81% de la superficie total quemada (Tabla 3).

Análisis de quemas en áreas ejidales

Los mayores valores de áreas quemadas se encontraron para los ejidos de El Centenario (4907 ha) y El Lechugal (9409 ha). Por otro lado, el ejido Silvituc, con una extensión de 58 121.20 ha de selva, acumuló una escasa superficie de área quemada (522 ha). Esto se atribuye a que forma parte del Área Natural Protegida Balam-Kú, donde el uso del fuego está restringido.

Xbonil, que es una extensión del municipio de Calakmul, registró una superficie quemada de 974 ha, de un total de 1046 ha. Por otro lado, el ejido Hecelchakán, que también pertenece al mismo municipio, se encuentra en último lugar con 871

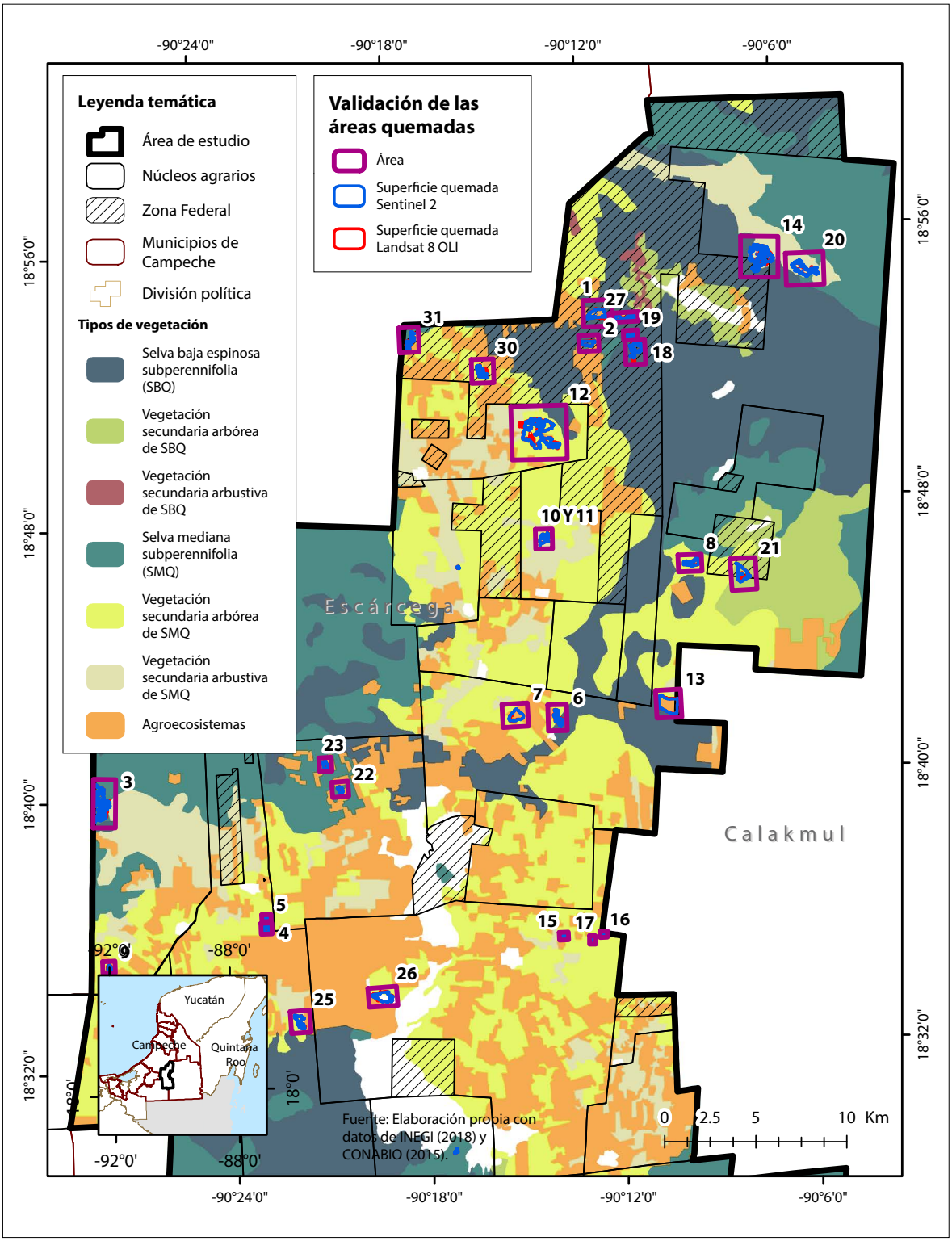

Figura 3. Ubicación espacial de las áreas quemadas sometidas a validación.

Tabla 1. Resultado de la validación de las áreas seleccionadas con la imagen Sentinel-2.

