

Fire records based on dendrochronological techniques for a coniferous forest in the southeastern region of Jalisco, Mexico

Historial de incendios basado en técnicas dendrocronológicas para un bosque de coníferas en la región sureste de Jalisco, México

Marco A. González-Tagle¹; Julián Cerano-Paredes²; Wibke Himmelsbach^{1*}; Eduardo Alanís-Rodríguez¹; Ángel A. Colazo-Ayala¹

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional km 145. C. P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID RASPA), Laboratorio de Dendrocronología. km 6.5 margen derecha del Canal de Sacramento. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango, México.

*Corresponding author: wibke.himmelsbach@uanl.edu.mx; tel.: +52 821 214 0000 ext. 146.

Abstract

Introduction: There is growing public awareness in Mexico concerning natural resources and, in particular, the threat they face due to the increase in the number of forest fires.

Objective: To reconstruct the fire records of a 66-year period (1945-2011) and analyze its relationship with climate conditions in the southeastern part of Jalisco.

Materials and methods: *Pinus douglasiana* Martínez samples were processed according to standard dendrochronological techniques. The statistical analysis and relationship of fires with climate were determined with the *burnr* library of the R program. Winter precipitation and PDSI (Palmer Drought Severity Index) and PDO (Pacific Drought Oscillation) indices were used as proxies for climate.

Results and discussion: All scars (114) were in the zone of initial growth of earlywood; therefore, fires occurred during the spring (dry season). The mean fire frequency interval for the 100 % filter of scars was 5.1 years, for the 10 % filter it was 6.1 years, and for the 25 % filter, representing the most extensive fires, it was 6.4 years. Drought preconditions and dry conditions modulated by the PDO had significant influence on fire occurrence.

Conclusions: Historical reconstruction shows that the fire regime is frequent, of low intensity and with no change over the last four decades. To maintain these characteristics, monitoring and forest fuel management actions are important.

Resumen

Introducción: En México existe conciencia pública creciente sobre los recursos naturales y, en especial, la amenaza a la que están expuestos debido al incremento del de incendios forestales.

Objetivo: Reconstruir el historial de incendios de un periodo de 66 años (1945-2011) y analizar su relación con los factores climáticos en el sureste de Jalisco.

Materiales y métodos: Las muestras de *Pinus douglasiana* Martínez se procesaron de acuerdo con las técnicas dendrocronológicas estándares. El análisis estadístico y la relación de los incendios con el clima se determinaron con ayuda de la librería *burnr* del programa R. Como *proxies* del clima se utilizaron la precipitación invernal y los índices PDSI (índice de severidad de sequía de Palmer) y PDO (oscilación del Pacífico).

Results and discussion: Todas las cicatrices (114) se ubicaron en la zona de crecimiento inicial de la madera temprana; por consiguiente, los incendios ocurrieron durante la primavera (temporada seca). El intervalo medio de frecuencia de incendios para el filtro de 100 % de las cicatrices fue 5.1 años, para el filtro de 10 % fue 6.1 años y para el filtro de 25 %, que representa los incendios más extensos, fue 6.4 años. Las condiciones previas de sequía y las condiciones secas moduladas por el PDO tuvieron influencia significativa en la aparición de los incendios.

Conclusion: La reconstrucción histórica muestra que el régimen del fuego es frecuente, de baja intensidad y sin cambio en las últimas cuatro décadas. Para mantener estas características son importantes las acciones de monitoreo y manejo de combustibles forestales.

Keywords: *Pinus douglasiana*; winter precipitation; Pacific Oscillation; drought severity; fire regime.

Palabras clave: *Pinus douglasiana*; precipitación invernal; oscilación del Pacífico; severidad de sequía; régimen de incendios.

Introduction

Disturbance regimes, characterized by disturbance intensities and frequencies (Keeley & Pausas, 2019; Safford, Hayward, Heller, & Wiens, 2012), modify the structure and function of forest ecosystems and their resilience to future disturbances (Bowd, Blanchard, McBurney, & Lindenmayer, 2021; Keeley & Pausas, 2019; McLauchlan et al., 2020; Quintero-Gradilla, Jardel-Peláez, Cuevas-Guzmán, García-Oliva, & Martínez-Yrizar, 2019). In recent years, disturbance regimes in forests worldwide have been altered by varying climate conditions (Bowd et al., 2021; Seidl et al., 2017), anthropogenic interactions (Bowd et al., 2021; Watson et al., 2018), pathogen attacks (Sturrock et al., 2011), invasive species (Wardle & Peltzer, 2017) and increased fire frequency (Bowd et al., 2021; Keeley & Pausas, 2019; Schoennagel et al., 2017; Seidl, Schelhaas, Rammer, & Verkerk, 2014). According to Seidl et al. (2017), future changes in disturbance are likely to be more prominent in coniferous forests and the boreal biome.

Especially in coniferous forests, fire plays an important role in regeneration processes, composition and forest structure (Ávila-Flores et al., 2014; Galicia, Potvin, & Messier, 2015; Quintero-Gradilla et al., 2019). However, the number of fires has increased and the annual area affected amounts to 3.4 million km², corresponding to 2 % of the Earth's surface (World Wide for Nature & Boston Consulting Group, 2020). According to United Nations reports (United Nations Environment Programme [UNEP], 2022), the risk that wildfires represent to people and the environment is increasing due to several factors, including climate change.

Forest fires in Mexico are a frequent natural disturbance factor in temperate forests (González-Tagle, Schwendenmann, Jiménez Pérez, & Schulz, 2008; Quintero-Gradilla et al., 2019; Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003; Yocom & Fulé, 2012). More than 6 016 fires occurred in Mexico only in 2021, with an affected area of more than 469 000 ha (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2022). Frequent or severe forest fires could facilitate or promote land use change. Therefore, forest fragments are at high risk of disturbance, whether natural or anthropogenic. In this regard, in the region of Tamazula, Jalisco, there have been changes in land use for the establishment of avocado plantations during the last two decades (De la Vega-Rivera & Merino-Pérez, 2021). In the south part of the state, Cerro Prieto is surrounded by agricultural fields, where new avocado plantations are being established, putting forest resources and services at risk. These plantations have replaced forests in many parts and put their ecosystem service functions at risk (Barsimantov & Navia Antezana, 2012).

Introducción

Los regímenes de perturbación, caracterizados por las intensidades y frecuencias de los disturbios (Keeley & Pausas, 2019; Safford, Hayward, Heller, & Wiens, 2012), modifican la estructura y función de los ecosistemas forestales y su resiliencia ante desórdenes futuros (Bowd, Blanchard, McBurney, & Lindenmayer, 2021; Keeley & Pausas, 2019; McLauchlan et al., 2020; Quintero-Gradilla, Jardel-Peláez, Cuevas-Guzmán, García-Oliva, & Martínez-Yrizar, 2019). En los últimos años, los regímenes de perturbación en los bosques de todo el mundo han sido alterados por las condiciones climáticas cambiantes (Bowd et al., 2021; Seidl et al., 2017), interacciones antropogénicas (Bowd et al., 2021; Watson et al., 2018), ataques de patógenos (Sturrock et al., 2011), especies invasoras (Wardle & Peltzer, 2017) y aumento en la frecuencia de incendios (Bowd et al., 2021; Keeley & Pausas, 2019; Schoennagel et al., 2017; Seidl, Schelhaas, Rammer, & Verkerk, 2014). Según Seidl et al. (2017), es probable que los cambios futuros en las perturbaciones sean más pronunciados en los bosques de coníferas y el bioma boreal.

Especialmente en los bosques de coníferas, el fuego juega un papel importante en los procesos de regeneración, composición y estructura forestal (Ávila-Flores et al., 2014; Galicia, Potvin, & Messier, 2015; Quintero-Gradilla et al., 2019); sin embargo, el número de incendios ha incrementado y la superficie anual afectada asciende a los 3.4 millones de km², que corresponde al 2 % de la superficie de la Tierra (World Wide for Nature & Boston Consulting Group, 2020). De acuerdo con los reportes de las Naciones Unidas (United Nations Environment Programme [UNEP], 2022), el riesgo que los incendios forestales representan para las personas y el medio ambiente está aumentando debido a varios factores, incluido el cambio climático.

