

Dendrogeomorphological potential of *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson for the reconstruction of flash floods in Los Picos de Davis, Coahuila

Potencial dendrogeomorfológico de *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson para la reconstrucción de avenidas torrenciales en Los Picos de Davis, Coahuila

Wendi Sánchez-Asunción¹; Julián Cerano-Paredes^{2*}; Osvaldo Franco-Ramos³; Eladio Cornejo-Oviedo¹; José Villanueva-Díaz²; Celestino Flores-López¹; Miguel Garza-Martínez⁴

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento Forestal. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista. C. P. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

²INIFAP CENID-RASPA. km 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango, México.

³Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. Investigación Científica, Ciudad Universitaria. C. P. 04510. Coyoacán, Ciudad de México, México.

⁴Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Biológicas. Av. Universidad s/n, fracc. Filadelfia. C. P. 35010. Gómez Palacio, Durango, México.

*Corresponding author: cerano.julian@gmail.com; tel.: +52 871 159 01 04.

Abstract

Introduction: Geomorphological processes, such as flash floods, affect the natural growth of trees. From the dating of disturbances in growth rings, historical events useful for the prevention and mitigation of natural hazards were reconstructed.

Objectives: To determine the dendrogeomorphological potential of *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson to date and reconstruct flash floods in Los Picos de Davis, Coahuila.

Materials and methods: Samples were collected from 19 dead and living trees with evidence of disturbance (impact scars, growth suppression and compression wood). The samples were prepared, dated and analyzed based on dendrogeomorphological techniques. The reconstructed flash floods were related to historical climate information from hurricanes, tropical cyclones and precipitation.

Results and discussion: We were able to date 68 % of the samples with evidence of disturbance; the correlation between growth series was significant ($r = 0.403$; $P < 0.001$). The most common anomalies were in the form of scars (72 %), growth suppression (20 %) and compression wood (8 %). Ten flash floods were reconstructed. The causative processes were flash floods, caused by extreme hydrometeorological phenomena, including hurricanes "Alex" in 2010, "Dolly" in 2008 and "Claudette" in 2003. There is synchrony between geomorphological processes and hydrometeorological phenomena.

Conclusions: *P. ponderosa* ring disturbances are useful to reconstruct the frequency and distribution of geomorphological processes.

Keywords: growth rings; impact scars; growth suppression; hurricanes; precipitation.

Resumen

Introducción: Los procesos geomorfológicos, como las avenidas torrenciales, afectan el crecimiento natural de los árboles. A partir del fechado de disturbios en los anillos de crecimiento, se reconstruyen eventos históricos útiles para la prevención y mitigación de peligros naturales.

Objetivos: Determinar el potencial dendrogeomorfológico de *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson para fechar y reconstruir avenidas torrenciales en Los Picos de Davis, Coahuila.

Materiales y métodos: Se colectaron muestras de 19 árboles muertos y vivos con evidencia de disturbios (cicatrices de impacto, supresión en crecimiento y madera de compresión). Las muestras se prepararon, fecharon y analizaron con base en técnicas dendrogeomorfológicas. Las avenidas torrenciales reconstruidas se relacionaron con información climática histórica de huracanes, ciclones tropicales y precipitación.

Resultados y discusión: Se logró fechar 68 % de las muestras con evidencia de disturbio; la correlación entre series de crecimiento fue significativa ($r = 0.403$; $P < 0.001$). Las anomalías más comunes se manifestaron en forma de cicatrices (72 %), supresiones en el crecimiento (20 %) y madera de compresión (8 %). Se reconstruyeron 10 avenidas torrenciales. Los procesos causantes fueron avenidas torrenciales, desencadenadas por fenómenos hidrometeorológicos extremos, entre ellos los huracanes "Alex" en el 2010, "Dolly" en 2008 y "Claudette" en 2003. Existe sincronía entre los procesos geomorfológicos y los fenómenos hidrometeorológicos.

Conclusiones: Los disturbios en los anillos de *P. ponderosa* son útiles para reconstruir la frecuencia y distribución de procesos geomorfológicos.

Palabras clave: anillos de crecimiento; cicatrices de impacto; supresión de crecimiento; huracanes; precipitación.

Introduction

Growth rings of woody vegetation are a source of information for scientific disciplines such as biology, ecology or even the Earth sciences such as geomorphology (Miranda, Puy, & Martínez, 2007). From the exact date of the disturbances marked on the growth rings of trees, dendrogeomorphology analyses geomorphic processes such as flash floods, temporally and spatially (Miranda et al., 2007).