Área	Superficie ha (Landsat 8 OLI)	Superficie ha (Sentinel 2)	Superficie de intersección (ha)	Tipos de selva	Precisión	Error de omisión %	Error de comisión %	Índice Kappa
1	36.09	33.65	31.43	SBQ	96.94	7.22	12.94	88.03
2	15.55	14.69	14.61	SBQ	98.26	5.25	5.74	93.47
3	113.04	101.89	94.74	SMQ	91.73	10.5	16.16	80.61
4	8.70	8.79	7.88	VSA/SMQ	98.02	-1.16	9.43	94.3
5	4.05	3.60	3.46	VSA/SMQ	95.27	10.36	13.5	85.1
6	17.69	17.02	16.17	VSA/SBQ	98.47	4.04	8.64	92.74
7	30.78	31.16	29.97	VSA/SBQ	99.73	-1.22	2.69	99.06
8	18.27	18.84	17.08	VSA/SMQ	99.42	-3.26	6.67	97.71
9	5.27	4.38	3.62	VSA/SMQ	94.39	20.26	31.7	70.46
10	8.64	8.01	7.69	VSA/SMQ	98.49	7.13	10.58	90.29
11	8.47	8.63	8.22	VSa/SMQ	99.85	-1.61	3.29	99.01
12	153.96	144.54	132.77	VSA/SBQ	96.62	6.65	13.79	87.62
13	74.52	72.20	70.95	SMQ	97.22	3.14	4.77	93.9
14	91.34	101.99	84.33	VSa/SMQ	100.83	-14.52	7.63	102.76
15	3.66	3.08	2.67	VSA/SMQ	92.53	18.84	27.84	71.98
16	3.69	3.45	3.12	VSA/SMQ	94.67	7.42	15.68	84.82
17	2.62	2.12	2.03	VSA/SMQ	93.35	19.12	21.92	75.49
18	30.06	27.56	24.75	SBQ	94.77	9.31	17.77	83.03
19	4.32	4.01	3.13	SBQ	96.6	8.48	27.21	79.25
20	34.38	47.78	14.33	VSa/SMQ	103.41	-68.2	4.07	123.88
21	32.09	36.57	11.98	VSA/SMQ	101.62	-16.63	2.34	107.23
22	7.64	7.90	7.60	VSA/SMQ	100.41	-4.11	0	102.24
23	5.95	7.96	5.70	VSA/SMQ	103.77	-56.59	3.39	121.45
24	49.21	36.33	35.29	VSA/SMQ	92.14	26.72	28.27	67.91
25	17.41	17.80	17.00	VSA/SMQ	100	-2.41	2.3	100
26	41.35	37.53	37.21	VSA/SMQ	94.03	9.42	10.12	85.93
27	16.38	16.43	14.21	SBQ	97.3	0	13.35	91.19
28	2.61	2.59	2.32	SMQ	98.57	0.43	10.77	93.31
29	13.95	12.32	11.12	VSA/SMQ	81.43	13.13	20.57	62.64
30	18.72	15.66	14.32	VSA/SMQ	80.17	17.51	23.42	60.34
31	15.41	12.75	12.00	VSA/SMQ	83.22	18.09	22.08	65.49
Total	885.80	861.22	741.71	Promedio	95.91	1.72	12.86	88.75

ha quemadas. En 2019, la mayoría de los ejidos alcanzaron el máximo de área quemada de todo el periodo en estudio (Tabla 4), lo que indica que la superficie quemada ha ido aumentando en los últimos años. Es importante mencionar que, dentro del área de estudio, se encuentra una superficie considerada como Zona Federal. Esta ha experimentado un incremento del área quemada en los últimos

Tabla 2. Distribución anual de las áreas quemadas en la región oriental del municipio de Escárcega, Campeche.

Año	Polígonos de áreas quemadas	Superficie quemada total (ha)	Promedio de áreas quemadas (ha)	Máxima superficie quemada (ha)	Mínima superficie quemada (ha)	% Relativo a la vegetación de selva
2013	137	1860.20	10.28	310.27	2.07	0.77
2014	187	1191.70	4.97	104.4	2.04	0.49
2015	146	926.75	4.98	117.28	2.05	0.38
2016	316	5120.16	12.74	987.92	2.00	2.12
2017	228	1835.13	6.7	104.21	2.01	0.76
2018	281	1377.11	3.98	86.74	2.01	0.57
2019	405	11 027.91	18.98	2203.14	2.02	4.56
2020	482	5812.86	9.29	312.25	2.01	2.40
Total	2,182	29 151.82	10.28	2203.14	2	12.06

Tabla 3. Distribución área quemada total por tipo de vegetación.

Tipo de vegetación	Superficie (ha)	Área quemada (ha)	Proporción de v vegetación quemada (%)
Selva mediana subperennifolia (SMQ)	99 220	10 924	11
Selva baja espinosa subperennifolia (SBQ)	81 877	4280	5
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (VSA/SMQ)	39 809	6935	17
Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia (VSA/SBQ)	5511	882	16
Vegetación secundaria arbustiva de selva de selva mediana subperennifolia (VSa/SMQ)	14 868	6099	41
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa subperennifolia (VSa/SBQ)	435	31	7
Total	241 720	29 151	

años. Una verificación en campo permitió constatar que esta es un área quemada frecuentemente para el establecimiento de asentamientos humanos.

En general, parece que hay una tendencia de aumento en los incendios en 2019 y 2020 en todos los ejidos, independientemente de la población o la superficie de selva. Esto podría sugerir que otros factores, como cambios en las políticas de manejo del fuego o condiciones climáticas, podrían estar influyendo en esta tendencia.

La Figura 4 muestra la distribución de las áreas quemadas por año, así como el número de años que un ejido ha experimentado un incendio durante el periodo de estudio. Se evidencia ejidos afectados por incendios de manera recurrente, así como pequeñas regiones que no ha habido incendios o que han sido poco frecuentes. Los intervalos de incendios varían entre dos y ocho años (Figura 4). De acuerdo con el análisis, los ejidos ubicados en la región norte y en la Zona Federal mostraron una incidencia constante de incendios a lo largo del periodo estudiado.

Análisis de las variables meteorológicas asociadas a los incendios

El análisis anual de la temperatura máxima promedio y el área quemada (Figura 5), revela que los años con mayor superficie quemada en la selva

Tabla 4 Distribución de las áreas quemadas por ejido.