En México, los incendios forestales son un factor natural de perturbación recurrente en los bosques de climas templados (González-Tagle, Schwendenmann, Jiménez Pérez, & Schulz, 2008; Quintero-Gradilla et al., 2019; Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003; Yocom & Fulé, 2012). Tan solo en el 2021, más de 6 016 incendios ocurrieron en el territorio nacional con una superficie afectada de más de 469 000 ha (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2022). Los incendios forestales frecuentes o severos podrían facilitar o promover el cambio de uso de suelo. Por lo anterior, los fragmentos boscosos están en gran riesgo de sufrir alguna perturbación, ya sea natural o antropogénica. Al respecto, en la región de Tamazula, Jalisco, existieron cambios de uso de suelo para el establecimiento de plantaciones de aguacate durante las últimas dos décadas (De la Vega-Rivera & Merino-Pérez, 2021). En el sur de este estado, el paraje Cerro Prieto se encuentra rodeado de campos agrícolas,

The increase in disturbances has caused multiple researchers to contribute results on forest reference conditions and the ecological role of fire in Mexican vegetation types (Ávila-Flores et al., 2014; Quintero-Gradilla et al., 2019; Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003; Rubio Camacho, González Tagle, Benavides Solorio, Chávez Durán, & Xelhuantzi Carmona, 2017). Reconstructions of fire regimes in forests have increased significantly, due to the lack of climatological and forest fire records in extensive parts of the country (González Tagle, Avila Flores, Himmelsbach, & Cerano Paredes, 2020; Molina-Pérez et al., 2017; Yocom et al., 2010). Understanding past forest fire regimes allows the analysis or interpretation of current trends, a precondition for the development of strategies for the management and protection of forest resources.

Conifers are ideal for dendrochronological studies because many form well-defined growth rings (Escoto-García et al., 2017; Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003). In Mexico, most of them grow in the sierras, which are characterized by diverse orographic conditions generating climate variations at a relatively small scale. This contributes to a great complexity of environmental conditions that complicates the characterization of a large-scale fire regime. In addition, in combination with anthropogenic disturbances, particular conditions are generated within forest areas, which offer a broad spectrum for the study of forest fire regimes (Molina-Pérez et al., 2017; Yocom et al., 2014). In the study area, the southeastern part of Jalisco, *Pinus douglasiana* Martínez is a long-lived species with a wide distribution that has good growth and provides good quality wood (Escoto-García et al., 2017); therefore, it is suitable for dendrochronological studies.

The objectives of this study were 1) to reconstruct the historical fire regime in the southeastern part of Jalisco, 2) to determine the seasonality of fire occurrence, and 3) to analyze the influence of climate on fire incidence. The hypotheses proposed were that the fire regime in forests dominated by *P. douglasiana* has remained unchanged in recent decades and that there is a significant relationship between fire frequency and precipitation patterns.

Materials and Methods

Study area

The study region belongs to the Sierra Madre Occidental located in the southeastern part of Jalisco. The study area is located in Cerro Prieto (Figure 1) in the municipality of Tamazula de Gordiano, which is dominated by a coniferous forest with the presence of *P. douglasiana*, *Pinus devoniana* Lindley, *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. and *Pinus oocarpa* Shiede.

donde se establecen nuevas plantaciones de aguacate, lo cual pone en riesgo los recursos y servicios forestales. Estas han reemplazado los bosques en muchas partes y puesto en riesgo la función de sus servicios ecosistémicos (Barsimantov & Navia Antezana, 2012).

El incremento de los disturbios ha generado que múltiples investigadores aporten resultados sobre las condiciones de referencia forestal y el papel ecológico del fuego en los tipos de vegetación mexicanos (Ávila-Flores et al., 2014; Quintero-Gradilla et al., 2019; Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003; Rubio Camacho, González Tagle, Benavides Solorio, Chávez Durán, & Xelhuantzi Carmona, 2017). Las reconstrucciones de regímenes del fuego en los bosques han incrementado de manera significativa, debido a la falta de registros climatológicos y de incendios forestales en partes extensas del país (González Tagle, Avila Flores, Himmelsbach, & Cerano Paredes, 2020; Molina-Pérez et al., 2017; Yocom et al., 2010). El conocimiento de los regímenes de incendios forestales del pasado permite el análisis o interpretación de las tendencias actuales, una precondition para la elaboración de estrategias de manejo y protección de los recursos forestales.

Las coníferas son ideales para los estudios dendrocronológicos porque muchas forman anillos de crecimiento bien definidos (Escoto-García et al., 2017; Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003). En México, la mayoría de estas crecen en las sierras, las cuales se caracterizan por condiciones orográficas diversas generando variaciones climáticas a una escala relativamente pequeña. Esto contribuye a una gran complejidad de condiciones ambientales que dificulta la caracterización de un régimen de fuego a gran escala. Además, en combinación con las perturbaciones antropogénicas, se generan condiciones particulares dentro de las áreas forestales, lo que ofrece un espectro amplio para la investigación de los regímenes de incendios forestales (Molina-Pérez et al., 2017; Yocom et al., 2014). En el área de estudio, el sureste de Jalisco, *Pinus douglasiana* Martínez es una especie longeva con distribución amplia que presenta buen crecimiento y provee madera de buena calidad (Escoto-García et al., 2017); por lo tanto, es apta para estudios dendrocronológicos.

Los objetivos del presente trabajo fueron 1) reconstruir el régimen histórico del fuego en el sureste de Jalisco, 2) determinar la estacionalidad de ocurrencia de los incendios y 3) analizar la influencia del clima en la incidencia de estos. Las hipótesis planteadas fueron que el régimen del fuego en los bosques dominados por *P. douglasiana* se ha mantenido sin cambios en las últimas décadas y que existe relación significativa en la frecuencia de incendios y los patrones de precipitación.

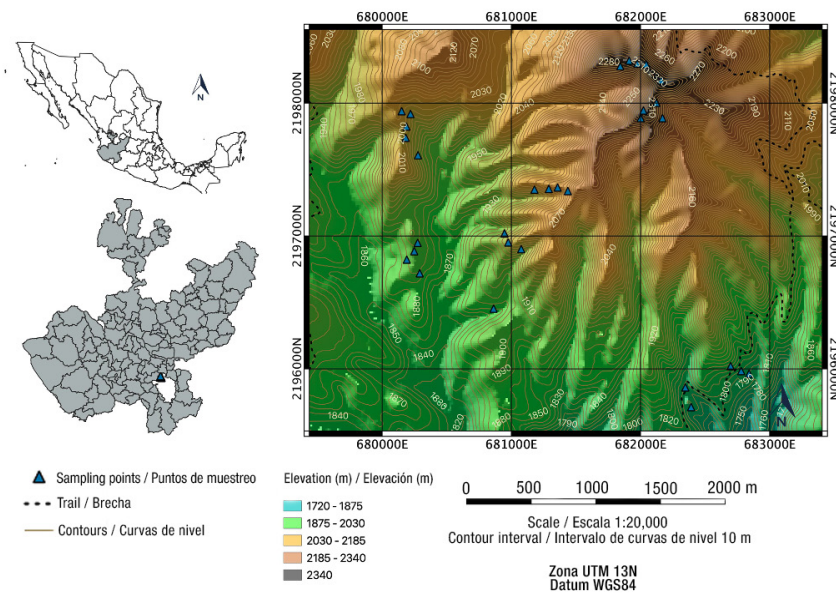


Figure 1. Location of the study area in the municipality of Tamazula de Gordiano, Jalisco. Blue triangles represent the sampled trees of *Pinus douglasiana* within the forest area with coniferous forests.

Figura 1. Localización del área de estudio en el municipio Tamazula de Gordiano, Jalisco. Los triángulos azules representan los árboles muestreados de *Pinus douglasiana* dentro del área forestal con bosques de coníferas.

The climate of the area is Cw_1 type, humid temperate with rainfall in summer (García, 2014), mean annual temperature of 21.5 °C with average minimum temperature of 9.6 °C and average maximum temperature of 32.8 °C. The average annual precipitation is 822 mm, according to climate data for the period 1940-2020 obtained from the Climate Research Unit CRU TS version 4.03 (Harris, Osborn, Jones, & Lister, 2020). In the climogram, presented as Figure 2, two seasons are mainly appreciated: a warm-humid one from May to October and a temperate-dry one from November to April.

The forest area of interest has no fire record prior to 2015. Therefore, to reconstruct the fire records, live trees with well-defined fire scars were sampled. As a selection criterion, long-lived individuals with at least three fire scars were used.