Flash floods in rivers consist of the sudden increase in water level caused by intense rainfall. During a torrential event, a mixture of blocks, sediment and vegetation is moved at great speed in the direction of the slope (Ballesteros-Cánovas et al., 2011; Roca, Martín-Vide, & Moreta, 2008). Flash floods are unpredictable; the area and volume of the flow can change dramatically in very short periods and can be controlled by atmospheric, hydrological and geomorphological factors (Borga, Stoffel, Marchi, Marra, & Jacob, 2014).

Interest in natural risk studies and, specifically, geomorphological risks has increased in recent decades, due to population growth in geomorphologically active areas and to climatic anomalies that can generate large geomorphological processes (Ballesteros-Cánovas et al., 2016). The implementation and use of scientific methods from dendrogeomorphological analysis can contribute to the improvement of estimates of frequency and magnitude of geomorphological processes, in order to establish the most appropriate preventive measures in the mitigation of risks (Ballesteros-Cánovas, Stoffel, George, & Hirschboeck, 2015; Bodoque et al., 2015; Díez-Herrero et al., 2007).

The studies that deal with the reconstruction of historical flash floods, from disturbances in growth rings, have provided knowledge (proxies) regarding the frequency of these (Ballesteros-Cánovas et al., 2015; Garrote et al., 2018; Quesada-Román, Ballesteros-Cánovas, Granados, Birkel, & Stoffel, 2020). Even in some mountain environments it has been possible to combine bi-dimensional water models and dendrogeomorphological evidence (height of impact scars) to model volume, depth and energy of torrential events (Ballesteros-Cánovas et al., 2011, 2016).

In Mexico, the study of the relationship between geomorphological processes and disturbances in the growth rings of trees (conifers) has focused on the mountainous areas of central Mexico, particularly to analyze syneruptive and poseruptive lahars (Bollschweiler, Stoffel, & Vázquez-Selem, 2010; Franco-Ramos, Castillo, & Muñoz-Salinas, 2016; Franco-Ramos, Stoffel, & Ballesteros-Cánovas, 2019a; Franco-Ramos, Stoffel, Vázquez-Selem, & Capra, 2013); however,

Introducción

Los anillos de crecimiento de la vegetación leñosa constituyen una fuente de información para disciplinas científicas como la biología, ecología o incluso las ciencias de la Tierra como la geomorfología (Miranda, Puy, & Martínez, 2007). A partir del fechado exacto de los disturbios marcados en los anillos de crecimiento de los árboles, la dendrogeomorfología analiza, temporal y espacialmente, los procesos geomórficos como las avenidas torrenciales (Miranda et al., 2007).

Las avenidas torrenciales en ríos consisten en el incremento súbito del nivel de agua ocasionado por precipitaciones intensas. Durante un evento torrencial, una mezcla de bloques, sedimento y vegetación es movilizad a gran velocidad en dirección a la pendiente (Ballesteros-Cánovas et al., 2011; Roca, Martín-Vide, & Moreta, 2008). Las avenidas torrenciales son impredecibles; el área y volumen del flujo pueden cambiar drásticamente en periodos muy cortos y pueden ser controlados por factores atmosféricos, hidrológicos y geomorfológicos (Borga, Stoffel, Marchi, Marra, & Jacob, 2014).

El interés en los estudios de riesgos naturales y, en específico, de los riesgos geomorfológicos se ha incrementado en las últimas décadas, debido al crecimiento poblacional en áreas geomorfológicamente activas y a las anomalías climáticas que pueden generar procesos geomorfológicos de gran magnitud (Ballesteros-Cánovas et al., 2016). La aplicación y el uso de métodos científicos procedentes de análisis dendrogeomorfológicos pueden contribuir a la mejora de estimaciones de la frecuencia y magnitud de los procesos geomorfológicos, para establecer las medidas preventivas más adecuadas en la mitigación de los riesgos (Ballesteros-Cánovas, Stoffel, George, & Hirschboeck, 2015; Bodoque et al., 2015; Díez-Herrero et al., 2007).

Los trabajos que abordan la reconstrucción de avenidas torrenciales históricas, a partir de los disturbios en los anillos de crecimiento, han aportado conocimiento (*proxys*) en cuanto a la frecuencia de estas (Ballesteros-Cánovas et al., 2015; Garrote et al., 2018; Quesada-Román, Ballesteros-Cánovas, Granados, Birkel, & Stoffel, 2020). Incluso en algunos ambientes de montaña se han podido combinar modelos hídricos bidimensionales y evidencias dendrogeomorfológicas (altura de las cicatrices de impacto) para modelar el volumen, profundidad y energía de los eventos torrenciales (Ballesteros-Cánovas et al., 2011, 2016).