Municipio	Ejido	Población	Superficie del ejido (ha)	Superficie de selva (ha)	Año (ha)							
					2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Calakmul	Constitución	1386	1947	1923	0	0	3	4	8	5	5	48
	Xbonil	587	4648	4622	0	0	0	0	2	2	786	184
Total					0	0	3	4	10	7	791	231
Escárcega	Chan Laguna	582	3323	1057	0	2	0	0	0	0	0	2
	El Centenario	1038	35 148	32 067	117	57	99	276	363	575	2034	1386
	El Lechugal	635	27 690	25 814	1411	773	181	2256	282	75	3392	1039
	Flor De Chiapas	357	2619	2312	0	0	5	56	12	18	310	84
	Haro	1231	8197	8054	0	0	3	10	26	15	0	0
	El Jobal	189	501	128	0	0	0	0	0	0	0	0
	La Libertad	469	7520	12 065	0	0	8	202	7	2	12	179
	Laguna Grande	998	3900	3020	24	21	98	110	339	77	639	143
	Lic. Benito Juárez	304	3460	2931	27	7	19	4	48	21	195	216
	Lic. José López Portillo	363	2733	1823	8	0	7	0	6	160	101	115
	Luna	884	17 109	17 012	0	0	0	74	31	75	58	13
	N.C.P.A. Justicia Social	775	11 558	8998	6	10	36	384	259	44	461	293
	N.C.P.E. Altamira De Zinaparo	1,167	18 359	8113	0	4	21	284	11	62	204	222
	N.C.P.E. Lic. Adolfo López Mateos	371	8,03	4569	8	28	34	475	166	53	440	432
	N.C.P.E. Zona Chiclera Las Maravillas	79	3326	1879	0	0	0	82	3	77	22	226
	Silvituc	985	58 121	56 294	8	2	72	141	12	25	190	72
Total					1610	905	582	4,54	1565	1278	8059	4422
Hecelchakán	Hecelchakán	9974	34 244	32 320	0	0	5	334	2	4	64	462
Total					0	0	5	334	2	4	64	462
Sin categoría (Zona Federal)	Sin categoría (Zona Federal)		27 532	23 601	250	286	337	428	258	88	2114	698
Total					250	286	337	428	258	88	2114	698
Total general					1860	1192	927	5120	1835	1377	11 028	5,13

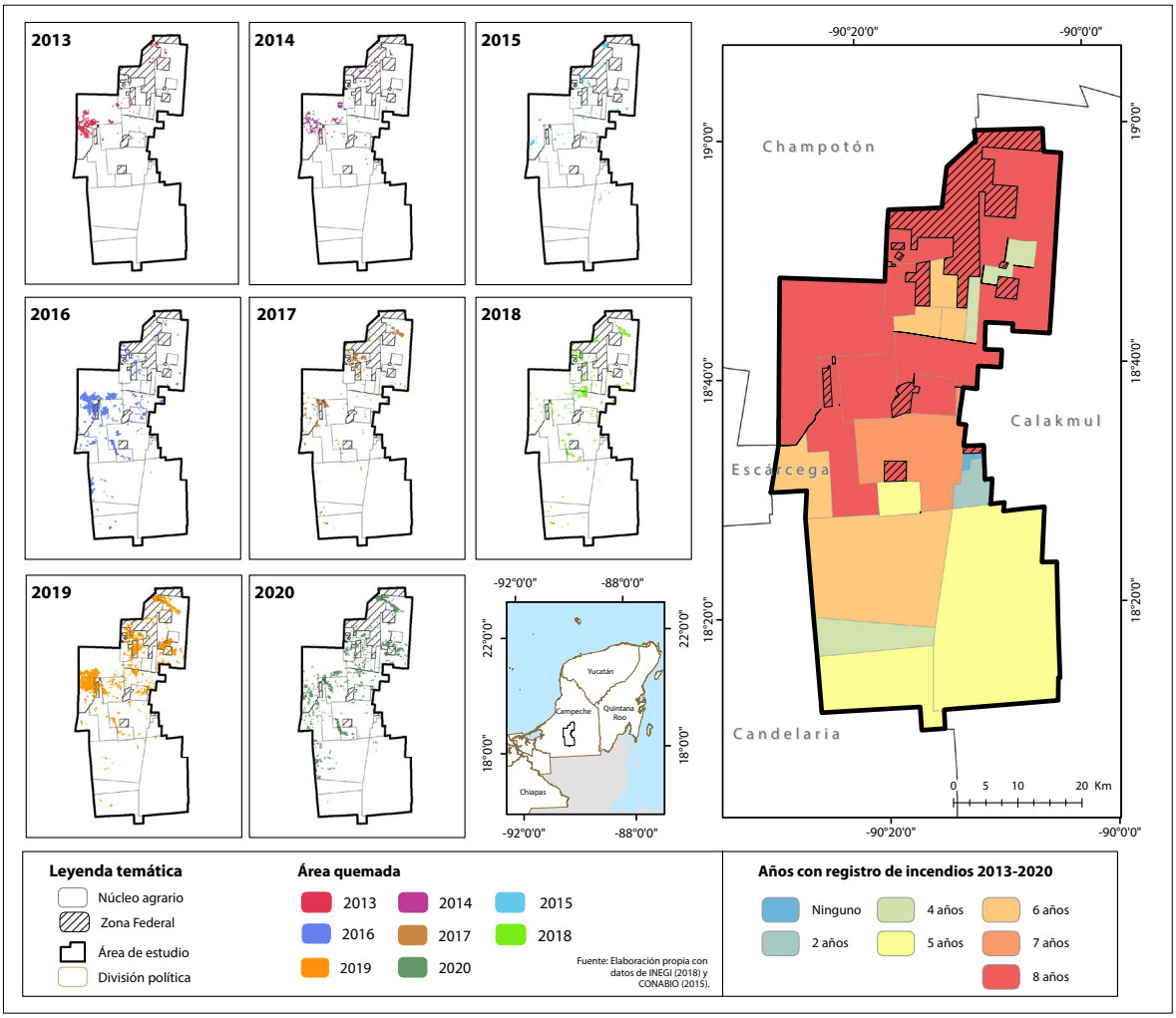

Figura 4. Registros de incendios.

corresponden a 2016, 2019 y 2020. Estos años coinciden con un aumento en la temperatura máxima promedio (SMN, 2021).