Through Sentinel 2A satellite imagery, the Normalized Burn Ratio (NBR) for the study area from 2017 was determined. The NBR analysis is based on the comparison of satellite imagery before and after a fire. The reference image was taken in December or January (pre-fire) and the post-fire image was taken during the spring months (April and May). Finally, using Google Earth Engine (Petropoulos, Griffiths, & Kalivas, 2014) maps were produced (Figure 3) representing the presence of wildfires for the last six years (2017-2022). Fire severity was classified based on criteria established by the United States Geological Survey (USGS) from the differential NBR (dNBR) (Keeley, 2009).

Materiales y métodos

Área de estudio

La región de trabajo pertenece a la Sierra Madre Occidental ubicada en el sureste de Jalisco. El área de estudio se encuentra en el paraje Cerro Prieto (Figura 1) del municipio de Tamazula de Gordiano, en el cual domina un bosque de coníferas con presencia de *P. douglasiana*, *Pinus devoniana* Lindley, *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. y *Pinus oocarpa* Shiede.

El clima del área es del tipo Cw_1 , templado húmedo con lluvias en verano (García, 2014), temperatura media anual de 21.5 °C con mínimas promedio de 9.6 °C y máximas promedio de 32.8 °C. La precipitación promedio anual es 822 mm, de acuerdo con los datos climáticos para el periodo 1940-2020 obtenidos de la Unidad de Investigación Climática CRU TS versión 4.03 (Harris, Osborn, Jones, & Lister, 2020). En el climograma, presentado como Figura 2, se aprecian principalmente dos estaciones: una cálida-húmeda de mayo a octubre y una templada-seca de noviembre a abril.

El área forestal de interés no cuenta con un registro de incendios antes del año 2015. Por tanto, para reconstruir el historial de incendios, se tomaron muestras de árboles vivos con cicatrices de incendios bien definidos. Como criterio de selección se consideraron individuos longevos y que tuvieran mínimo tres cicatrices de incendios.

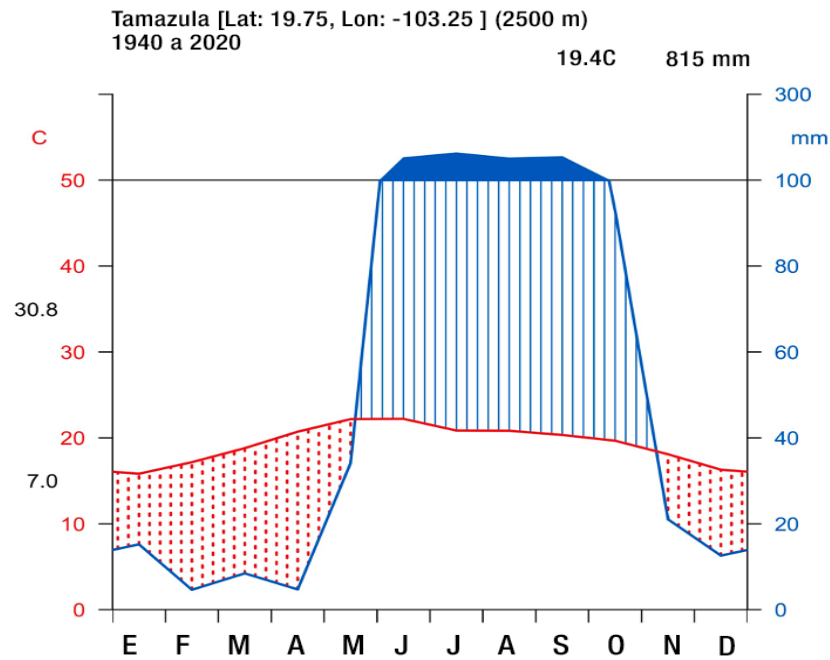


Figure 2. Walter-Lieth climogram for precipitation and mean monthly temperature for the period 1940-2020 in the southeastern part of Jalisco, according to data obtained from the Climate Research Unit CRU TS version 4.03.

Figura 2. Climograma de Walter-Lieth para la precipitación y temperatura media mensual del periodo 1940-2020 en el sureste de Jalisco, de acuerdo con los datos obtenidos de la Unidad de Investigación Climática CRU TS versión 4.03.

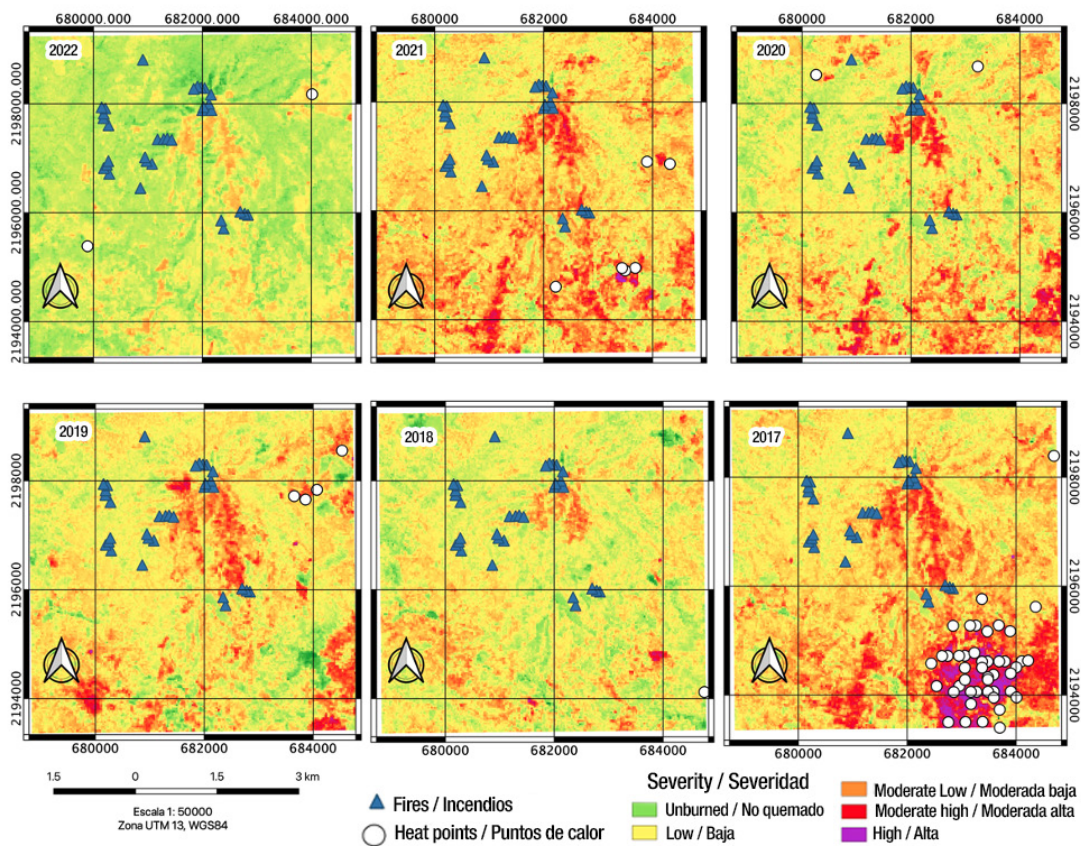


Figure 3. Forest fire severity in the period 2017-2022 in the southeastern part of the state of Jalisco, from the analysis of Sentinel 2A satellite imagery.

Figura 3. Severidad de los incendios forestales en el periodo 2017-2022 en el sureste del estado de Jalisco, a partir del análisis de imágenes de satélite Sentinel 2A.

Field methods

Sampling was selective in an area of about 20 ha (Figure 1) including remote areas, where forest roads and trails are used for access. Sampling was designed in this way to collect the greatest number of fire occurrence dates on trees with evidence of fire damage (Azpeleta Tarancón, Fulé, Sánchez Meador, Kim, & Padilla, 2018; Meunier & Shea, 2020). Part sections of dead (standing or felled) and live trees with well-preserved scars and as long-lived as possible were removed using a chainsaw (Sthil MS 361) (Yocom Kent, 2014). Geographic coordinates of the sampled specimens were recorded for the spatial distribution representation using a map (Figure 1). A total of 35 fire-scarred samples were collected (34 from live trees and one from a dead tree).

