

Historical fire frequency (1779-2013) in pine-oak forests in the community of Charcos, Mezquital, Durango

Frecuencia histórica de incendios (1779-2013) en bosques de pino-encino de la comunidad de Charcos, Mezquital, Durango

Iván M. Molina-Pérez¹; Julián Cerano-Paredes^{2*}; Sergio Rosales-Mata³; José Villanueva-Díaz²; Rosalinda Cervantes-Martínez²; Gerardo Esquivel-Arriaga²; Eladio Cornejo-Oviedo⁴.

¹Instituto Tecnológico de El Salto, Mesa del Tecnológico s/n, Forestal. C. P. 34942. El Salto, Durango, México.

²INIFAP CENID-RASPA. km 6.5 Margen derecha del canal Sacramento. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango. cerano.julian@inifap.gob.mx Tel.: 52+ (871) 159 01 04 (*Corresponding author).

³INIFAP, Campo Experimental Valle del Guadiana. km 4.5 Carretera Durango-Mezquital. C. P. 34170. Durango, Durango.

⁴Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro núm. 1923. C. P. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Abstract

Historical fire regimes were reconstructed using dendrochronological methods to provide basic information for understanding this phenomenon. In order to reconstruct the fire history in a pine-oak forest in Mezquital, Durango, we collected 78 samples from different fire-scarred tree species (*Pinus durangensis*, *P. arizonica*, *P. ayacahuite*, *P. teocote* and *Pseudotsuga menziesii*); 73 and 27 % of the samples were taken from live and dead trees, respectively. By applying dendrochronological methods a total of 75 samples (96 %) and 535 fire scars were dated. Fire regimes were reconstructed from 1746 to 2013, with 1779 being the year of the first recorded fire. A mean fire interval (MFI) of 2.0 years and a Weibull median probability interval (WMPI) of 1.8 years (all scars) were reconstructed. Considering 25 % of scars or more (large fires), a MFI and a WMPI of 7.0 and 5.9 years, respectively, were determined. In total, 92.2 % of fires were categorized as having occurred in the spring and only 7.8 % in the summer. There was no significant ($P < 0.05$) influence of rainfall and the El Niño Southern Oscillation (ENSO) on fire frequency; however, extensive fires were positively associated with decreased rainfall and ENSO events (La Niña phase).

Keywords:

Dendroprochronology, fire regimes, precipitation, El Niño Southern Oscillation.

Resumen

La reconstrucción histórica de los regímenes del fuego, fundamentada en métodos dendrocronológicos, aporta información para el entendimiento de este fenómeno. Con el objetivo de reconstruir la historia de incendios en un bosque de pino-encino en Mezquital, Durango, se colectaron 78 muestras de *Pinus durangensis*, *P. arizonica*, *P. ayacahuite*, *P. teocote* y *Pseudotsuga menziesii* con cicatrices de incendios; 73 y 27 % de las muestras se tomaron de árboles vivos y muertos, respectivamente. Se fecharon 75 muestras (96 %) y 535 cicatrices. Los regímenes se reconstruyeron de 1746 a 2013; el año 1779 representó el primer registro de incendio. Se reconstruyó un intervalo medio de frecuencia de incendios (MFI) de 2.0 años y un intervalo medio de probabilidad de Weibull (WMPI) de 1.8 años, cuando todas las cicatrices fueron incluidas; al considerar 25 % o más (incendios extensos) se determinaron MFI y WMPI de 7.0 y 5.9 años, respectivamente. En primavera se categorizó 92.2 % de los incendios y solo 7.8 % en el verano. No hubo influencia significativa ($P < 0.05$) de la lluvia y de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en la frecuencia; sin embargo, los incendios extensos se asociaron positivamente a la disminución de lluvia y eventos ENSO (fase La Niña).

Palabras clave:

Dendroprocronología, régimen de incendios, precipitación, El Niño Oscilación del Sur.

Introduction

Fires are one of the most important disturbance factors with ecological, economic, social and political impacts on forest ecosystems (Pyne, Andrews, & Laven, 1996); however, fire is found naturally in many ecosystems and the presence of this element is essential for most of them (González, Schwendenmann, Jiménez, & Himmelsbach, 2007).

Fires play an important role in forest ecosystems, as they contribute to the mineralization of organic matter, participate in various nutrient cycles and can promote tree growth when the fire is of low intensity, thanks to the natural pruning that it propitiates (Rodríguez, 2006). Among the negative impacts are the destruction of the ecosystem and the migration of fauna, causing the people who depend on this resource to be economically affected (Lloret, 2004).

Climate change has changed the behavior of forest fires by altering ecosystems. In several regions of the planet, fires of greater area, duration, intensity and severity have been observed, caused by a greater accumulation of combustible loads, higher temperatures with lower relative humidity and longer droughts (Rodríguez, 2012). Climate variability is significantly modulated by ENSO (El Niño Southern Oscillation) globally (Stahle et al., 1998) and regionally (Cerano, Villanueva, Valdez, Arreola, & Constante, 2011), as in the case of northern Mexico. ENSO in its warm phase, El Niño, favors humidity conditions in the north of Mexico and drought in the center (Fulé, Villanueva-Díaz, & Ramos-Gómez, 2005; Heyerdahl & Alvarado, 2003), and vice versa, the cold phase, La Niña, is associated with drought conditions in the north and humidity in the center (Magaña, Vázquez, Pérez, & Pérez, 2003). Some fire reconstruction studies for northern Mexico report significant influence of ENSO in its cold phase (La Niña) on historical fire frequency (Cerano, Villanueva, & Fulé, 2010; Fulé et al., 2005; Heyerdahl & Alvarado, 2003).

Each region, ejidal community or forest area presents different ecological conditions; therefore, it is impossible to generalize the ecological principles of fire management. In this sense, it is important to delimit each unit of study, due to existent variability in climatic terms (temperature, precipitation and relative humidity), topography and physiography (exposure and slope), and vegetation (Whelan, 1995). Knowledge of forest fire regimes by region and forest type is essential, as it provides technical elements for developing more efficient fire prevention and management programs. For this reason, this study has a three-fold objective: 1) reconstruct historical fire regimes in the pine-oak forests of the community of Charcos, Mezquital, Durango, 2) determine the seasonal timing of fires

Introducción

Los incendios son uno de los factores más importantes de perturbación con impactos ecológicos, económicos, sociales y políticos en los ecosistemas forestales (Pyne, Andrews, & Laven, 1996); sin embargo, el fuego se encuentra de manera natural en muchos ecosistemas y la presencia de dicho elemento es clave para la mayoría de éstos (González, Schwendenmann, Jiménez, & Himmelsbach, 2007).

Los incendios desempeñan un papel relevante en los ecosistemas forestales, ya que contribuyen a la mineralización de la materia orgánica, participan en diversos ciclos de nutrimentos y pueden promover el crecimiento de los árboles cuando el fuego es de baja intensidad, gracias a la poda natural que propicia (Rodríguez, 2006). Entre los impactos negativos se encuentran la destrucción del ecosistema y la emigración de fauna, provocando que las personas que dependen de este recurso se vean afectadas económicamente (Lloret, 2004).