En México, el estudio de la relación entre los procesos geomorfológicos y los disturbios en los anillos de crecimiento de árboles (coníferas) se ha

dendrogeomorphology has not been used to date and reconstruct flash floods or floods.

In order to extend this type of studies to other regions of Mexico and generate more knowledge on the potential of tree species for the reconstruction of geomorphological processes, the present study aimed to determine the dendrogeomorphological potential of *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson to date and reconstruct flash floods in Los Picos de Davis, Coahuila. Also, the possible influence of intense rains associated with hurricanes on the generation of flash floods was analyzed.

Materials and methods

Study area

The study of reconstruction of geomorphological events based on annual growth of *P. ponderosa* was carried out in Los Picos de Davis mountain, northeast of Múzquiz, in the north-central part of the state of Coahuila de Zaragoza, Mexico (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009) (Figure 1a). The study sites El Oso canyon (OSO) and Ojo de Agua canyon (OJO) are located between the coordinates $28^{\circ} 58' 12.45''$ (28.9701°) N and $-102^{\circ} 01' 27.99''$ (-102.0244°) W (Figure 1b).

enfocado en las zonas montañosas del centro de México, particularmente para analizar lahares sin- y pos eruptivos (Bollschweiler, Stoffel, & Vázquez-Selem, 2010; Franco-Ramos, Castillo, & Muñoz-Salinas, 2016; Franco-Ramos, Stoffel, & Ballesteros-Cánovas, 2019a; Franco-Ramos, Stoffel, Vázquez-Selem, & Capra, 2013); sin embargo, la dendrogeomorfología no se ha utilizado para fechar y reconstruir avenidas torrenciales o inundaciones.

Para ampliar este tipo de estudios en otras regiones de México y generar mayor conocimiento sobre el potencial de especies de árboles para la reconstrucción de procesos geomorfológicos, el presente trabajo planteó determinar el potencial dendrogeomorfológico de *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson para fechar y reconstruir avenidas torrenciales en Los Picos de Davis, Coahuila. Asimismo, se analizó la posible influencia de las lluvias intensas asociadas a huracanes sobre la generación de avenidas torrenciales.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio de la reconstrucción de eventos geomorfológicos con base en los crecimientos anuales de *P. ponderosa* se realizó en la montaña Los Picos de

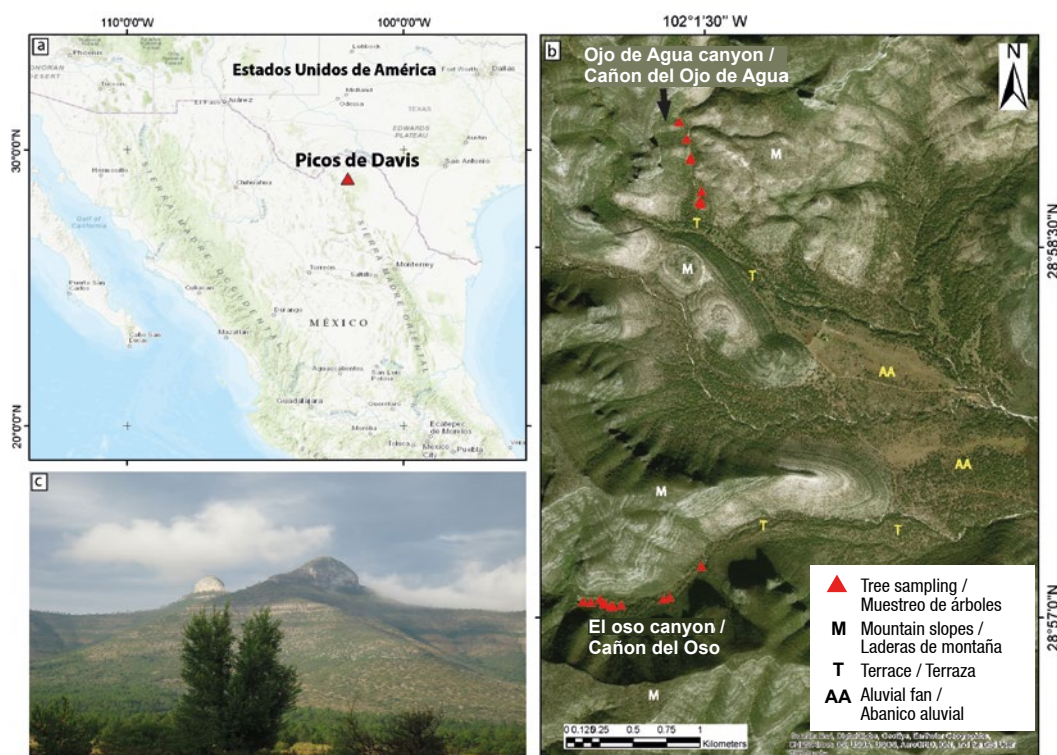


Figure 1. a) Geographic location of the study area Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila, Mexico; b) distribution of the sampling points in the two canyons; and c) panoramic view of Los Picos de Davis.