Laboratory methods

Samples were air-dried and polished with 80 to 1200 sandpaper for better visualization of growth rings (González Tagle et al., 2020; Phipps, 1985). Each sample was predated by comparing and similarity of growth patterns and then determining the exact year of formation of each of the growth rings through the comparison of growth patterns called cross dating (Bunn, 2010). The width of each ring was measured with the VELMEX measurement system (USA) with an accuracy of 0.001 mm and Measure J2X software (VoorTech Consulting, 2021). A master chronology was developed based on the annual growths of *P. douglasiana*, which was also used as a reference for the correct dating of the scarred samples (Yocom et al., 2010). The quality of the dating was monitored with COFECHA software (Grissino-Mayer, 2001a). Fire seasonality was estimated based on the relative position of each of the scars in the annual ring, according to the following categories: early earlywood (EE), middle earlywood (ME), late earlywood (LE), latewood (L), and dormant (D). For practical purposes, scars were grouped into two periods: 1) spring (D + EE) and 2) summer (ME + LE + L) (Grissino-Mayer, 2001b).

Data analysis

Historical fire frequency was analyzed using the burnr library in the R program version 4.0.4 (Malevich, Guiterman, & Margolis, 2018). The statistics generated by the program were: mean fire frequency interval (MFI), maximum and minimum intervals between fires, and Weibull mean probability interval (WMPI). The Weibull distribution, which has been used to describe fire regimes, is flexible, can fit asymmetric data sets, and provides a standard way of comparing fire regimes (Grissino-Mayer, 1999). For each statistical analysis, 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

A través de imágenes de satélite Sentinel 2A se determinó el Índice Normalizado de Área Quemada (NBR, Normalized Burn Ratio) para el área de estudio a partir del 2017. El análisis NBR se basa en la comparación de imágenes satélite antes y después de un incendio. La imagen de referencia se tomó en diciembre o enero (preincendio) y la imagen posincendio se tomó durante los meses de primavera (abril y mayo). Finalmente, con el uso de Google Earth Engine (Petropoulos, Griffiths, & Kalivas, 2014) se elaboraron mapas (Figura 3) que representaron la presencia de incendios forestales durante los últimos seis años (2017-2022). La severidad de los incendios se clasificó con base en los criterios establecidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) a partir del diferencial del NBR (dNBR) (Keeley, 2009).

Métodos de campo

El muestreo fue selectivo en un área de aproximadamente 20 ha (Figura 1) incluyendo áreas remotas, donde se utilizan caminos forestales y senderos para el acceso. El muestreo se diseñó de esta manera para obtener el mayor número de fechas de ocurrencia de incendios en los árboles con evidencias de daños por el fuego (Azpeleta Tarancón, Fulé, Sánchez Meador, Kim, & Padilla, 2018; Meunier & Shea, 2020). Con el apoyo de una motosierra (marca Sthil MS 361) se removieron secciones parciales de individuos muertos (en pie o derribados) y de árboles vivos que tuvieran cicatrices bien preservadas y lo más longevas posibles (Yocom Kent, 2014). Las coordenadas geográficas de los individuos muestreados se registraron para la representación de su distribución espacial mediante un mapa (Figura 1). En total se colectaron 35 muestras con cicatrices de incendios (34 de árboles vivos y una de un árbol muerto).

Métodos de laboratorio

Las muestras se secaron al aire y se pulieron con granos de lijas de 80 al 1 200 para una mejor visualización de los anillos de crecimiento (González Tagle et al., 2020; Phipps, 1985). Cada muestra se prefechó mediante la comparación y similitud de los patrones de crecimiento para después determinar el año exacto de formación de cada uno de los anillos de crecimiento a través de la comparación de los patrones de crecimiento llamada *crossdating* o datado cruzado (Bunn, 2010). El ancho de cada anillo se midió con el sistema de medición VELMEX (EUA) con precisión de 0.001 mm y el software Measure J2X (VoorTech Consulting, 2021). Se desarrolló una cronología maestra con base en los crecimientos anuales de *P. douglasiana*, la cual también se usó como referencia para el fechado correcto de las muestras con cicatrices (Yocom et al., 2010). La calidad de los fechados se supervisó con el *software* COFECHA (Grissino-Mayer, 2001a). La estacionalidad de los incendios se estimó con

(Malevich et al., 2018; Yocom Kent, 2014). The latter allowed determining the intervals of the most extensive and severe fires. The relationship between climate variability and fires was determined by the superposed epoch analysis (SEA) of the *burnr* package in R (Malevich et al., 2018). In general, information about past climate conditions is preserved in historical records and indicators called proxies, which show evidence that can be used to infer climate (Luckman, 2013).

As climate proxies, we used 1) winter precipitation for the area, data obtained using CRU TS Climate Research Unit version 4.03 (Harris et al., 2020), 2) the Palmer Drought Severity Index (PDSI; Stahle et al., 2016), and 3) the Pacific Decadal Oscillation Index (PDO; National Centers for Environmental Information [NCEI], 2021). All proxies were compared for the year of the fire, five years before the fire, and two years after the fire (Malevich et al., 2018).

Results and Discussion

Fire records

In total, 114 scars were successfully dated to the exact year of formation. The scars correspond to 30 samples from living trees (86 %), one sample from a dead tree (3 %) and four samples (11 %) where it was impossible to date scars due to decay.

The fire record was reconstructed for the period 1945-2011, because the study trees showed no evidence of fire between 1807 and 1944 (137 years). The first scar was identified in 1945 and the last one in 2011; for this 66-year period, 14 fires were detected corresponding to the analysis of 100 % of scars. Table 1 shows that, for the 10 % filter of the scars determined in all samples, the period of record includes the years 1962 to 2011 (49 years) with nine fires. The analysis applied with the 25 % filter showed six fires in the period 1979-2011 (32 years). According to Figure 4, three years accounted for 36 % of the scars recorded: 1988 (n = 22), 1996 (n = 19) and 2003 (n = 21). Based on the records of the Forest Management Unit (UMAFOR) 1404, the area was under management from 1945 to 1997; therefore, there is a high probability that the trees with older fire records were harvested. In addition, forest fire protection and control plans were implemented as documented in other studies in the Sierra Madre Occidental (Cerano-Paredes et al., 2015; Molina-Pérez et al., 2017).

Seasonality of fires

For the study area, all scars (100 %) were located in the growth zone of early earlywood (EE); consequently, fires in the area occurred during the spring corresponding to the dry season (Figure 2). This same seasonality pattern is repeated in other areas of the Sierra Madre

base en la posición relativa de cada una de las cicatrices en el anillo anual, de acuerdo con las categorías siguientes: inicio de la madera temprana (EE), mitad de la madera temprana (ME), final de la madera temprana (LE), madera tardía (L) y dormancia (D). Para fines prácticos, las cicatrices se agruparon en dos periodos: 1) primavera (D + EE) y 2) verano (ME + LE + L) (Grissino-Mayer, 2001b).

Análisis de datos

La frecuencia histórica de incendios se analizó con la librería *burnr* en el programa R versión 4.0.4 (Malevich, Guiterman, & Margolis, 2018). 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). La distribución de Weibull, que se ha utilizado para describir los regímenes de incendios, es flexible, capaz de ajustarse a conjuntos de datos asimétricos y proporciona una forma estándar de comparación de regímenes de incendios (Grissino-Mayer, 1999). Para cada análisis 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 (Malevich et al., 2018; Yocom Kent, 2014). 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) de la paquetería *burnr* en R (Malevich et al., 2018). En general, la información sobre las condiciones climáticas del pasado se conserva en los registros históricos e indicadores llamados *proxy*, los cuales presentan evidencia que se puede usar para inferir el clima (Luckman, 2013).

Como *proxies* del clima se utilizaron 1) la precipitación invernal del área, datos obtenidos mediante la Unidad de Investigación Climática CRU TS versión 4.03 (Harris et al., 2020), 2) el índice de sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés; Stahle et al., 2016) y 3) el Índice Oscilación del Pacífico (PDO; National Centers for Environmental Information [NCEI], 2021). Todos los *proxies* se compararon para el año del incendio, cinco años anteriores y dos años posteriores al mismo (Malevich et al., 2018).

Resultados y discusión

Historial de incendios

En total, 114 cicatrices se fecharon exitosamente al año exacto de su formación. Las cicatrices corresponden a 30 muestras de árboles vivos (86 %), una muestra de un

Occidental such as in Durango (Molina-Pérez et al., 2017), Jalisco (Cerano-Paredes et al., 2015) and Puebla (Cerano-Paredes et al., 2016), where 92.2 %, 98.3 % and 91.7 % of fires, respectively, occurred in the spring.