El cambio climático ha modificado el comportamiento de los incendios forestales alterando los ecosistemas. En diversas regiones del planeta se observan incendios de mayor extensión, duración, intensidad y severidad, ocasionados por una mayor acumulación de cargas combustibles, temperaturas más altas con menos humedad relativa y sequías más prolongadas (Rodríguez, 2012). La variabilidad climática es modulada de forma significativa por ENSO (El Niño Oscilación del Sur) a escala global (Stahle et al., 1998) y regional (Cerano, Villanueva, Valdez, Arreola, & Constante, 2011) como el norte de México. ENSO en su fase cálida, El Niño, propicia condiciones de humedad en el norte y sequía en el centro de México (Fulé, Villanueva-Díaz, & Ramos-Gómez, 2005; Heyerdahl & Alvarado, 2003), y viceversa, la fase fría, La Niña, se asocia a condiciones de sequía en el norte y humedad en el centro (Magaña, Vázquez, Pérez, & Pérez, 2003). Algunos estudios de reconstrucción de incendios para el norte de México reportan influencia significativa de ENSO en su fase fría (La Niña) sobre la frecuencia histórica de incendios (Cerano, Villanueva, & Fulé, 2010; Fulé et al., 2005; Heyerdahl & Alvarado, 2003).

Cada región, comunidad ejidal o zona forestal presenta condiciones ecológicas distintas, por tanto, es imposible generalizar los principios ecológicos del manejo del fuego. En este sentido resulta importante delimitar cada unidad de estudio, debido a la variabilidad existente en términos climáticos (temperatura, precipitación y humedad relativa), topografía y fisiografía (exposición y pendiente), y vegetación (Whelan, 1995). El conocimiento de los regímenes de los incendios forestales por región y tipo de bosque es esencial, ya

and 3) analyze the influence of rainfall and ENSO on historical fire frequency.

Materials and methods

Study area

The study was carried out in a pine-oak forest in the community of Charcos, Mezquital municipality, Durango (Figure 1). The site is located in the Sierra Madre Occidental mountain range, at an average elevation of 2,760 m. The plant community is dominated by the species *Pinus durangensis* Martínez, *Pinus arizonica* Engelm., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schlttdl. and *Quercus* sp. The topography of the area is formed by a plateau and pronounced slopes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2014). According to the climatic classification of García (2004), the climate is of the humid temperate type with summer rains (Cw_1).

The study area was divided into three sites: 1) the Plateau site, a flat area with a slope of not more than 2 % and an area of approximately 80 ha, 2) the Slope 1 site (S1), which has a wetter condition with an area of 20 ha and 3) the Slope 2 site (S2), which has a drier condition with an area of 17 ha. The S1 and S2 sites have a recorded slope ranging from 15 to 45 %.

que provee elementos técnicos para el desarrollo de programas más eficientes de prevención y de manejo del fuego. Por tal razón, el presente estudio tuvo como objetivos: 1) reconstruir los regímenes históricos del fuego en los bosques de pino-encino de la comunidad de Charcos, Mezquital, Durango, 2) determinar la estación de ocurrencia de los incendios y 3) analizar la influencia de la lluvia y de ENSO en la frecuencia histórica de los incendios.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló en un bosque de pino-encino de la comunidad de Charcos, municipio del Mezquital, Durango (Figura 1). El sitio está ubicado en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental, a una altitud promedio de 2,760 m. La comunidad vegetal está dominada por las especies *Pinus durangensis* Martínez, *Pinus arizonica* Engelm., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schlttdl. y *Quercus* sp. La topografía del área está conformada por una meseta y pendientes pronunciadas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2014). Según la clasificación climática de García (2004), el clima es del tipo templado húmedo con lluvias en verano (Cw_1).

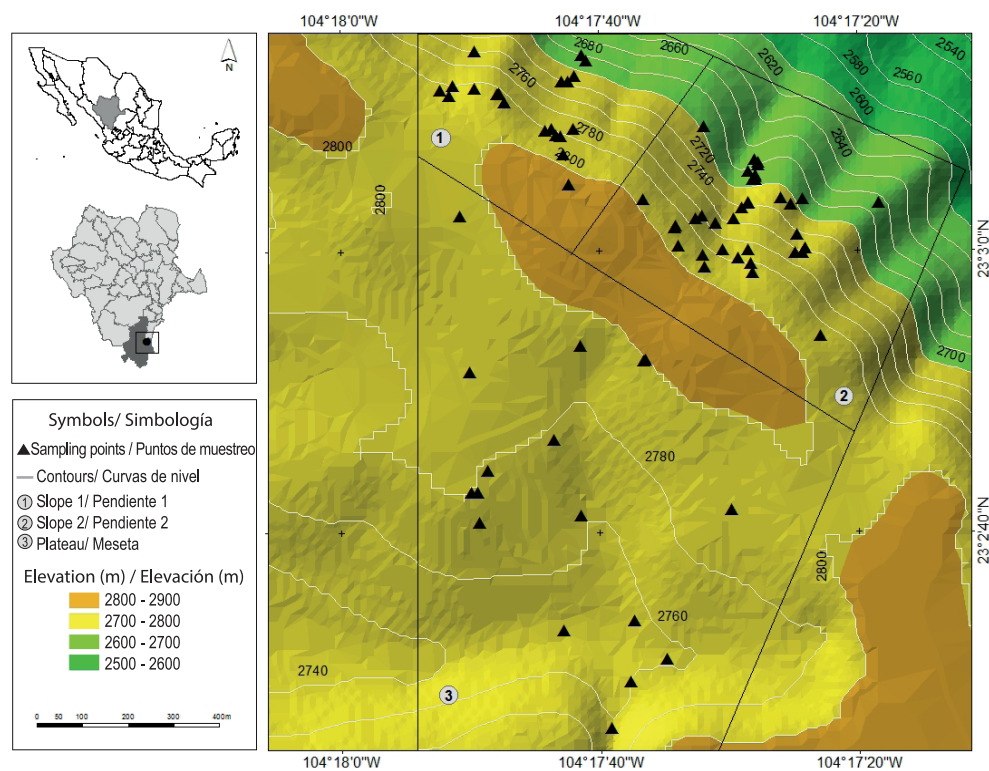


Figure 1. Geographic location of study sites in the forests of the community of Charcos, Mezquital, Durango.

Figura 1. Localización geográfica de los sitios de estudio en los bosques de la comunidad de Charcos, Mezquital, Durango.

Field method

Samples were selected using a selective sampling system, considering only the longest-lived specimens and those with the highest number of fire records (Figure 2). Using a chainsaw, 78 partial samples were extracted from *P. durangensis*, *P. arizonica*, *P. ayacahuite*, *Pinus teocote* Schltdl. & Cham. and *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco; 57 samples (73 %) of live trees and 21 (27 %) of dead trees (standing, lying and stumps). Each sample was georeferenced (GARMIN GPSMAP 64 GPS, Taiwan) and the information corresponding to the characteristics of the microsite and the collected trees was recorded.

Sample preparation and analysis in laboratory

Samples were dried and polished with 60 to 1,200 grit sandpaper to better visualize the xylem structures (growth rings). Each of the samples was predated by comparing growth patterns, using a stereoscopic microscope with a 10X magnifying glass (Stokes & Smiley, 1996). The width of each ring was measured with a VELMEX (USA) measurement system with 0.001 mm accuracy. The quality of the measurement and dating was verified with Program COFECHA (Holmes, 1983).

The seasonal timing of fires was determined by defining the location of the scar within the annual growth. Based on the methodology proposed by Baisan and Swetnam (1990), the EE (early earlywood),

El área de estudio se dividió en tres sitios: 1) El sitio La Meseta, un área plana con pendiente no mayor de 2 % y superficie aproximada de 80 ha; 2) el sitio Pendiente 1, (P1) de condición más húmeda con una superficie de 20 ha; y 3) el sitio Pendiente 2, (P2) de condición más seca con una superficie de 17 ha. Los sitios P1 y P2 registran una pendiente que oscila de 15 a 45 %.