Además, se observó una reducción en la precipitación acumulada durante los años 2016 y 2019, como se muestra en la Figura 6. Esta disminución en la lluvia podría estar relacionada con fenómenos como el ENOS fuerte (2015-2016) y débil (2018-2019) y la sequía, lo cual aumenta la probabilidad de incendios, como señalan Manzo-Delgado y López-García (2020). El monitor de sequía en México indica que el municipio de Escárcega experimentó su mayor sequía de enero a mayo, particularmente en los años 2015, 2016 y 2019, cuando las categorías de sequía fluctuaron entre anormalmente seca y sequía moderada (SMN, 2021). Los años de mayor sequía estuvieron influenciados por el ENOS fuerte y débil (Golden Gate Weather Services, 2024; NOAA, 2020). Además, en el periodo en estudio se reportaron para el Golfo de México y el Mar del Caribe diez huracanes entre los que destacan por su proximidad Barry (2013), Hanna (2014) y Cristóbal (2020) (NOAA, 2021). Estos fenómenos pudieron haber contribuido al incremento del material combustible seco debido al derribo de árboles, ramas y hojas.

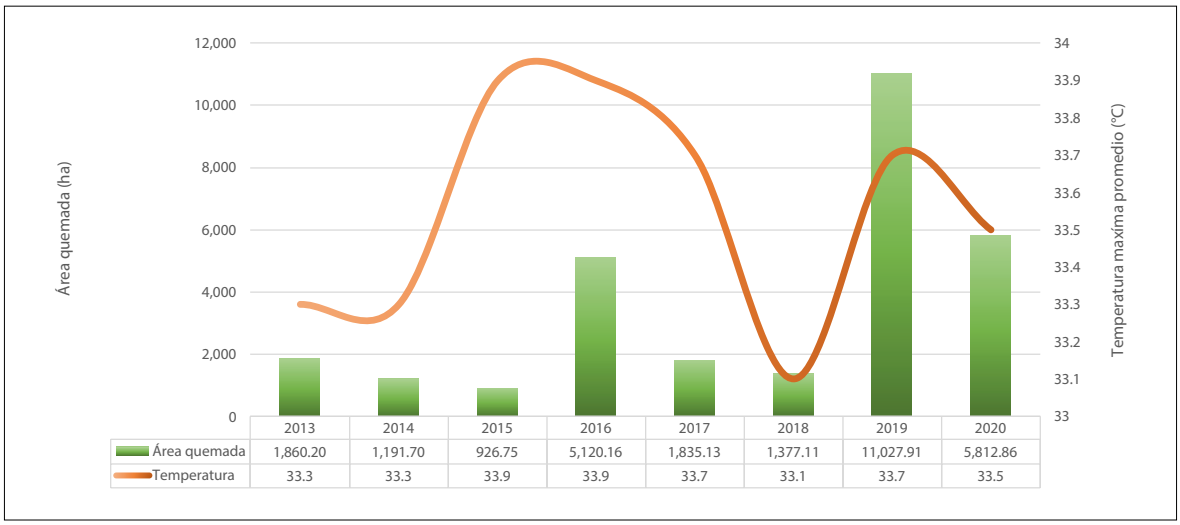

Figura 5. Relación entre área quemada y temperatura máxima promedio anual del periodo 2013-2020.

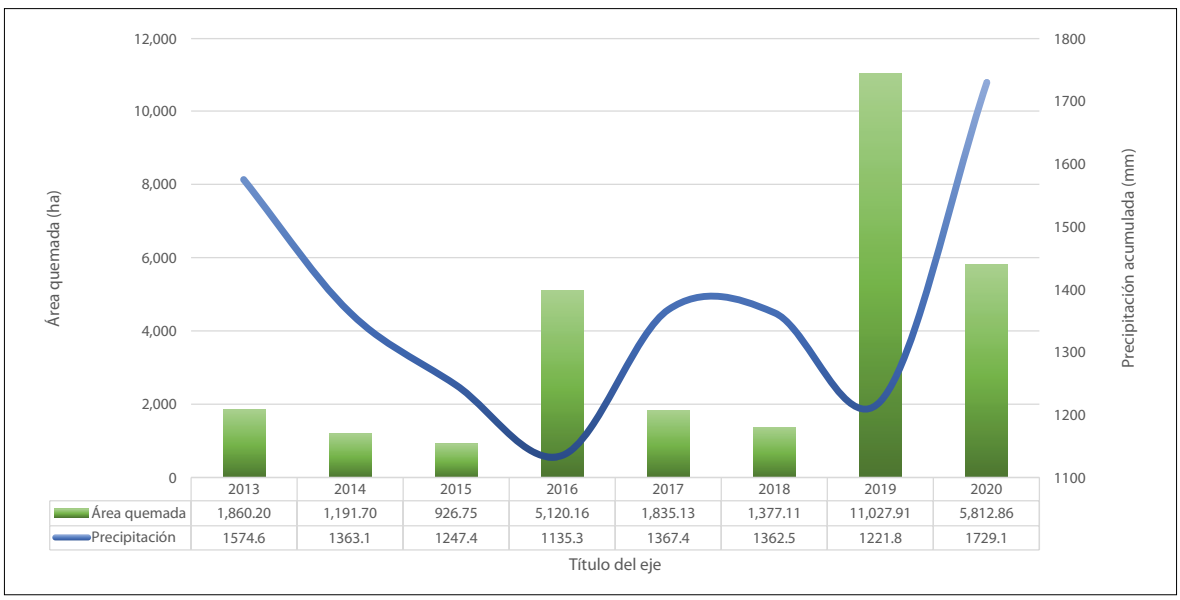

Figura 6. Relación entre área quemada y precipitación acumulada anual del periodo 2013-2020.