Historical fire regimes

The fire record for the period 1945-2011 was used to determine the frequency statistics. When considering 100 % scars, the mean fire frequency interval (MFI) was 5.1 years; for the 10 % filter, the MFI was 6.1 years; and for the 25 % filter, which represents the most extensive fires in the area, the MIF was 6.4 years (Table 1). The Weibull median probability interval (WMPI) was similar to the MFI showing the pattern of increasing as the filters were applied (Table 1). In short, the average fire return periods in the area were quite short (5.1 to 6.4 years); however, it is very likely that fire intensity was low, as has been determined in other studies along the Sierra Madre Occidental (Molina-Pérez et al., 2017; Sáenz-Ceja & Pérez-Salicrup, 2019). As a consequence, the frequent reduction of fuels in the area is promoted, which reduces the probability of large fires (Fulé et al., 2012) resulting in severe impacts to the forest,

árbol muerto (3 %) y cuatro muestras (11 %) en las que fue imposible datar sus cicatrices debido al deterioro.

El historial del fuego se reconstruyó para el periodo 1945-2011, ya que los árboles de estudio no mostraron evidencia de incendios entre 1807 y 1944 (137 años). La primera cicatriz identificada apareció en 1945 y la última en el 2011; para este periodo de 66 años se identificaron 14 incendios correspondientes al análisis del 100 % de las cicatrices. El Cuadro 1 indica que, para el filtro de 10 % de las cicatrices determinadas en todas las muestras, el periodo de registro comprende los años de 1962 a 2011 (49 años) con nueve incendios. Asimismo, el análisis aplicado con el filtro de 25 % evidenció seis incendios en el periodo 1979-2011 (32 años). Acorde con la Figura 4, tres años concentraron 36 % de las cicatrices registradas: 1988 (n = 22), 1996 (n = 19) y 2003 (n = 21). Según los registros de la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) 1404, el área se encontró bajo manejo a partir de 1945 hasta 1997; por consiguiente, existe probabilidad alta de que los árboles con registro de incendios más antiguos fueran extraídos para su aprovechamiento. Además, se implementaron planes de protección y control de incendios forestales

Table 1. Statistics of forest fire intervals in the municipality of Tamazula de Gordiano, Jalisco, for the period 1945-2011. The analysis is based on 114 scars dated in the periods of spring, autumn and winter.

Cuadro 1. Estadísticas de los intervalos de incendios forestales en el ejido Tamazula de Gordiano, Jalisco, para el periodo 1945-2011. El análisis se basa en 114 cicatrices datadas en los periodos de primavera.

Filters/ Filtros	100 %	25 %	10 %
Range of events/ Rango de eventos	1945-2011	1979-2011	1962-2011
Number of intervals/ Número de intervalos	13	5	8
MFI (years)/ MFI (años)	5.1	6.4	6.1
WMPI (years)/ WMPI (años)	4.3	6.5	5
Minimum frequency interval between fires (years)/ Intervalo mínimo de frecuencia entre incendios (años)	1	3	1
Maximum frequency interval between fires (years)/ Intervalo máximo de frecuencia entre incendios (años)	12	8	17

MFI: mean fire frequency interval; WMPI: Weibull median probability interval. / MFI: intervalo medio de frecuencia de incendios; WMPI: intervalo mediano de probabilidad de Weibull.

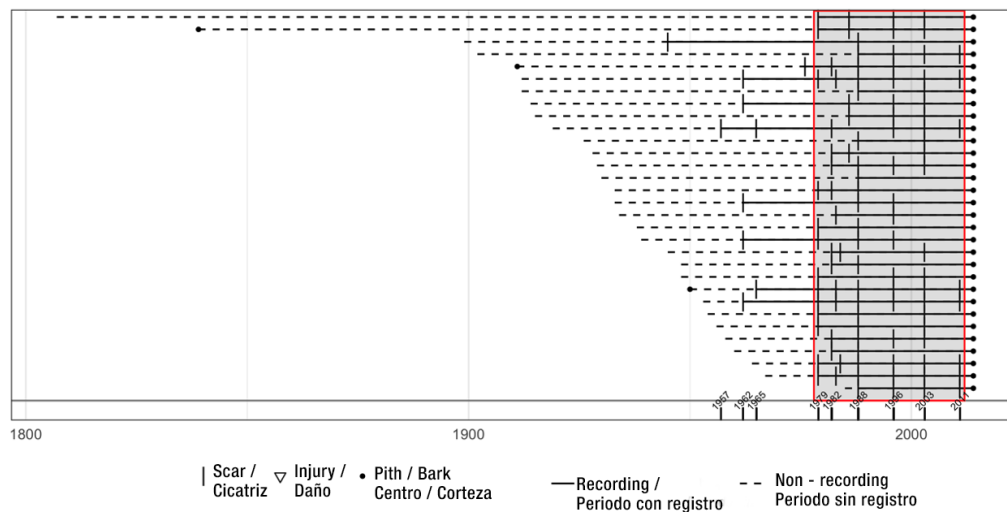


Figure 4. Fire records in a coniferous forest in the municipality of Tamazula de Gordiano in Jalisco, Mexico. The years in which fires were recorded, applying the 25 % filter, are shown enclosed in the gray box on the secondary X-axis.
Figura 4. Historial del fuego en un bosque de coníferas en el municipio de Tamazula de Gordiano en Jalisco, México. Los años en los que se registraron incendios, aplicando el filtro de 25 %, se muestran encerrados en el recuadro gris en el eje secundario de las X.

changing the structure and species composition (Ávila-Flores et al., 2014).

For all fire scars, a WMPI of 4.3 years was determined. Considering the filter of 10 % of fire scars, the WMPI was 5. For the most extensive fires (>25 %), the periods between fires were longer (6.5 years) than for the least extensive fires (Table 1). Contrary to that recorded in studies in similar forests in the Sierra Madre Oriental (Yocom et al., 2010, 2014), a clear interruption of fires is seen after 1940. Moreover, it is observed that the most extensive and severe fires occurred from 1979 onwards (Figure 4). This pattern of increase in fires and severity during the 1970s has also been recorded in Durango (Molina-Pérez et al., 2017) and Jalisco (Cerano-Paredes et al., 2015).

Fire-climate relationship

For the period from 1945 to 2011, which includes the most extensive events (filter 25 %), superposition epoch analyses (SEA) indicated that the reconstructed fires in the forests of southeastern part of Jalisco occurred during years with below-average precipitation values and negative PSDI values (Figure 5a and 5b); while three years prior to the fire, the proxies winter precipitation and PDO showed negative values (dry conditions) significantly ($P < 0.05$) (Figure 5a and 5c). PSDI also shows negative values three years prior; however, they are not significant (Figure 5b). Similar results have been documented in regions close to the study area, where the presence of fires was associated with below average

como se ha documentado en otros estudios en la Sierra Madre Occidental (Cerano-Paredes et al., 2015; Molina-Pérez et al., 2017).

Estacionalidad de los incendios

Para el área de estudio, todas las cicatrices (100 %) se ubicaron en la zona de crecimiento inicial de la madera temprana (EE); por consiguiente, los incendios en el área se presentaron durante la primavera que corresponde a la temporada seca (Figura 2). Este mismo patrón de estacionalidad se repite en otras áreas de la Sierra Madre Occidental como por ejemplo en Durango (Molina-Pérez et al., 2017), Jalisco (Cerano-Paredes et al., 2015) y Puebla (Cerano-Paredes et al., 2016), donde 92.2 %, 98.3 % y 91.7 % de los incendios, respectivamente, ocurrieron en primavera.

Régimen histórico de incendios

El registro de incendios en el periodo 1945-2011 sirvió para determinar las estadísticas de frecuencia. Al considerar 100 % de cicatrices, el intervalo medio de frecuencia de incendios (MFI, por sus siglas en inglés) fue de 5.1 años; para el filtro del 10 %, el MFI fue de 6.1 años; y para el filtro de 25 %, que representa los incendios más extensos en el área, el MIF fue de 6.4 años (Cuadro 1). El intervalo mediano de probabilidad de Weibull (WMPI, por sus siglas en inglés) fue similar al MFI mostrando el patrón de incremento a medida que los filtros se aplican (Cuadro 1). En definitiva, los periodos de retorno promedio de los incendios en el

precipitation values and wet conditions preceding the occurrence of fires (Cerano-Paredes et al., 2015; Fulé, Villanueva-Díaz, & Ramos-Gómez, 2005).