Método de campo

Las muestras se seleccionaron mediante un sistema de muestreo selectivo, considerando solo los especímenes más longevos y con mayor número de registros de incendios (Figura 2). Con el apoyo de una motosierra se extrajeron 78 muestras parciales de *P. durangensis*, *P. arizonica*, *P. ayacahuite*, *Pinus teocote* Schltdl. & Cham. y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco; 57 muestras (73 %) de árboles vivos y 21 (27 %) de árboles muertos (en pie, tirados y tocones). Cada muestra se georreferenció (GPS GARMIN modelo GPSMAP 64, Taiwan) y se registró la información correspondiente a las características del micrositio y de los árboles colectados.

Preparación y análisis de muestras en laboratorio

Las muestras se secaron y se pulieron con granos de lijas de 60 al 1,200 para visualizar mejor las estructuras de xilema (anillos de crecimiento). Cada una de las muestras se preficharon mediante la comparación y similitud de los patrones de crecimiento, con el apoyo



Figure 2. (A) Mixed pine forest in the community of Charcos, Mezquital, Durango. (B) *Pinus durangensis* tree showing the record of historical fire frequency in these forests.

Figura 2. (A) Bosque mixto de pino de la comunidad de Charcos, Mezquital, Durango. (B) Árbol de *Pinus durangensis* que muestra el registro de la frecuencia histórica de incendios en estos bosques.

ME (mid-earlywood), LE (late earlywood), L (latewood) and D (dormancy) categories were established. The seasonal timing of the fire was defined by grouping the categories into the spring (D + EE) and summer (ME + LE + L) periods (Grissino-Mayer, 2001).

Data analysis

Statistical analysis of historical fire frequency was performed using FHX2 software version 3.2 (Grissino-Mayer, 2001). Statistics generated by the program were: mean fire interval (MFI), maximum and minimum fire intervals, and Weibull median probability interval (WMPI) (Grissino-Mayer, 2001). For each statistic, three filters were considered: 1) all scars, 2) 10 % or more of the scars recorded in all samples, and 3) 25 % or more of the scars recorded in all samples (Cerano et al., 2010). The last filter allowed determining the intervals of the most extensive and severe fires.

The relationship between climate variability and fires was determined using FHX2 software's Superposed Epoch Analysis (SEA) (Grissino-Mayer, 2001). As a proxy of the climate, a chronology of *P. durangensis* generated for this region of the state of Durango (Díaz-Ramírez, Villanueva-Díaz, & Cerano-Paredes, 2016) and ENSO Niño 3.4 indexes were used (Trenberth, 1997). Both variables were compared during the fire, five years before and two years after it. To evaluate the statistical significance of the SEA analysis, the confidence interval (95 %) was calculated using the bootstrapped distribution of the climatic data with 1,000 replicates.

Results and discussion

Of a total of 78 samples with fire scars, 21 (27 %) from dead trees and 57 (73 %) from live ones, 75 samples (96 %) were dated; the rest could not be dated due to a high degree of deterioration by rot and periods of very small rings that did not allow setting the dates of the scars with accuracy. The selected trees presented a wide range of diameter classes (19 to 73 cm), with a mean of 44 cm. Fire history was reconstructed for the last 268 years, covering the period 1746-2013 (Figure 3). A total of 535 scars were analyzed, the year 1779 represented the first fire record and the year 2012 the most recent fire. For the Plateau site, fire history was rebuilt for the last two centuries. In this area, lower fire variability over time was determined. At the S1 site, fire history was generated for the past 120 years; although the dated trees had recorded ages of up to 200 years, no evidence of older fires was recorded. At the S2 site, fire history was reconstructed for 235 years (1779-2013); in the period from 1850 to 1976 a higher frequency of fires was observed. After 1976, a longer time interval between fires was observed, which could lead to a greater accumulation of fuels and,

de un microscopio estereoscópico con lupa de aumento 10X (Stokes & Smiley, 1996). El ancho de cada anillo se midió con un sistema de medición VELMEX (EUA) con precisión de 0.001 mm. La calidad de la medición y fechado se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983).

La estación de ocurrencia de los incendios se determinó al definir la ubicación de la cicatriz dentro del crecimiento anual. Con base en la metodología propuesta por Baisan y Swetnam (1990), se establecieron las categorías EE (inicio de la madera temprana), ME (mitad de la madera temprana), LE (final de la madera temprana), L (madera tardía) y D (dormancia). La época de ocurrencia del incendio se definió al agrupar las categorías en los periodos primavera (D + EE) y verano (ME + LE + L) (Grissino-Mayer, 2001).

Análisis de datos

El análisis estadístico de la frecuencia histórica de incendios se realizó con el software FHX2 versión 3.2 (Grissino-Mayer, 2001). Los estadísticos generados por el programa fueron: intervalo medio de frecuencia de incendios (MFI, por sus siglas en inglés), intervalos máximos y mínimos entre incendios e intervalo medio de probabilidad de Weibull (WMPI, por sus siglas en inglés) (Grissino-Mayer, 2001). Para cada estadístico se consideraron tres filtros: 1) todas las cicatrices; 2) 10 % o más de las cicatrices registradas en todas las muestras y 3) 25 % o más de las cicatrices registradas en todas las muestras (Cerano et al., 2010). Este último permitió la determinación de los intervalos de los incendios más extensos y severos.

La relación entre la variabilidad del clima y los incendios se determinó mediante el análisis de sobreposición de época (SEA, por sus siglas en inglés) del programa FHX2 (Grissino-Mayer, 2001). Como *proxy* del clima se utilizó una cronología de *P. durangensis* generada para esta región del estado de Durango (Díaz-Ramírez, Villanueva-Díaz, & Cerano-Paredes, 2016) y los índices Niño 3.4 de ENSO (Trenberth, 1997). Ambas variables se compararon durante el incendio, cinco años anteriores y dos años posteriores al mismo. Para evaluar la significancia estadística del análisis SEA, el intervalo de confianza (95 %) se calculó utilizando la distribución *bootstrapped* de los datos climáticos con 1,000 repeticiones.

Resultados y discusión

De un total de 78 muestras con cicatrices de incendios, 21 (27 %) de árboles muertos y 57 (73 %) de árboles vivos, se fecharon 75 muestras (96 %); el resto no se logró fechar debido a un alto grado de deterioro por pudrición y periodos de anillos muy pequeños que

consequently, the occurrence of more extensive and severe fires (Figure 3); these events were recorded in 90 % of the samples. The Plateau site, unlike the S1 and S2 sites, had trees with a high number of fires, many of them recorded only at this site. This is attributable to anthropogenic issues, since it is a site that has been used for grazing purposes, due to its low slope (2 %) and pasture dominance, where the use of fire to promote regrowth is very common.