Causas locales que influyen en la distribución de incendios

Las entrevistas, revelan que la causa principal de incendios se atribuye a la cacería furtiva (38%), las quemas agropecuarias (38%), y en menor medida al cambio de uso de suelo (24%) (Figura 7). Los actores que mencionaron la cacería furtiva indicaron que esta práctica se realiza principalmente por motivos de subsistencia (77%) y para la comercialización entre los mismos miembros de los ejidos (33%).

En el caso de las quemas agropecuarias, el origen del fuego puede ser tanto por parte de los mismos ejidatarios (41%) como por ejidos vecinos (59%).

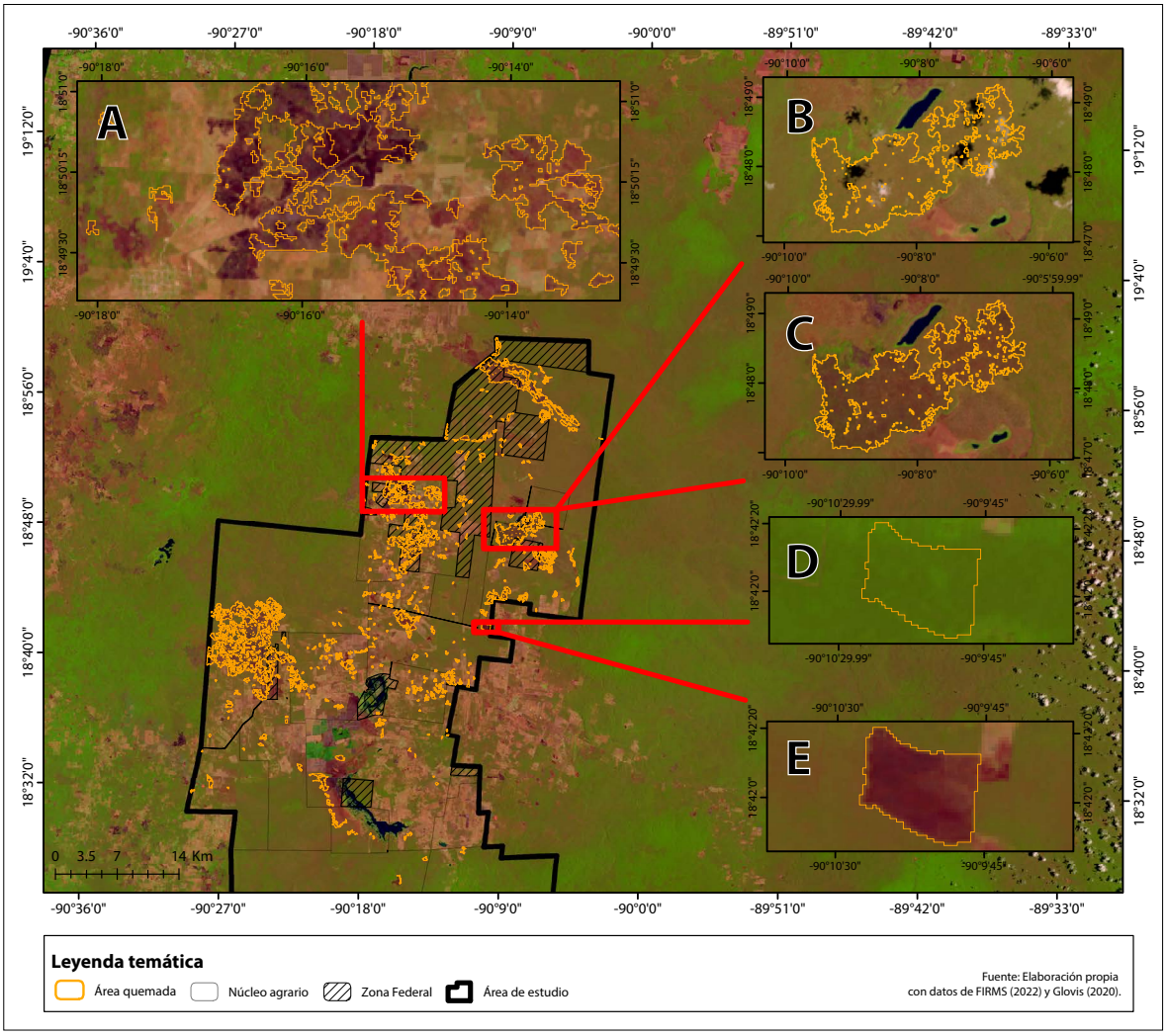

Figura 7. Clasificación de incendios ubicados en 2019: (A) quemas en selva vinculadas a terrenos agropecuarios; (B y C) incendios derivados de cacería furtiva y (D y E) incendios destinados al cambio de uso de suelo.

Esto se debe principalmente a la falta de respeto al calendario de quemas del estado y la ausencia de participación en las jornadas de concientización.

Además de estas actividades, algunas personas queman la selva de la Zona Federal, con el objetivo de apropiarse de nuevas áreas de aprovechamiento. Ello fue reportado por el 24% de los entrevistados. Durante las entrevistas realizadas en 2022 y 2023, los habitantes percibieron una disminución significativa de los incendios (90%), la cual atribuyen al programa 'Sembrando Vida'. No obstante, mencionaron que en 2019 se provocaron incendios para la incorporación de parcelas a este programa, siendo este el año en que se quemó la mayor superficie de selva. La tendencia decreciente de los incendios en 2020 puede atribuirse a que las personas que participan en el programa ya no están autorizadas a utilizar el fuego.

DISCUSIÓN

El uso de los índices BAI y NBR ha demostrado ser eficiente en la delimitación de las superficies

quemadas, tal como mencionaron Manzo-Delgado y López-García, (2020), especialmente para las regiones tropicales. Los puntos de calor obtenidos de FIRMS han proporcionado un apoyo significativo para la detección y validación de las áreas quemadas. Esto ha permitido confirmar que son una alternativa confiable para conocer la distribución espacial y temporal de los incendios en la región oriental de Escárcega, Campeche.