Most of the reconstructed fires for the 1944-2011 period were recorded under below-average winter precipitation conditions (10 of 14 fires, 75 %; Figure 6a) and in dry periods of the PDSI (10 of 14 fires, 75 %; Figure 6b). For the PDO index, half of the events were recorded under negative conditions mainly between 1940 and 1980. This is consistent with variations in the magnitude of this phenomenon usually prevailing over several decades (Mantua, Hare, Zhang, Wallace, & Francis, 1997). Fires between 1940 and 1980 developed in a combination of low winter precipitation and negative PDO values (Figure 6a and 6c). The effects of this combination have been documented as conditions that favor the occurrence of wildfires in Mexico (Cerano-Paredes et al., 2019). The consequences of the combination of certain weather phenomena (PDO, PDSI and winter precipitation) are usually more important in the formation of periods with greater

área son bastantes cortos (5.1 a 6.4 años); sin embargo, es muy probable que la intensidad de estos sea baja, tal como se ha determinado en otros estudios a lo largo de la Sierra Madre Occidental (Molina-Pérez et al., 2017; Sáenz-Ceja & Pérez-Salicrup, 2019). Consecuentemente, se promueve la frecuente reducción de combustibles en el área, lo que disminuye la probabilidad de incendios de grandes magnitudes (Fulé et al., 2012) que traen consigo impactos graves al bosque, los cuales modifican la estructura y la composición de especies (Ávila-Flores et al., 2014).

Para todas las cicatrices de incendios se determinó un WMPI de 4.3 años. Al considerar el filtro del 10 % de las cicatrices, el WMPI fue de 5. En el caso de los incendios más extensos (>25 %), los periodos entre estos fueron más amplios (6.5 años) que entre los menos extensos (Cuadro 1). Contrariamente a lo registrado en estudios en bosques similares en la Sierra Madre Oriental (Yocom et al., 2010, 2014), se aprecia una clara interrupción de los incendios a partir de 1940; además, se observa que los incendios más extensos y severos ocurrieron a

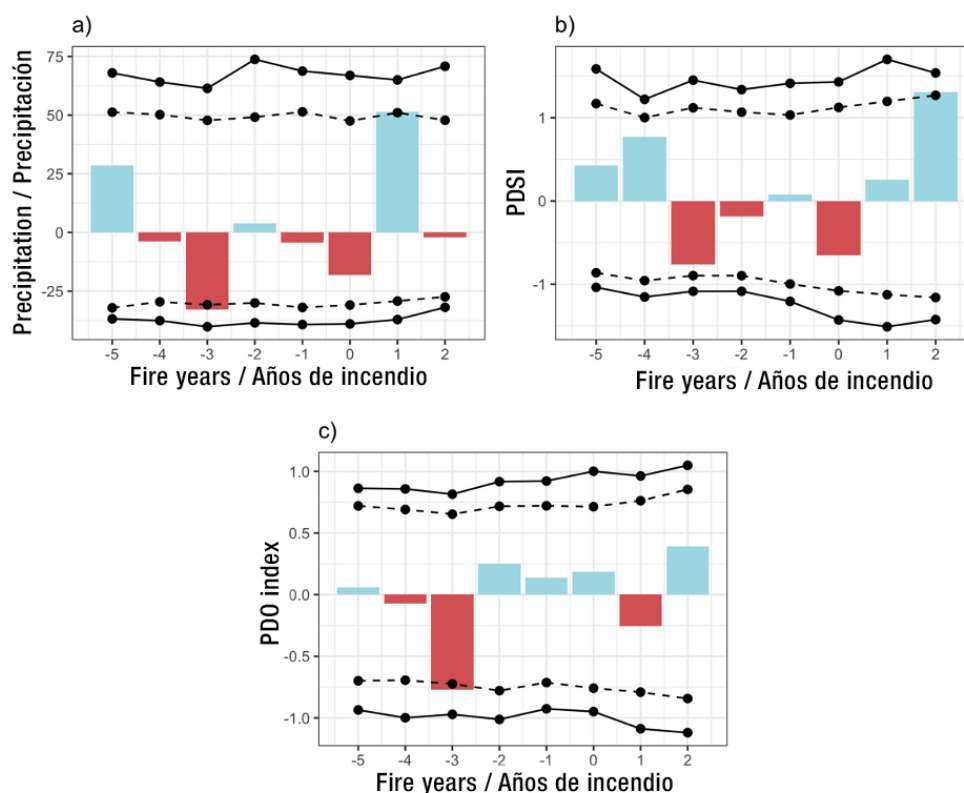


Figure 5. Superposition epoch analysis (SEA): a) relationship between fire occurrence and regional climate (winter precipitation), b) PDSI (Palmer Drought Severity Index) and c) PDO (Pacific Drought Oscillation) index. The fire year is indicated by 0, conditions five years before the fire (negative values) and two years after the fire (positive values). The top and bottom two lines represent the 95 % and 99 % confidence intervals.

Figura 5. Análisis de sobreposición de época (SEA): a) relación entre la ocurrencia de incendio con el clima regional (precipitación invernal), b) PDSI (Índice de Severidad de Sequía de Palmer) y c) índice PDO (oscilación del Pacífico). El año del incendio está indicado por el 0, condiciones cinco años previos al incendio (valores negativos) y dos años posteriores al incendio (valores positivos). Las dos líneas superiores e inferiores representan los intervalos de confianza al 95 % y 99 %.

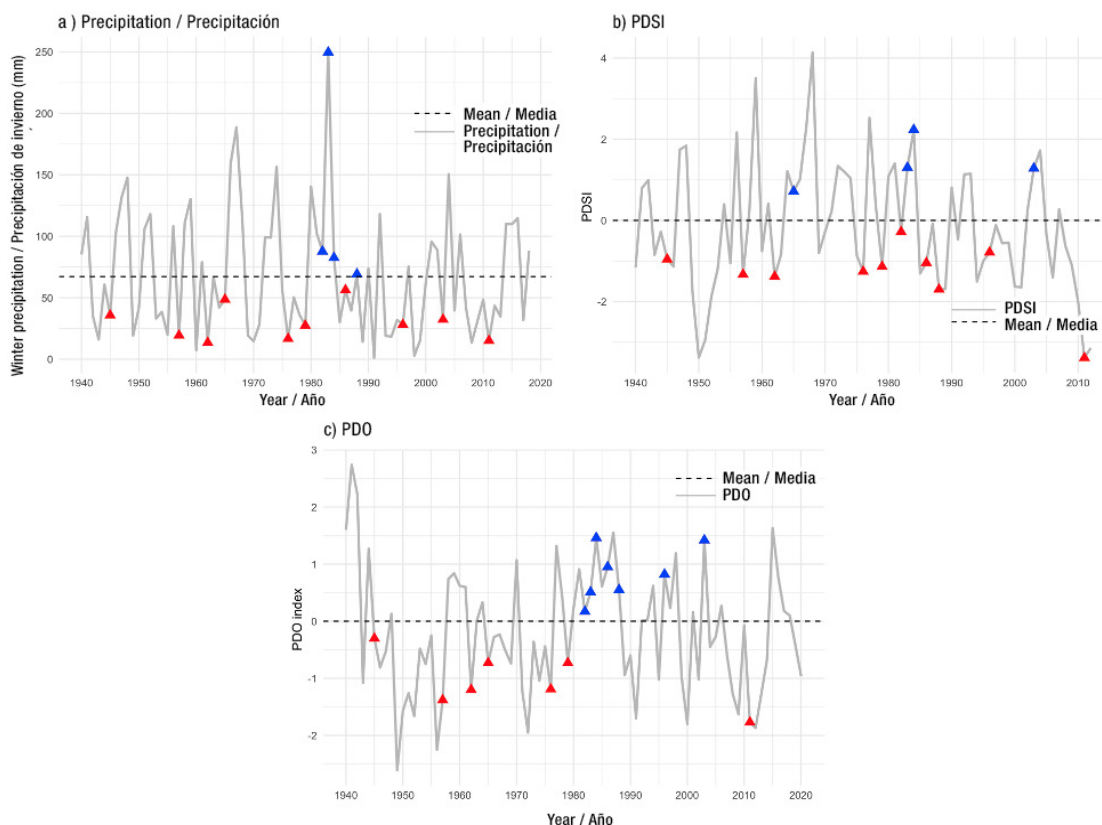


Figure 6. Annual climate condition during fire years (triangles) in the period 1944-2011 in the southeastern part of Jalisco: a) winter precipitation, b) PDSI (Palmer Drought Severity Index) and c) PDO (Pacific Drought Oscillation) index.
Figura 6. Condición anual del clima durante años de incendio (triángulos) en el periodo 1944-2011 en el sureste de Jalisco: a) precipitación invernal, b) PDSI (índice de severidad de sequía de Palmer) y c) índice PDO (oscilación del Pacífico).

abnormality in weather patterns than in comparison with single weather events (Pavia, Graef, & Reyes, 2006).