The Plateau and Slope 1 sites are areas that have been under use, to which the greater number of live trees that are barely 100 years of age is attributed. The oldest records come from dead trees or stumps left behind after management activities. The few old trees found at the Plateau site correspond to a silvicultural treatment called seed-tree cut. In the case of the Slope 2 site, the presence of longer-lived live trees is due to the presence of *P. menziesii*, a protected species, which has possibly limited more intensive use and saved a larger number of old individuals.

no permitieron definir las fechas de las cicatrices con exactitud. Los árboles seleccionados presentaron un rango amplio de clases diamétricas (19 a 73 cm), con una media de 44 cm. La Figura 3 muestra la reconstrucción de la historia de incendios ocurridos en los últimos 268 años, que comprende el periodo 1746-2013. Se analizaron 535 cicatrices, el año 1779 representó el primer registro de incendio y el año 2012 el incendio más reciente. Para el sitio La Meseta, la historia del fuego se reconstruyó para los últimos dos siglos. En esta área se determinó una menor variabilidad de incendios a través del tiempo. En el sitio P1, la historia del fuego se generó para los pasados 120 años; aunque los árboles fechados registraron edades hasta de 200 años, no se registró evidencia de incendios más longevos. En el sitio P2, la historia del fuego se reconstruyó para 235 años (1779-2013); en el periodo de 1850 a 1976 se observó mayor frecuencia de incendios. Posterior a 1976 se observó un mayor intervalo entre incendios, lo que pudo propiciar mayor acumulación de combustibles y, en consecuencia, la presencia de incendios más

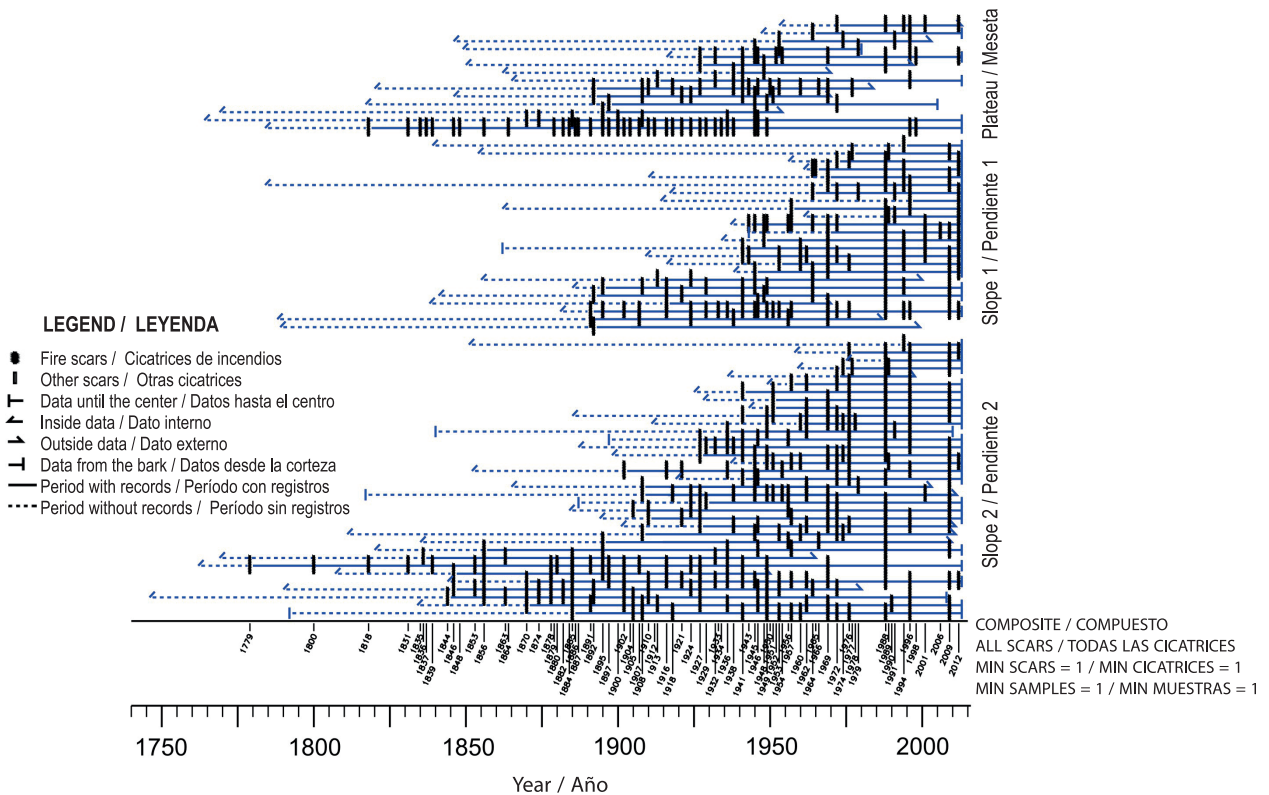


Figure 3. Historical fire frequency in the forests of the community of Charcos, Mezquital, Durango, considering all scars. The blue lines represent the longevity of the analyzed trees. The vertical lines highlighted in black represent the fires recorded per tree over time; the formation of a continuous line indicates an extensive fire. The specific year in which each of the fires was recorded is shown on the secondary axis of the abscissas.

Figura 3. Frecuencia histórica de incendios en los bosques de la comunidad de Charcos, Mezquital, Durango, considerando todas las cicatrices. Las líneas de color azul representan la longevidad de los árboles analizados. Las líneas verticales resaltadas en color negro representan los incendios registrados por árbol a través del tiempo; la formación de una línea continua indica un incendio extenso. El año específico en que se registró cada uno de los incendios se muestra en el eje secundario de las abscisas.

Seasonality of fires

Table 1 reports the seasonality of the fire scars. No events were detected in dormancy or latewood seasons; 471 (92.2 %), 31 (6.1 %) and 9 (1.8 %) scars were recorded in the early, mid- and late earlywood seasons, respectively. Based on the methodology proposed by Grissino-Mayer (2001), fires were categorized into two periods: 92.2 % in spring (D + EE) with a total of 471 scars and 7.8 % in summer (ME + LE + L) with 40 scars. Similar results were reported in studies conducted in the Sierra Madre Occidental, where more than 80 % of the fires were categorized in the spring season (Cerano et al., 2010; Heyerdahl & Alvarado, 2003; Fulé et al., 2005). In central Mexico, a study in high mountain forests in the Pico de Orizaba, Veracruz, reports 95.2 % of fires in the spring (Yocom & Fulé, 2012) and in the Sierra de Manantlán, Jalisco, 95 % of reconstructed fires occurred during the spring (Cerano et al., 2015). The fires at this time occur between the last days of April and the beginning of June; this is related to a dry period, to which the highest number of fires is attributed. Summer fires are recorded between the last days of June and the first days of September, when there is higher humidity and, therefore, less fire frequency (Swetnam, Baisan, & Kaib, 2001).

Historical fire regimes

For the three study sites (Plateau, S1 and S2), very similar MFIs were reconstructed: 3.0 years considering all scars and 6.0 years for the most severe fires (Table 2). In the composite analysis of the three areas, considering all scars, an MFI of 2.0 years and a WMPI of 1.8 years were determined. In the case of 10 % of scars recorded in all samples, the MFI was 3.2 years with a WMPI of 2.9 years, while for 25 % of recorded scars an MFI and WMPI of 7.0 and 5.9 years, respectively, were determined (Table 2).

extensos y severos (Figura 3); estos eventos se registraron en 90 % de las muestras. El sitio La Meseta, a diferencia de los sitios P1 y P2, presentó árboles con alto número de incendios, muchos de ellos registrados en este sitio en particular. Lo anterior se atribuye a cuestiones antropogénicas, ya que es un sitio que se ha utilizado con fines de pastoreo, debido a su condición de escasa pendiente (2 %) y dominancia de pastos, donde el uso del fuego para propiciar el rebrote es muy común.

Los sitios La Meseta y Pendiente 1 son áreas que han estado bajo aprovechamiento, a lo cual se atribuye que el mayor número de árboles vivos apenas alcancen edades de 100 años. Los registros más viejos provienen de árboles muertos o tocones que han quedado tras las actividades de manejo. Los pocos árboles viejos encontrados en La Meseta corresponden a un tratamiento silvícola llamado árboles padres. En el caso de La Pendiente 2, la presencia de árboles vivos más longevos obedece a la presencia de *P. menziesii*, especie protegida, lo que posiblemente ha limitado el aprovechamiento más intensivo y salvado mayor número de individuos viejos.