Basándonos en los resultados de validación de las imágenes Sentinel-2, su confiabilidad es aceptable, similar a lo reportado por Anaya y Chuvieco, (2012), con un valor Kappa promedio de 88.75%, un error de omisión de 1.67% y un error de comisión de 12.86%. Los errores de omisión se atribuyen al desfase de 10 días entre la adquisición de las imágenes Sentinel-2 y Landsat 8 OLI.

El análisis de los incendios revela un incremento en las áreas quemadas, pasando de 926.75 hectáreas en 2013 a 11 027.91 hectáreas en 2019. La tendencia ascendente de la superficie quemada en las selvas del sureste del México, según Manzo-Delgado y López-García, 2020 y Pagan *et al*. (2021), tiene un origen multifactorial donde se combina la presencia de fenómenos meteorológicos, el uso del fuego por parte de los agricultores y la falta de atención de las dependencias gubernamentales.

En relación con la distribución por tipos de vegetación, la mayoría de las áreas quemadas están en la selva mediana subperennifolia (SMQ) y sus variantes arbóreas (VSA/SMQ) y arbustivas (VSa/SMQ), representando el 82.19% de la superficie total afectada y la que predomina en la mayoría en los ejidos. Esto sugiere que las selvas han estado sometidas a constantes presiones antrópicas relacionadas con el uso tradicional del fuego sin precaución, lo cual ha generado incendios, como lo menciona Pagan *et al.* (2021). Asimismo, se confirma que las áreas con vegetación secundaria son más propensas a registrar incendios por la presencia de herbáceas y la acumulación de biomasa tras la perturbación, su proximidad a áreas agrícolas o cambio de uso de suelo forestal destinadas a actividades agropecuarias de acuerdo con lo reportado por Zamora-Crescencio *et al.* (2017).

Los ejidos El Lechugal y El Centenario, con extensas áreas de selva (25,814 ha y 32,067 ha) y terrenos agropecuarios (1876 ha y 3081 ha), registraron la mayor cantidad de área quemada durante el período de estudio. Esta situación podría indicar: intensa actividad agropecuaria dependiente del uso del fuego con técnicas deficientes para evitar que se propague a la selva, incumplimiento o desconocimiento de la NOM-015 y posible relación con prácticas de cacería furtiva de acuerdo con Pérez Rodríguez *et al.* (2018). En contraste, el ejido Silvituc, y su estatus como área natural protegida, que restringe el uso del fuego en la parte sur del área en estudio. Esto subraya la importancia de la supervisión, como se ilustra en el análisis de la distribución de áreas quemadas por ejidos. Se observa que algunos ejidos han experimentado incendios a lo largo de todo el período de estudio, mientras que otros han sido afectados cuatro veces, dos veces o ninguna. La información presentada resulta crucial, ya que sirve como un indicador valioso para evaluar la incidencia de incendios en los ejidos. Esta evaluación permite identificar aquellos ejidos que demandan una mayor atención en términos de prevención y combate de incendios en la selva (Rodríguez Trejo, 2014). Además, parece que hay una tendencia de aumento en los incendios en 2019 y 2020 en todos los ejidos, independientemente de la población o la superficie de selva. Esto podría sugerir que otros factores, como cambios en las políticas de manejo del fuego o condiciones climáticas, podrían estar influyendo en esta tendencia (Pagan *et al.*, 2021).

Los años 2016, 2019 y 2020, que registraron la mayor superficie de área quemada, coincidieron con las temperaturas más elevadas y la menor cantidad de precipitaciones del período estudiado. Estos años también se caracterizaron por la presencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), conocido por su impacto en el aumento de la temperatura y disminución de las precipitaciones, que pudieron haber favorecido la propagación de los incendios de acuerdo con Manzo-Delgado y López-García, (2020). El aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones, propiciaron una reducción de la humedad del suelo, creando un entorno susceptible para la propagación de incendios de acuerdo con Withey *et al*. (2018).

En este contexto, el municipio de Escárcega experimentó su peor sequía de enero a mayo durante los años 2015, 2016 y 2019 (SMN, 2021). Estas condiciones climáticas extremas aumentaron la vulnerabilidad de la región a los incendios forestales, evidenciando que un aumento en la temperatura y una disminución en las precipitaciones pueden intensificar los incendios (González *et al*., 2011; Pazmiño, 2019). Sin embargo, Monzón Alvarado, (2018) estableció en su investigación que no existe una correlación evidente entre la precipitación acumulada y la frecuencia de incendios, lo que contradice la suposición común de que los años más secos conllevan una mayor ocurrencia de incendios.

Esto nos lleva a considerar otros factores que pueden influir en la frecuencia y la intensidad de los incendios. Es importante considerar que la actividad humana, en particular las prácticas agropecuarias, puede variar significativamente de un año a otro. Factores como las políticas agrícolas, culturales y las condiciones económicas pueden influir en estas variaciones. Esto se evidencia en el hecho de que, aunque el año 2015 fue un año seco, registró la menor superficie de área quemada (926 ha), porque muy probablemente hubo un menor uso del fuego y menos quemas agropecuarias. En contraste, el año 2019 también fue un año seco, con condiciones meteorológicas similares a 2015; sin embargo, presentó la mayor área quemada, asociadas al notable incremento del uso del fuego agrícola documentado por Pagan *et al*. (2021).

Además, en el año 2016, a pesar de que la temperatura alcanzó su punto máximo y la precipitación registró su mínimo durante el período estudiado, la superficie afectada por el fuego no fue tan alta como en 2019. Esto subraya la idea de que las condiciones climáticas por sí solas no pueden proporcionar una predicción precisa de la frecuencia y la intensidad de los incendios. Resulta crucial reconocer la interacción compleja entre las condiciones climáticas y las actividades humanas al intentar comprender y prevenir los incendios (Monzón Alvarado, 2018; Pagan *et al*., 2021).