Conclusions

The forest fire regime in the southeastern part of Jalisco is considered frequent, of low intensity and unchanged in the last four decades. Therefore, the first hypothesis is confirmed that the fire regime in forests dominated by *Pinus douglasiana* has not changed; the relationship between fire frequency and precipitation patterns in the area is also significant. Previous drought conditions had a significant influence on the occurrence of fires. This information is very important for the recognition of periods with a higher probability of fire occurrence. To maintain these characteristics, fire management is essential, including monitoring and management of forest fuels to prevent large forest fires. In addition, it is important to raise awareness among people in forest areas about the use of fire and the risks it poses to forests.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for funding provide

partir de 1979 (Figura 4). Este patrón de incremento en incendios y severidad durante la década de 1970 se ha registrado igualmente en Durango (Molina-Pérez et al., 2017) y Jalisco (Cerano-Paredes et al., 2015).

Relación clima-incendios

Para el periodo de 1945 a 2011, que contempla los eventos más extensos (filtro 25 %), los análisis de sobreposición de época (SEA, por sus siglas en inglés) indicaron que los incendios reconstruidos en los bosques del sureste de Jalisco ocurrieron durante años con valores de precipitación por debajo de la media y valores negativos de PSDI (Figura 5a y 5b); mientras que tres años previos al incendio, los proxies precipitación invernal y PDO presentaron valores negativos (condiciones secas) de manera significativa ($P < 0.05$) (Figuras 5a y 5c). El PDSI también muestra valores negativos tres años previos; sin embargo, no son significativos (Figura 5b). Resultados similares se han documentado en regiones cercanas al área de estudio, donde la presencia de incendios fue asociada con valores de precipitación por debajo de la media y condiciones húmedas que antecedieron la ocurrencia de los incendios (Cerano-Paredes et al., 2015; Fulé, Villanueva-Díaz, & Ramos-Gómez, 2005).

to this research, national grant number 331445 and the Programa de Investigación Científica y Tecnológica (PAICYT) 54-CAT-2022 of the Universidad Autónoma de Nuevo León. In addition, we thank the reviewers for their valuable comments and suggestions for the improvement of this manuscript.

La mayoría de los incendios reconstruidos para el periodo 1944-2011 se registró en condiciones de precipitación invernal por debajo de la media (10 de 14 incendios, 75 %; Figura 6a) y en periodos secos del PDSI (10 de 14 incendios, 75 %; Figura 6b). Para el índice PDO, la mitad de los eventos se registró en condiciones negativas principalmente entre 1940 y 1980. Esto es consistente con las variaciones en la amplitud de este fenómeno que suele prevalecer durante varias décadas (Mantua, Hare, Zhang, Wallace, & Francis, 1997). Los incendios entre 1940 y 1980 se desarrollaron en una combinación de baja precipitación invernal y valores negativos del PDO (Figura 6a y 6c). Los efectos de esta combinación han sido documentados como condiciones que favorecen la ocurrencia de incendios forestales en México (Cerano-Paredes et al., 2019). Generalmente, las consecuencias de la combinación de ciertos fenómenos climáticos (PDO, PDSI y precipitación invernal) son más influyentes en la formación de periodos con mayor anomalía en los patrones climáticos que en comparación con eventos climáticos únicos (Pavia, Graef, & Reyes, 2006).

Conclusiones

El régimen de incendios forestales en el sureste de Jalisco se considera frecuente, de baja intensidad y sin cambio en las últimas cuatro décadas. Por tanto, se confirma la primera hipótesis de que el régimen del fuego en los bosques dominados por *Pinus douglasiana* no se ha modificado; asimismo, la relación entre la frecuencia de incendios y los patrones de precipitación en el área es significativa. Las condiciones previas de sequía tuvieron influencia significativa en la aparición de los incendios. Esta información es de suma importancia para el reconocimiento de periodos con mayor probabilidad de que ocurra un incendio. Para mantener estas características es primordial el manejo del fuego, a través del monitoreo y manejo de combustibles forestales para la prevención de incendios forestales de gran magnitud. Adicionalmente, es importante sensibilizar a las personas en las áreas forestales sobre el uso del fuego y sus riesgos en los bosques.

Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo a esta investigación mediante la beca nacional número 331445 y al Programa de Investigación Científica y Tecnológica (PAICYT) 54-CAT-2022 de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Además, agradecemos a los revisores por sus valiosas observaciones y sugerencias para la mejora del manuscrito.

End of English version

Fin de la versión en español

References / Referencias

- Ávila-Flores, D. Y., González-Tagle, M. A., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E., Vargas-Larreta, B., & Alanís-Rodríguez, E. (2014). Efecto de la severidad del fuego en las características de la estructura forestal en rodales de coníferas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(1), 33–45. doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.01.005
- Azpeleta Tarancón, A., Fulé, P. Z., Sánchez Meador, A. J., Kim, Y. S., & Padilla, T. (2018). Spatiotemporal variability of fire regimes in adjacent Native American and public forests, New Mexico, USA. *Ecosphere*, 9(11), e02492. doi: 10.1002/ecs2.2492
- Barsimantov, J., & Navia Antezana, J. (2012). Forest cover change and land tenure change in Mexico's avocado region: Is community forestry related to reduced deforestation for high value crops? *Applied Geography*, 32(2), 844–853. doi: 10.1016/j.apgeog.2011.09.001
- Bowd, E., Blanchard, W., McBurney, L., & Lindenmayer, D. (2021). Direct and indirect disturbance impacts on forest biodiversity. *Ecosphere*, 12(12). doi: 10.1002/ECS2.3823
- Bunn, A. G. (2010). Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia*, 28(4), 251–258. doi: 10.1016/j.dendro.2009.12.001
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Fulé, P., Yocom, L., Esquivel-Arriaga, G., & Jardel-Peláez, E. (2015). Historia de incendios en un bosque de pino de la sierra de Manantlán, Jalisco, México. *Bosque (Valdivia)*, 36(1), 41–52. doi: 10.4067/S0717-92002015000100005
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Cervantes-Martínez, R., Esquivel-Arriaga, G., Guerra-de la Cruz, V., & Fulé, P. (2016). Régimen histórico de incendios y su relación con el clima en un bosque de *Pinus hartwegii* al norte del estado de Puebla, México. *Bosque (Valdivia)*, 37(2), 389–399. doi: 10.4067/S0717-92002016000200017
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Cervantes-Martínez, R., Magaña-Rueda, V. O., Constante-García, V., ... Valdez-Cepeda, R. D. (2019). Climatic influence on fire regime (1700 to 2008) in the Nazas watershed, Durango, Mexico. *Fire Ecology*, 15(9). doi: 10.1186/s42408-018-0020-x
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2022). Cierre estadístico de incendios 2021. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/691111/Cierre_de_la_Temporada_2021.pdf
- De la Vega-Rivera, A., & Merino-Pérez, L. (2021). Socio-environmental impacts of the avocado boom in the Meseta Purépecha, Michoacán, Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 13(13). doi: 10.3390/su13137247
- Escoto-García, T., Beas-Beas, N., Contreras-Quiñones, J. H., Rodríguez-Rivas, A., Díaz-Ramos, S. G., Anzaldo-Hernández, J., & Vega-Elvira, R. (2017). Chemical-micrographic and dasometric characterization of three pine species and their viability for integral harvesting. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(41). Retrieved from <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v8n41/2007-1132-remcf-8-41-00109-en.pdf>
- 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(2), 320–330. doi: 10.1139/x04-173
- Fulé, P. Z., Yocom, L. L., Montaña, C. C., Falk, D. A., Cerano, J., & Villanueva-Díaz, J. (2012). Testing a pyroclimatic hypothesis on the Mexico-United States border. *Ecology*, 93(8), 1830–1840. doi: 10.1890/11-1991.1
- Galicia, L., Potvin, C., & Messier, C. (2015). Maintaining the high diversity of pine and oak species in Mexican temperate forests: a new management approach combining functional zoning and ecosystem adaptability. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(10), 1358–1368. doi: 10.1139/cjfr-2014-0561
- García, E. (2014). *Modificaciones al sistema de clasificación Köppen* (5.a ed.). México: Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf
- González Tagle, M., Avila Flores, D. Y., Himmelsbach, W., & Cerano Paredes, J. (2020). Fire history of conifer forests of Cerro el Potosí, Nuevo León, Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 64(3–4), 203–209. doi: 10.1894/0038-4909-64.3-4.203
- González-Tagle, M., Schwendenmann, L., Jiménez Pérez, J., & Schulz, R. (2008). Forest structure and woody plant species composition along a fire chronosequence in mixed pine–oak forest in the Sierra Madre Oriental, Northeast Mexico. *Forest Ecology and Management*, 256(1–2), 161–167. doi: 10.1016/j.foreco.2008.04.021
- Grissino-Mayer, H. D. (1999). Modeling fire interval data from the American southwest with the Weibull distribution. *International Journal of Wildland Fire*, 9(1), 37–50. Retrieved from <http://www.publish.csiro.au/paper/WF99004>
- Grissino-Mayer, H. D. (2001a). Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205–221. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/251654/trr-57-02-205-221.pdf>
- Grissino-Mayer, H. D. (2001b). FHx2-Software for analyzing temporal and spatial patterns in fire regimes from tree rings. *Tree Ring Research*, 51(1), 115–124. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/handle/10150/262559>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7(1), 109. doi: 10.1038/s41597-020-0453-3
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116. doi: 10.1071/WF07049
- Keeley, J. E., & Pausas, J. G. (2019). Distinguishing disturbance from perturbations in fire-prone ecosystems. *International Journal of Wildland Fire*, 28(4), 282–287. doi: 10.1071/WF18203