Estacionalidad de los incendios

El Cuadro 1 reporta la estacionalidad de las cicatrices de incendios. No se detectaron eventos en la estación de dormancia ni en la de madera tardía; se registraron 471 (92.2 %), 31 (6.1 %) y 9 (1.8 %) cicatrices al inicio, mitad y final de la madera temprana, respectivamente. Con base en la metodología propuesta por Grissino-Mayer (2001), los incendios se categorizaron en dos periodos: 92.2 % en primavera (D + EE) con un total de 471 cicatrices y 7.8 % en verano (ME + LE + L) con 40 cicatrices. Resultados similares se reportaron en estudios desarrollados en la Sierra Madre Occidental, donde más de 80 % de los incendios se categorizaron en la estación de primavera (Cerano et al., 2010;

Table 1. Categorization of the seasonality of fire scars in a pine-oak forest in Charcos, Mezquital, Durango.

Cuadro 1. Categorización de la estacionalidad de las cicatrices de incendios en un bosque de pino-encino en Charcos, Mezquital, Durango.

Scars/Cicatrices	Total	Determined seasons/ Estaciones determinadas	Undetermined seasons/ Estaciones no determinadas						Spring fires/ Incendios primavera	Summer fires/ Incendios verano
				D	EE	ME	LE	L		
Number/ Número	535	511	24	0	471	31	9	0	471	40
Percentage (%)/ Porcentaje (%)	100	95.7	4.3	0	92.2	6.1	1.8	0	92.2	7.8

D: dormancy, EE: early earlywood, ME: mid-earlywood, LE: late earlywood.

D: dormancia, EE: inicio de la madera temprana, ME: mitad de la madera temprana, LE: final de la madera temprana, L: madera tardía.

Table 2. Distribution of mean fire frequency intervals for the pine-oak forest in the community of Charcos, Mezquital, Durango.

Cuadro 2. Distribución de los intervalos medios de frecuencia de incendios para el bosque de pino-encino de la comunidad de Charcos, Mezquital, Durango.

Site/Sitio	Period of analysis/ Periodo de análisis	Category of analysis/ Categoría de análisis	MFI	Minimum frequency interval/ Intervalo de frecuencia mínimo	Maximum frequency interval/ Intervalo de frecuencia máximo	WMPI
Plateau/Meseta	1892-2013	All scars/ Todas las cicatrices	2.6	1	11	2.3
		≥ 10 % scars/ ≥ 10 % cicatrices	3.3	1	16	2.7
		≥ 25 % scars/ ≥ 25 % cicatrices	6.0	1	19	5.0
Slope 1/ Pendiente 1	1891-2013	All scars/ Todas las cicatrices	2.9	1	9	2.7
		≥ 10 % scars/ ≥ 10 % cicatrices	3.4	1	12	3.1
		≥ 25 % scars/ ≥ 25 % cicatrices	6.7	1	16	5.9
Slope 2/ Pendiente 2	1856-2013	All scars/ Todas las cicatrices	2.8	1	9	2.6
		≥ 10 % scars/ ≥ 10 % cicatrices	3.8	1	13	3.4
		≥ 25 % scars/ ≥ 25 % cicatrices	6.6	2	14	6.2
Composite/ Compuesto	1885-1976	All scars/ Todas las cicatrices	1.9	1	4	1.8
		≥ 10 % scars/ ≥ 10 % cicatrices	2.6	1	6	2.6
		≥ 25 % scars/ ≥ 25 % cicatrices	6.2	1	20	5.0
Composite/ Compuesto	1977-2013	All scars/ Todas las cicatrices	2.7	1	9	2.3
		≥ 10 % scars/ ≥ 10 % cicatrices	4.8	2	8	4.6
		≥ 25 % scars/ ≥ 25 % cicatrices	8.0	3	13	7.6
Composite/ Compuesto	1885-2013	All scars/ Todas las cicatrices	2.0	1	9	1.8
		≥ 10 % scars/ ≥ 10 % cicatrices	3.2	1	12	2.9
		≥ 25 % scars/ ≥ 25 % cicatrices	7.0	1	20	5.9

MFI: Mean fire interval, WMPI: Weibull median probability interval.

MFI: Intervalo medio de frecuencia de incendios, WMPI: Intervalo medio de probabilidad de Weibull.

A study carried out in La Michilía, Durango, reports an MFI of 4.0 to 6.0 years, superior to that reconstructed in this work; however, when considering the most severe fires, the MFI was similar (6.0 years) (Fulé & Covington, 1999). Heyerdahl and Alvarado (2003) report MFIs similar to those reconstructed in the present study (3.0 to 6.0 years), for seven sites in the Sierra Madre Occidental distributed from north to south in the state of Durango. Cerano et al. (2010) reported higher MFIs when considering all scars and the most severe fires (6 and 13 years, respectively) in Cerro Mohinora, Chihuahua.

The pine-oak forest in the community of Charcos showed an MFI less than or equal to that of other sites when considering all scars. The forest also showed MFIs similar to that of other sites in northern Mexico when considering the most severe fires (25 % of scars or more), a condition attributable to climatic variability modulated by large-scale climatic phenomena such as ENSO (Stahle et al., 1998).

In contrast to some studies conducted in the state of Durango (Fulé & Covington, 1999; Heyerdahl & Alvarado, 2003), fire frequency in the forest of the community of Charcos presents an uninterrupted frequency; however, severity increased after the 1970s (Figure 3), as a result of a longer time interval between fires and greater fuel accumulation. The amplitude of fire frequency intervals indicates an increase in the accumulation of fuels (leaves, grasses, shrubs and branches), both in quantity and continuity, which is likely to cause more severe fires, particularly when this condition is combined with years of drought (Skinner, Burk, Barbour, Franco-Vizcaíno, & Stephens, 2008). The change in fire frequency was observed after 1976, as fire activity was almost completely interrupted until 1988. The fuel accumulation lasted for 12 years, which, when synchronized with an ENSO event in its La Niña cold phase (1988), led to a significant decrease in precipitation for the Sierra Madre Occidental region (Cerano et al., 2012) and gave way to one of the most expensive fires. A similar condition was rebuilt for the years 1996, 2009 and 2012.

The historical frequency of fires shows the importance of their continuity; otherwise, the resulting fuel accumulation favors high-intensity fires with severe impacts on forests by modifying the structure, composition of species and their reproduction strategies (Rodríguez & Fulé, 2003).

Climate-fire relationship

The SEA analysis determined that there is no significant ($P > 0.05$) influence of regional climate variability and ENSO events on historical fire frequency; however,

Heyerdahl & Alvarado, 2003; Fulé et al., 2005). En el centro de México, un estudio en bosques de alta montaña en el Pico de Orizaba, Veracruz, reporta 95.2 % de los incendios en primavera (Yocom & Fulé, 2012) y en la Sierra de Manantlán, Jalisco, se reconstruyeron también 95 % de los incendios durante la primavera (Cerano et al., 2015). Los incendios en esta época ocurren entre los últimos días de abril y el inicio de junio; esto se relaciona con un periodo seco, a lo cual se atribuye la mayor cantidad de incendios. Los incendios de verano se registran entre los últimos días de junio y los primeros días de septiembre, cuando existe mayor humedad y, por tanto, menor frecuencia de incendios (Swetnam, Baisan, & Kaib, 2001).

Regímenes históricos de incendios

Para los tres sitios de estudio (La Meseta, P1 y P2) se reconstruyeron MFI muy parecidos, de 3.0 años al considerar todas las cicatrices y de 6.0 años para los incendios más severos (Cuadro 2). En el análisis compuesto de las tres áreas, considerando todas las cicatrices, se determinó un MFI de 2.0 años y un WMPI de 1.8 años. En el caso del 10 % de cicatrices registradas en todas las muestras, el MFI fue de 3.2 años con un WMPI de 2.9 años; mientras que para 25 % de las cicatrices registradas se determinó un MFI y WMPI de 7.0 y 5.9 años, respectivamente (Cuadro 2).