En este sentido, el programa gubernamental 'Sembrando Vida' inicialmente incentivó el uso del fuego para limpiar terrenos con vegetación, sin cumplimiento de la NOM-015, lo que causó escapes de incendios en los años 2019 y 2020, en condiciones meteorológicas que favorecieron el inicio y propagación de incendios en la selva (Pagan *et al*., 2021). Por lo tanto, se podría concluir que la actividad humana en esos años influyó en el incremento del área quemada de la selva.

Las entrevistas realizadas revelaron que la caza furtiva (Pérez Rodríguez *et al*., 2018), las quemas agropecuarias y el cambio de uso de suelo son las principales causas de los incendios en la selva. Estos factores, junto con el aumento de la temperatura y los periodos prolongados de sequía por el ENOS, contribuyen al incremento de áreas quemadas (Manzo-Delgado *et al*., 2009). La falta de conocimiento, participación y cumplimiento de las normativas resalta la necesidad imperante de fortalecer la difusión y el acatamiento de regulaciones para prevenir incendios forestales, particularmente bajo condiciones meteorológicas adversas de temperatura y precipitación que generan cambios en el comportamiento y régimen del fuego (Monzón Alvarado, 2018). La interacción entre acciones humanas y variables meteorológicas influye en la frecuencia de los incendios, donde un manejo inapropiado del fuego puede derivar en quemas descontroladas y las condiciones climáticas pueden favorecer su propagación.

CONCLUSIONES

Podemos concluir que se ha cumplido el objetivo de esta investigación. Los índices BAI y NBR han probado ser herramientas eficaces para analizar la distribución de las áreas quemadas en las selvas de la región oriental de Escárcega, en el estado de Campeche, durante el período 2013-2020. Factores climáticos, como la temperatura y la precipitación, han sido esenciales para entender la variabilidad en el área quemada. Los años con un aumento de temperatura y una disminución de la precipitación han coincidido con un incremento en las áreas afectadas por el fuego.

Además, los períodos marcados de ENOS, que generan eventos de sequía, también han tenido un impacto en la propagación de incendios. Esto,

junto con las actividades humanas, como el uso del fuego para la limpieza de terrenos agropecuarios, el cambio de uso de suelo o la cacería furtiva, ha facilitado la propagación de incendios.

Esta compleja relación subraya la importancia de implementar estrategias de prevención de incendios que aborden tanto las acciones humanas como las condiciones climáticas. Estas estrategias deben permitir la flexibilidad necesaria para adaptarse a los cambios en los regímenes de fuego de las selvas debido al cambio climático. Este conocimiento sienta las bases para desarrollar estrategias efectivas de prevención y adaptación del uso del fuego en los ejidos de la región, especialmente en aquellos que requieran una mayor atención.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores de este trabajo declaran que no tienen ningún conflicto de interés con respecto la temática y los resultados de este trabajo.

REFERENCIAS

Alonso Velasco, I. y Velázquez Torres, D. (2019). El contexto geopolítico de la explotación forestal en la Península de Yucatán, México. *Perspectiva Geográfica*. https://doi.org/10.19053/01233769.8427

Anaya, J. A. y Chuvieco, E. (2012). Accuracy Assessment of Burned Area Products in the Orinoco Basin. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *78*(1), 53-60. https://gofcgold.umd.edu/sites/default/files/2020-01/anaya_chuvieco_pers_2012.pdf

Arellano, S., Vega, J. A., Rodríguez Y Silva, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J. G. y Ruiz-González, A. D. (2017). Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de Teledeteccion*, *2017*(49 Special Issue), 49-61. https://doi.org/10.4995/raet.2017.7137

Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J. y Martínez-Meyer, E. (2014). *Precipitación anual en México (1910-2009)*. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/preanu13gw.html

Estrada, A. y Coates-Estrada, R. (2003). *Las selvas tropicales húmedas de México. Recurso poderoso, pero vulnerable*. La ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica. https://fce.com.co/producto/las-selvas-tropicales-humedas-de-mexico-recurso-poderoso-pero-vulnerable/

FIRMS. (2022). *Fire Information for Resource Management System (FIRMS)*. FIRMS is part of NASA's Land, Atmosphere Near real-time Capability for EOS. https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/

Flores-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P. y Mena-Munguía, S. (2021). Comparative analysis of spectral indices to locate and size levels of severity of forest fires. *Investigaciones Geograficas*, *106*. https://doi.org/10.14350/rig.60396

García, E. y CONABIO. (2001). *Climas, (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.* Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/

Golden Gate Weather Services. (2024). *El Niño and La Niña Years and Intensities Based on Oceanic Niño Index (ONI)*. https://ggweather.com/enso/oni.htm

González, M. E., Lara, A., Urrutia, R. y Bosnich, J. (2011). Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42°s). *Bosque*, *32*(3), 215–219. https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000300002

Hammer, D. y Wildavsky, A. (1990). La entrevista semi-estructurada de final abierto. Aproximación a una guía operativa. *Historia, antropologíaa y fuentes orales*, 23-61. https://www.jstor.org/stable/27753290

INEGI. (2001). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575

INEGI. (2010). *Red Hidrografica Escala 1:50,000 Edición 2.0*. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.