- Luckman, B. H. (2013). Dendroclimatology. In Scott A. Elias, & Cary J. Mock (Eds.), *Encyclopedia of quaternary science* (pp. 459–470). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-444-53643-3.00354-X
- Malevich, S. B., Guiterman, C. H., & Margolis, E. Q. (2018). burnr: Fire history analysis and graphics in R. *Dendrochronologia*, 49, 9–15. doi: 10.1016/j.dendro.2018.02.005
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., & Francis, R. C. (1997). A pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), 1069–1079. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078
- McLauchlan, K. K., Higuera, P. E., Miesel, J., Rogers, B. M., Schweitzer, J., Shuman, J. K., ...Watts, A. C. (2020). Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *Journal of Ecology*, 108(5), 2047–2069. doi: 10.1111/1365-2745.13403
- Meunier, J., & Shea, M. E. (2020). Applying the usual rules to an unusual ecological situation: Fire rotation in Great Lakes Pine Forests. *Forest Ecology and Management*, 472(118246), 1–11. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118246
- Molina-Pérez, I. M., Cerano-Paredes, J., Rosales-Mata, S., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Esquivel-Arriaga, G., & Cornejo-Oviedo, E. (2017). Frecuencia histórica de incendios (1779-2013) en bosques de pino-encino de la comunidad de Charcos, Mezquital, Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(1), 91–104. doi: 10.5154/r.rchscfa.2016.03.017
- National Centers for Environmental Information (NCEI). (2021). Pacific Decadal Oscillation (PDO). Retrieved from December 9, 2021, from <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>
- Pavia, E. G., Graef, F., & Reyes, J. (2006). Notes and correspondence PDO – ENSO effects in the climate of Mexico. *Journal of Climate*, 19(24), 6433–6438. doi: 10.1175/JCLI4045.1
- Petropoulos, G. P., Griffiths, H. M., & Kalivas, D. P. (2014). Quantifying spatial and temporal vegetation recovery dynamics following a wildfire event in a Mediterranean landscape using EO data and GIS. *Applied Geography*, 50, 120–131. doi: 10.1016/j.apgeog.2014.02.006
- Phipps, R. L. (1985). Collecting, preparing, crossdating, and measuring tree increment cores geological survey. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/wri/1985/4148/report.pdf>
- Quintero-Gradilla, S. D., Jardel-Peláez, E. J., Cuevas-Guzmán, R., García-Oliva, F., & Martínez-Yrizar, A. (2019). Cambio postincendio en la estructura y composición del estrato arbóreo y carga de combustibles en un bosque de Pinus douglasiana de México. *Madera y Bosques*, 25(3). doi: 10.21829/myb.2019.2531888
- Rodríguez-Trejo, D. A., & Fulé, P. Z. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1), 23–37. doi: 10.1071/WF02040
- RubioCamacho, E. A., González Tagle, M. A., Benavides Solorio, J. D. D., Chávez Durán, Á. A., & Xelhuantzi Carmona, J. (2017). Relación entre necromasa, composición de especies leñosas y posibles implicaciones del cambio climático en bosques templados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (13), 2601–2614. doi: 10.29312/remexca.v0i13.486
- Sáenz-Ceja, J. E., & Pérez-Salicipup, D. R. (2019). Dendrochronological reconstruction of fire history in coniferous forests in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Fire Ecology*, 15(18), 1–18. doi: 10.1186/s42408-019-0034-z
- Safford, H. D., Hayward, G. D., Heller, N. E., & Wiens, J. A. (2012). Historical ecology, climate change, and resource management: Can the past still inform the future? In: John A. Wiens, Gregory D. Hayward, Hugh D. Safford, & Catherine M. Giffen (Eds.), *Historical environmental variation in conservation and natural resource management* (pp. 46–62). doi: 10.1002/9781118329726.ch4
- Schoennagel, T., Balch, J. K., Brenkert-Smith, H., Dennison, P. E., Harvey, B. J., Krawchuk, M. A., ...Whitlock, C. (2017). Adapt to more wildfire in western North American forests as climate changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(18), 4582–4590. doi: 10.1073/pnas.1617464114
- Seidl, R., Schelhaas, M. J., Rammer, W., & Verkerk, P. J. (2014). Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 4(9), 806–810. doi: 10.1038/nclimate2318
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., ... Reyer, C. P. O. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7, 395–402. doi: 10.1038/nclimate3303
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., ... Howard, I. M. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34–60. doi: 10.1016/J.QUASCIREV.2016.06.018
- Sturrock, R. N., Frankel, S. J., Brown, A. V., Hennon, P. E., Kliejunas, J. T., Lewis, K. J., ...Woods, A. J. (2011). Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, 60(1), 133–149. doi: 10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). *Spreading like wildfire-The rising threat of extraordinary landscape fires. A rapid response assessment*. Nairobi: UNEP. Retrieved from <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/38372>
- VoorTech Consulting. (2021). *The tree ring measuring program project J2X [Computer software]*. Holderness, New Hampshire: Author. Retrieved from <http://www.voortech.com/projectj2x/tringTechSupportInfo.html>
- Wardle, D. A., & Peltzer, D. A. (2017). Impacts of invasive biota in forest ecosystems in an aboveground–belowground context. *Biological Invasions*, 19(11), 3301–3316. doi: 10.1007/s10530-017-1372-x
- Watson, J. E. M., Evans, T., Venter, O., Williams, B., Tulloch, A., Stewart, C., ... Lindenmayer, D. (2018). The

- exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology and Evolution*, 2, 599–610. doi: 10.1038/s41559-018-0490-x
- World Wide Found & Boston Consulting Group. (2020). Fires, forest and the future: A crisis raging out of control? Retrieved from https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/wwf_fires_forests_and_the_future_report.pdf
- Yocom Kent, L. (2014). An evaluation of fire regime reconstruction methods. ERI Working Paper No. 32. Retrieved from <https://www.nwfirescience.org/sites/default/files/publications/doc.pdf>
- Yocom, L., & Fulé, P. Z. (2012). Human and climate influences on frequent fire in a high-elevation tropical forest. *Journal of Applied Ecology*, 49(6), 1356–1364. doi: 10.1111/j.1365-2664.2012.02216.x
- Yocom, L., Fulé, P. Z., Brown, P. M., Cerano, 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., Fulé, P. Z., Falk, D. A., García-Domínguez, C., Cornejo-Oviedo, E., Brown, P. M., ...Cortés-Montaño, C. (2014). Fine-scale factors influence fire regimes in mixed-conifer forests on three high mountains in Mexico. *International Journal of Wildland Fire*, 23(7), 959–968. doi: 10.1071/WF13214