Un estudio realizado en La Michilía, Durango, reporta un MFI de 4.0 a 6.0 años, superior al reconstruido en este trabajo; sin embargo, al considerar los incendios más severos, el MFI fue similar (6.0 años) (Fulé & Covington, 1999). Heyerdahl y Alvarado (2003) reportan MFI similares a los reconstruidos en el presente estudio (3.0 a 6.0 años), para siete sitios en la Sierra Madre Occidental distribuidos de norte a sur en el estado de Durango. Cerano et al. (2010) reportaron MFI superiores al considerar todas las cicatrices y los incendios más severos (6 y 13 años, respectivamente) en el Cerro Mohinora, Chihuahua.

El bosque de pino-encino de la comunidad de Charcos mostró un MFI menor o igual que otros sitios al considerar todas las cicatrices. El bosque también mostró MFI similares a otros sitios del norte de México al considerar los incendios más severos (25 % o más de las cicatrices), condición atribuible a la variabilidad climática modulada por fenómenos climáticos de gran escala como ENSO (Stahle et al., 1998).

A diferencia de algunos estudios realizados en el estado de Durango (Fulé & Covington, 1999; Heyerdahl & Alvarado, 2003), la frecuencia de incendios en el bosque de la comunidad de Charcos presenta una frecuencia ininterrumpida; sin embargo, la severidad incrementó posterior a la década de 1970 (Figura 3), como

reconstructed fires are associated with years of below-average precipitation values (Figure 4A) and negative ENSO values (Figure 4B) indicating a drought condition. By contrast, no fires were recorded in the presence of positive or significant ($P < 0.05$) moisture conditions.

Figure 5 shows that there is high variability in fire frequency between sites; however, for specific years, the most extensive and intense fires have affected the entire study area, regardless of topography and exposure conditions. In general, the most extensive fires are related to severe droughts reported in the state of Durango (Cerano et al., 2012; Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva, & Burns, 2003). Although there is

consecuencia de un mayor intervalo entre incendios y mayor acumulación de combustibles. La amplitud de los intervalos en la frecuencia de incendios indica un incremento en la acumulación de combustibles (hojas, pastos, arbustos y ramas), tanto en cantidad como en continuidad, lo que probablemente ocasiona incendios más severos; en particular, cuando esta condición se combina con años de sequía (Skinner, Burk, Barbour, Franco-Vizcaíno, & Stephens, 2008). El cambio en la frecuencia de incendios se observó después del año 1976; la actividad del fuego se interrumpió casi en su totalidad hasta 1988. La acumulación de combustible se prolongó por 12 años, lo cual, al sincronizar con un evento ENSO en su fase fría La Niña (1988), propició

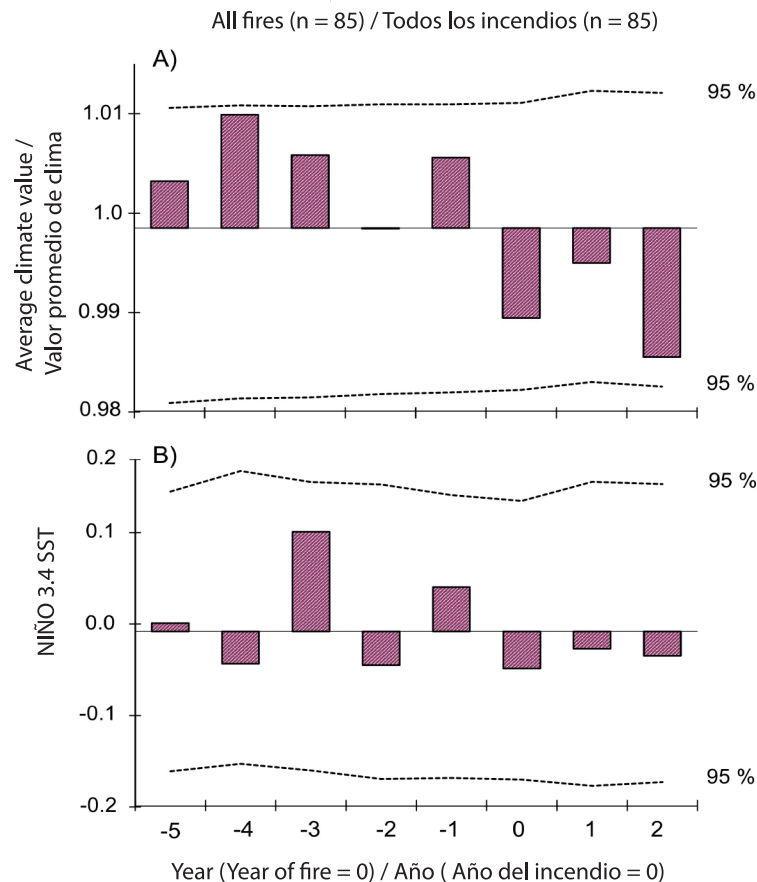


Figure 4. Superposed Epoch Analysis showing the climate-fire relationship ($n = 85$) in Charcos, Mezquital, Durango. All fire scars were associated with regional climate variability (regional chronology) and El Niño 3.4 indices, estimates of the variability of the ENSO phenomenon (El Niño Southern Oscillation). The year of the fire is indicated by “0,” conditions five years prior to the fire (negative values) and two years after the fire (positive values). The dotted upper and lower line represents the confidence interval.

Figura 4. Análisis de sobreposición de época que muestra la relación clima-incendios ($n = 85$) en Charcos, Mezquital, Durango. Todas las cicatrices de incendios se asociaron con la variabilidad del clima regional (cronología regional) e índices El Niño 3.4, estimativos de la variabilidad del ENSO (El Niño Oscilación del Sur). El año del incendio está indicado por “0,” condiciones cinco años previos al incendio (valores negativos) y dos años posteriores al incendio (valores positivos). La línea superior e inferior punteada representa el intervalo de confianza.