INEGI. (2018). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781

INIFAP y CONABIO. (2008). *Edafología*. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/eda251mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no

IUSS Working Group WRB. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos*. https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Llibre59.pdf

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013). Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS. *GeoFocus*, *2*(13), 66-83. https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/288

Manzo-Delgado, L. L. y López-García, J. (2020). Spatial and temporal analyses of burned areas 1998, 2003 and 2015 in montes azules biosphere reserve, Chiapas, Mexico. *Bosque*, *41*(1), 11–24. https://doi.org/10.4067/S0717-92002020000100011

Manzo-Delgado, L., Sánchez-Colón, S. y Álvarez, R. (2009). Assessment of seasonal forest fire risk using NOAA-AVHRR: a case study in central Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, *30*(19), 4991–5013. https://doi.org/10.1080/01431160902852796

Moghli, A., Santana, V. M., Jaime Baeza, M., Pastor, E. y Soliveres, S. (2021). Fire Recurrence and Time Since Last Fire Interact to Determine the Supply of Multiple Ecosystem Services by Mediterranean Forests. *Ecosystems*. https://doi.org/10.1007/s10021-021-0072

Monzón Alvarado, C. (2018). El manejo del fuego en Calakmul, Campeche: incendios forestales, gobernanza y variabilidad local de la precipitación. *CIENCIA ergo sum*, *25*(3), e23.1-e23.15. https://doi.org/10.30878/ces.v25n3a1

NOAA. (2020). *El Niño / Southern Oscillation (ENSO)*. Climate Predicction Center, National Weaher Service (NOAA). https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history

NOAA. (2021). *Central Pacific Hurricane Center (CPHC)*. US Dept of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration, Central Pacific Hurricane Center. https://www.nhc.noaa.gov/

Orantes-García, C., Ángel Pérez-Farrera, M., Rioja-Paradela, T. M. y Garrido-Ramírez, E. R. (2013). Viabilidad y germinación de semillas de tres especies arbóreas nativas de la selva tropical, Chiapas, México. *Polibotánica*, *36*, 117-127. https://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n36/n36a8.pdf

Pagan, A., Rogan, J., Schmook, B., Christman, Z. y Sangermano, F. (2021). Understanding agricultural fire dynamics in the southern Yucatán Peninsular Region using the MODIS (C6) active fire product. *Remote Sensing Letters*, *12*(7), 715-726. https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1931530

Pazmiño, D. (2019). Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, *1*(1), 10-18. https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1800

Pérez, C. C., Olthoff, A. E., Hernández-Trejo, H. y Rullán-Silva, C. D. (2022). Evaluating the best spectral indices for burned areas in the tropical Pantanos de Centla Biosphere Reserve, Southeastern Mexico. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *25*. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100664

Pérez Rodríguez, J. C., Guízar Vázquez, F. y Bello Baltazar, E. (2018). Conflicto territorial, ecoturismo y cacería no regulada: el traslape de territorialidades en el Área Natural Protegida de Balam-Kú. *Pasos. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, *16*(4), 909-925. https://doi.org/10.25145/j.pasos.2018.16.064

Rodríguez Trejo, D. A. (2014). *Incendios de vegetación. Su Ecología, Manejo e Historia* (Vol. 1). Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo, Semarnat, Programa de Prevención y Combate de Incendios Forestales, Conafor, Conanp, Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl, ANCF, AMPF.

Rodríguez Trejo, D. A., Muñoz, P. M. y Lara, P. J. M. (2019). Fire effects on the trees of a tropical pine forest and a tropical dry forest at villaflores, Chiapas, Mexico. *Ciencia Florestal*, *29*(3), 1033-1047. https://doi.org/10.5902/1980509833952

Rodríguez-Trejo, D. A., Martínez-Muñoz, P., Pulido-Luna, J. A., Martínez-Lara, P. J. y Cruz-López, J. D. (2019). *Instructivo de quemas prescritas para el manejo integral del fuego en el municipio de Villaflores y la Reserva de la Biosfera la Sepultura, Chiapas, México*. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, USDA FS, US AIDE, BIOMASA, A, C., Universidad Autónoma Chapingo, Ayuntamiento de Villaflores, SEMARNAT, CONAFOR, CONANP, Gobierno del Estado de Chiapas, ANCF. http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/Instructivo_de_quemas.pdf

Rodríguez-Trejo, D. A., Tchikoué, H., Cíntora-González, C., Contreras-Aguado, R. y Rosa-Vázquez Alfonso de la. (2011). Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia*, *45*, 593-608. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000500006&nrm=iso

Román-Cuesta, R. M. y Martínez-Vilalta, J. (2006). Effectiveness of protected areas in mitigating fire within their boundaries: Case study of Chiapas, Mexico. *Conservation Biology*, *20*(4), 1074-1086. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00478.x

SMN. (2020). *Resúmenes mensuales de temperatura y lluvia*. Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). https://smn.

conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias

SMN. (2021). *Archivos shapefiles del Monitor de Sequía en México (MSM) generados en el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN)*. Monitor de sequía de México. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico

Valdez-Zavala, K. M., Bravo-Peña, L. C. y Manzo-Delgado, L. L. (2019). Áreas quemadas y cambio de uso del suelo en el suroeste de Chihuahua (México) durante el periodo 2013-2017: Identificación con el índice Normalized Burn Ratio (NBR). *Acta Universitaria*, *29*, 1-15. https://doi.org/http://doi.org/10.15174.au.2019.2418

Withey, K., Berenguer, E., Palmeira, A. F., Espírito-Santo, F. D. B., Lennox, G. D., Silva, C. V. J., Aragão, L. E. O. C., Ferreira, J., França, F., Malhi, Y., Rossi, L. C. y Barlow, J. (2018). Quantifying immediate carbon emissions from El Niño-mediated wildfires in humid tropical forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *373*(1760). https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0312

Wu, B., Zheng, H., Xu, Z., Wu, Z. y Zhao, Y. (2022). Forest Burned Area Detection Using a Novel Spectral Index Based on Multi-Objective Optimization. *Forests*, *13*(11). https://doi.org/10.3390/f13111787

Zamora-Crescencio, P., Rico-Gray, V. y Carlos Barrientos-Medina, R. (2017). Estructura y composición florística de la selva mediana subperennifolia en Bethania, Campeche, México. *Polibotánica*, *43*, 67-86. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62150424003