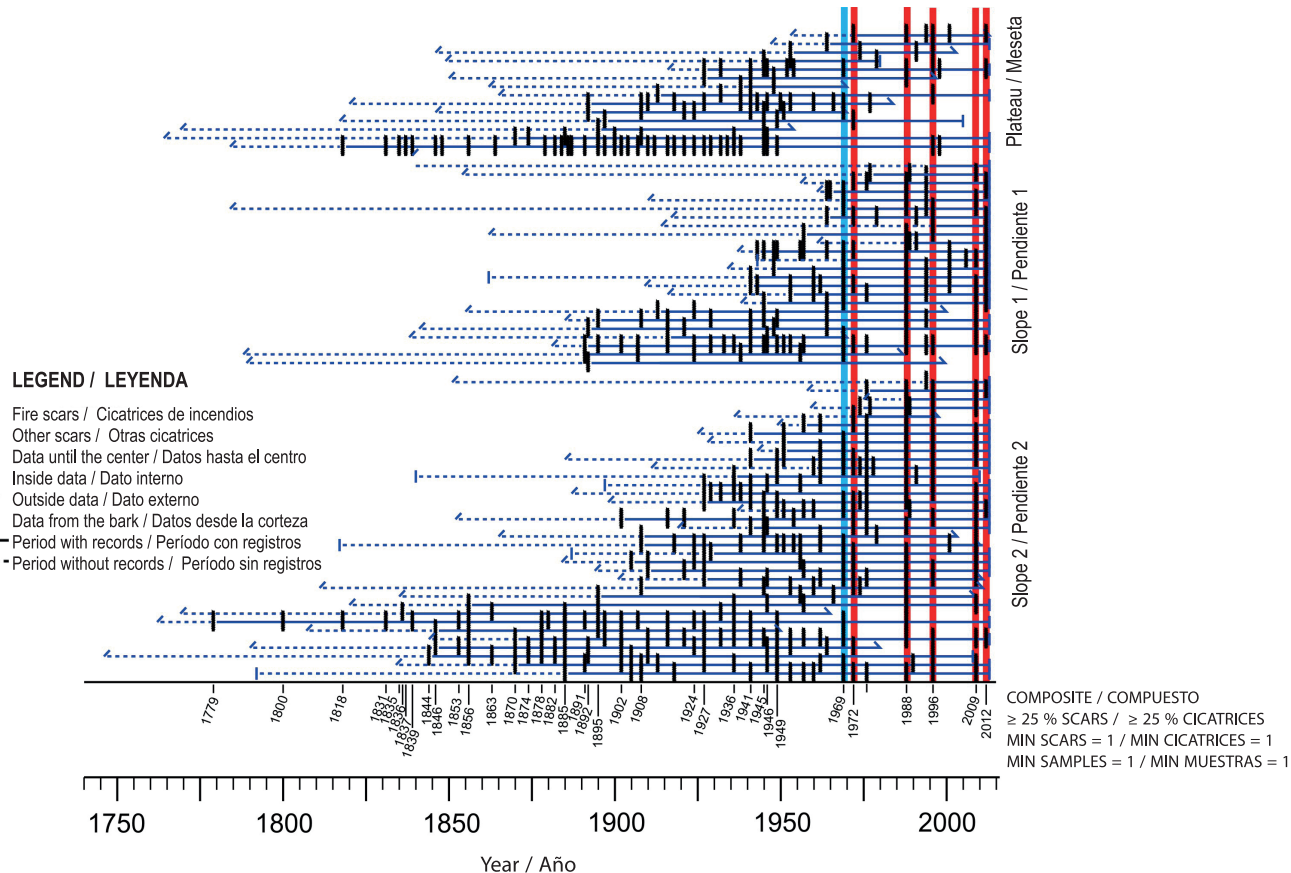


Figure 5. Historical fire frequency showing the most extensive events (25 % or more of the scars recorded in all samples) in Charcos, Mezquital, Durango. The most extensive reconstructed fires after 1976 were associated with ENSO events. In the last 45 years (1969-2013) six intense fires were rebuilt, five of which correspond to La Niña events (lines highlighted in red) and one to El Niño (vertical line in blue).

Figura 5. Frecuencia histórica de incendios que muestra los eventos más extensos (25 % o más de las cicatrices registradas en todas las muestras) en Charcos, Mezquital, Durango. Los incendios más extensos reconstruidos posteriores al año 1976 se asociaron a eventos ENSO. En los últimos 45 años (1969-2013) se reconstruyeron seis incendios intensos, cinco de los cuales corresponden a eventos La Niña (líneas resaltadas en color rojo) y uno a El Niño (línea vertical en color azul).

no significant ($P > 0.05$) relationship between climate and fires, the most extensive events (2012, 2009, 1996, 1988, 1972, 1969, 1962, 1953, 1945) are associated with ENSO in its cold phase, La Niña (Gergis & Fowler, 2009), a phase associated with reduced rainfall (drought) in northern Mexico (Cerano et al., 2012). For the last 45 years (1969-2013), six extensive and intense fires, five of which coincide with La Niña events, were rebuilt. A similar behavior in which fires were not significantly ($P > 0.05$) related to ENSO events, but in specific years harmonized with the incidence of ENSO and drought, have been reported for the La Michilía Biosphere Reserve, Durango (Fulé & Covington, 1999) and the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, Jalisco (Cerano et al., 2015). By contrast, other sites in northern Mexico have shown a significant ($P < 0.05$) relationship between reduced rainfall and fire occurrence (Cerano et al., 2010; Fulé et al., 2005; Heyerdahl & Alvarado, 2003),

una disminución significativa de la precipitación para la región de la Sierra Madre Occidental (Cerano et al., 2012) y dio paso a uno de los incendios más extensos. Una condición similar se reconstruyó para los años 1996, 2009 y 2012.

La frecuencia histórica de incendios muestra la importancia de mantener la continuidad de éstos, de lo contrario, la acumulación de combustible favorece incendios de alta intensidad con impactos severos en los bosques al modificar la estructura, composición de especies y sus estrategias de reproducción (Rodríguez & Fulé, 2003).

Relación clima-incendios

El análisis SEA determinó que no existe influencia significativa ($P > 0.05$) de la variabilidad climática

and between ENSO in its La Niña phase and historical fire frequency ($P < 0.05$) (Cerano et al., 2010; Fulé et al., 2005; Heyerdahl & Alvarado, 2003; Yocom et al., 2010).

In general, the results indicate that fire frequency is due to both anthropogenic and climatic or natural issues. The amplitude in fire frequency after 1976 can be attributed to greater forest protection. In the case of the Plateau site, samples with a high number of fires, most of which do not have synchrony with other events inside or outside the site, were observed; these are very localized fires that may have been caused by the influence of man. By contrast, the most extensive and severe events recorded in the three areas (high synchrony) are positively related to drought conditions and La Niña events, which are due to climatic variability or non-anthropogenic issues.

Conclusions

In the pine-oak forest in the community of Charcos, Mezquital, Durango, an uninterrupted fire frequency from 1779 to 2012 was recorded; however, after 1976 there was a change in frequency, a longer interval between fires, a condition that led to the accumulation of fuel for several years and the occurrence of more extensive and severe fires. The most severe fires in the last 45 years show a positive relationship between reduced rainfall (drought) and the presence of ENSO events in its La Niña cold phase. The results are relevant for those responsible for forest management, who should consider the historical frequency intervals, the change in their frequency, the incidence period and the prediction of climatic phenomena such as ENSO in its La Niña phase, which modulate the presence of fires in the region. This information contributes to the development of more effective fire prevention and management strategies, with which the natural frequency of fires can be restored and forest conservation ensured.

Acknowledgments

This research was made possible by INIFAP's fiscal funds through the project "Reconstruction of historical fire frequency characterization of fuel loads in forest ecosystems in north-central Mexico."

End of English version

regional y eventos ENSO sobre la frecuencia histórica de incendios; sin embargo, los incendios reconstruidos se asocian a los años con valores de precipitación por debajo de la media (Figura 4A) y valores negativos de ENSO (Figura 4B) que indican condición de sequía. Por el contrario, no se registraron incendios ante condiciones positivas o significativas de humedad ($P < 0.05$).

La Figura 5 muestra que existe alta variabilidad de la frecuencia de incendios entre sitios; sin embargo, para años específicos, los incendios más extensos e intensos han afectado toda el área de estudio, sin importar las condiciones de topografía y exposición. En general, los incendios más extensos se relacionan con sequías severas reportadas en el estado de Durango (Cerano et al., 2012; Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva, & Burns, 2003). Aunque no existe una relación significativa ($P > 0.05$) entre el clima y los incendios, los eventos más extensos (2012, 2009, 1996, 1988, 1972, 1969, 1962, 1953, 1945) están asociados con ENSO en su fase fría La Niña (Gergis & Fowler, 2009), fase asociada a la disminución de la lluvia (sequía) en el norte de México (Cerano et al., 2012). Para los últimos 45 años (1969-2013) se reconstruyeron seis incendios extensos e intensos, cinco de los cuales, coinciden con eventos La Niña. Un comportamiento similar donde los incendios no se relacionaron de manera significativa ($P > 0.05$) con eventos ENSO, pero que en años específicos armonizaron con la incidencia de ENSO y sequía, se han reportado para la Reserva de la Biosfera La Michilía, Durango (Fulé & Covington, 1999) y la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco (Cerano et al., 2015). En contraste, otros sitios en el norte de México han documentado una relación significativa ($P < 0.05$) entre la disminución de lluvia y ocurrencia de incendios (Cerano et al., 2010; Fulé et al., 2005; Heyerdahl & Alvarado, 2003), y entre ENSO, en su fase La Niña, y la frecuencia histórica de incendios ($P < 0.05$) (Cerano et al., 2010; Fulé et al., 2005; Heyerdahl & Alvarado, 2003; Yocom et al., 2010).

En general, los resultados indican que la frecuencia de incendios obedece tanto a cuestiones antropogénicas como climáticas o naturales. La amplitud en la frecuencia de incendios después de 1976 puede atribuirse a una mayor protección de los bosques. En el caso de La Meseta se observaron muestras con alto número de incendios que en su mayoría no tienen sincronía con otros eventos dentro o fuera del sitio, se trata de incendios muy localizados que pudieron haber sido provocados por la influencia del hombre. En contraste, los eventos más extensos y fuertes registrados en las tres áreas (alta sincronía) están relacionados positivamente con condiciones de sequía y eventos La Niña, esto obedece a la variabilidad climática o cuestiones no antropogénicas.

Referencias / Referencias

- Baisan, C. H., & Swetnam, T. W. (1990). Fire history on a desert mountain range: Rincon Mountain Wilderness, Arizona, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 1559–1569. doi: 10.1139/x90-208
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., & Fulé, P. Z. (2010). Reconstrucción de incendios y su relación con el clima para la reserva Cerro el Mohinora, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 63-74. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v1n1/v1n1a8.pdf>
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Arreola, A. J. G., & Constante, G. V. (2011). El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17 (Ed. Especial), 207-215. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.076
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Constante, G. V., González, B. J. L., & Estrada, Á. J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 7-23. Retrieved from http://www.inifap.gob.mx/revistas/ciencia_forestal/vol3_no10.pdf
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., Fúle, P. Z., Yocom, L. L., Esquivel, A. G., & Jardel, P. E. (2015). Historia de incendios en un bosque de pino de la Sierra de Manantlán, Jalisco, México. *Bosque*, 36(1), 39-50. Retrieved from <http://www.scielo.cl/pdf/bosque/v36n1/art05.pdf>
- Cleaveland, M. K., Stanhle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva, D. J., & Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59, 369-388. doi: 10.1023/a:1024835630188
- Díaz-Ramírez, B., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera y Bosques*, 22(1), 111-123. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v22n1/1405-0471-mb-22-01-00111.pdf>
- Fulé, P. Z., & Covington, W. W. (1999). Fire regime changes in La Michilia Biosphere Reserve, Durango, Mexico. *Conservation Biology*, 13(3), 640-652. doi: 10.1046/j.1523-1739.1999.97512.x
- Fulé, P. Z., Villanueva-Díaz, J., & Ramos-Gómez, M. (2005). Fire regime in a conservation reserve in Chihuahua, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 320-330. doi: 10.1139/X04-173
- García, A. E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: Instituto de geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gergis, J. L., & Fowler, A. M. (2009). A history of ENSO events since AD 1525: Implications for future climate change. *Climatic Change*, 92(3-4), 343-387. doi:10.1007/s10584-008-9476-z
- González, T. M. A., Schwendenmann, L., Jiménez, P. J., & Himmelsbach, W. (2007). Reconstrucción del historial

Conclusiones

En el bosque de pino-encino de la comunidad de Charcos, Mezquital, Durango, se registró una frecuencia ininterrumpida de incendios de 1779 al 2012; sin embargo, posterior a 1976 se determinó un cambio en la frecuencia, mayor intervalo entre incendios, condición que propició la acumulación de combustible durante varios años y la propagación de incendios más extensos y severos. Los incendios más severos en los últimos 45 años presentan una relación positiva entre disminución de lluvia (sequía) y presencia de eventos ENSO en su fase fría La Niña. Los resultados son relevantes para los responsables del manejo del bosque, quienes deben considerar los intervalos históricos de frecuencia, el cambio en su frecuencia, época de incidencia y la predicción de fenómenos climáticos como ENSO en su fase La Niña, que modulan la presencia de incendios en la región. Esta información coadyuva al desarrollo de estrategias más eficaces de prevención y manejo del fuego, con las que se puede recuperar la frecuencia natural de incendios y garantizar la conservación de los bosques.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias a los fondos fiscales de INIFAP a través del proyecto “Reconstrucción de la frecuencia histórica de incendios y caracterización de las cargas de combustible en ecosistemas forestales del norte-centro de México”.

Fin de la versión en español

de incendios y estructura forestal en bosques mixtos de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques*, 13(2), 51-63. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61713205>

Grissino-Mayer, H. D. (2001). FHx2-software for analyzing temporal and spatial patterns in fire regimes from tree rings. *Tree-Ring Research*, 57, 115-124. Retrieved from <http://web.utk.edu/~grissino/downloads/grissino-mayer-2001-fhx2.pdf>

Heyerdahl, E. K., & Alvarado, E. (2003). Influence of climate and land use on historical surface fires in pine-oak forests, Sierra Madre Occidental, Mexico. In T. T. Veblen, W. L. Baker, G. Montenegro, & T. W. Swetnam (Eds.), *Fire and climatic change in temperate ecosystems of the Western Americas* (pp. 196–217). New York, USA: Springer-Verlag.

Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69-75.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Carta de topografía. Escala 1:20 000. Número de carta F13B43D. México: Author.
- Lloret, F. (2004). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A.
- Magaña, V., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42, 313–330. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56842304>
- Pyne, S. J., Andrews, P. L., & Laven, R. D. (1996). *Introduction to wildland fire* (2^a ed.). USA: Wiley.
- Rodríguez, T. D. A. (2006). *Ecología del fuego y manejo integral del fuego en las montañas del Valle de México (bosque de coníferas)*. *Incendios forestales. Definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación*. México: Mundi Prensa-CONAFOR.
- Rodríguez, T. D. A., & Fulé, P. Z. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12, 23-37. doi: 10.1071/WF13214.
- Rodríguez, T. D. A. (2012). Génesis de los incendios forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(3), 357-373. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.12.091
- Skinner, C. N., Burk, J. H., Barbour, M. G., Franco, V. E., & Stephens, S. L. (2008). Influences of climate on fire regimes in montane forests of north-western México. *Journal of Biogeography*, 35, 1436-1451.
- Stahle, D. W., D'Arrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., ...Thompson, L. G. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137-2152. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<2137:EDROTS>2.0.CO;2
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1995). *An introduction to tree-ring dating*. Tucson, AZ, USA: University of Arizona Press.
- Swetnam, T. W., Baisan, C. H., & Kaib, J. M. (2001). Forest fire histories in the sky islands of La Frontera. In G. L. Webster, & C. J. Bahre (Eds.), *Changing plant life of La Frontera: Observations on vegetation in the United States/Mexico borderlands* (pp. 95-119). Albuquerque, Nuevo México, USA: University of New Mexico Press.
- Trenberth, K. E. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771-2777. doi: 10.1175/1520-0477
- Whelan, R. J. (1995). *The ecology of fire*. UK: Cambridge university press.
- Yocom, L. L., Fulé, P. Z., Brown, P. M., Cerano, P. J., Villanueva-Díaz, J., Falk, D. A., & Cornejo-Oviedo, E. (2010). El Niño Southern Oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology*, 91(6), 1660-1671. doi: 10.1890/09-0845.1
- Yocom, L. L., & Fulé, P. Z. (2012). Human and climate influences on frequent fire in a high-elevation tropical forest. *Journal of Applied Ecology*, 49, 1356-1364. doi: 10.1111/j.1365-2664.2012.02216.x