Figura 1. a) Ubicación geográfica del área de estudio Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila, México; b) distribución de los puntos de muestreo en los dos cañones; y c) vista panorámica de Los Picos de Davis.

Los Picos de Davis is located in the physiographic province of Sierra Madre Oriental (SMO) (Figure 1c). Within the eight sub-provinces that make up the SMO and the three sub-provinces that are within the municipality of Múzquiz, the area is located in the sub-province called Serranía del Burro, in the hydrological region Bravo-Conchos (RH24), within the Falcón-Río Salado dam watershed and in the Alamos river sub-basin (RH24Df) (INEGI, 2009); the intermittent water flow surrounding the area is called Los Picos (INEGI, 2017).

A type B (dry) climate predominates in Los Picos de Davis: dry semi-warm (BS_{0hw}) and semi-dry temperate ($BS_{1kw}(x')$). The average annual temperature ranges from 14 to 22 °C and rainfall varies from 300 to 700 mm (INEGI, 2009).

The vegetation of the study area is composed of pine-oak forest (40 %) and oak forest (38 %) mainly, chaparral (17 %) and in a low percentage (5 %) is found pasture vegetation dominated by the species *Bouteloua oligostachya* (Nutt.) Torr. ex A. Gray (*zacate navajita*) (INEGI, 2018). The pine species distributed in the study area is *P. ponderosa* (Farjon, Pérez-de la Rosa, & Styles, 1997; Callabam, 2015).

Sample design

The sampling was selective. Tree specimens were selected based on clear evidence of external damage, most likely caused by flash floods (Figure 2). The damage indices considered in the analysis were: trunk injuries with callus formation or similar anomalies, trees with loss of stem and replacement by forked or secondary branch(es), leaning trees, as well as those sunk by dragged materials. Trees were located with a global positioning system (GPS) and contextualized in geomorphological units such as mountain slopes, terraces, lobes and alluvial fans.

Collection of dendrochronological samples

Dendrochronological samples were extracted with the support of a chainsaw. Small wedges were extracted from live and dead standing trees (Figure 2c); in the case of felled trees, a cross section was cut. Samples were obtained close to where the damage indicator was observed, and care was taken to ensure that they were as complete as possible and with the best possible evidence from the damage records. An identification key was assigned to each sample: *OSO*, *OJO*, indicating the site where it was collected; followed by a number (01, 02, 03...) indicating the tree. The following additional information was also recorded in a field format: key, geographical coordinates, height above sea level, type of environmental disturbance, damage index (external or internal) and exposure of each individual.

Davis al noreste de Múzquiz, al centro-norte del estado de Coahuila de Zaragoza, México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009) (Figura 1a). Los sitios de estudio cañón del Oso (OSO) y cañón Ojo de Agua (OJO) se localizan entre las coordenadas 28° 58' 12.45" (28.9701°) N y -102° 01' 27.99" (-102.0244°) W (Figura 1b).

Los Picos de Davis se ubican en la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental (SMO) (Figura 1c). Dentro de las ocho subprovincias que conforman la SMO y de las tres que están dentro del municipio de Múzquiz, el área se encuentra en la subprovincia denominada Serranía del Burro, en la región hidrológica Bravo-Conchos (RH24), dentro de la cuenca hidrográfica presa Falcón-río Salado y en la subcuenca río Álamos (RH24Df) (INEGI, 2009); la corriente de agua intermitente que circunda el área lleva por nombre Los Picos (INEGI, 2017).

En Los Picos de Davis predomina un clima tipo B (seco): seco semicálido (BS_{0hw}) y semiseco templado ($BS_{1kw}(x')$). La temperatura media anual oscila entre los 14 a 22 °C y la precipitación varía de 300 a 700 mm (INEGI, 2009).

La vegetación del área de estudio se compone de bosque de pino-encino (40 %) y bosque de encino (38 %) principalmente, chaparral (17 %) y en un porcentaje bajo (5 %) se encuentra vegetación de pastizal dominando la especie *Bouteloua oligostachya* (Nutt.) Torr. ex A. Gray (*zacate navajita*) (INEGI, 2018). La especie de pino que se distribuye en el área de estudio es *P. ponderosa* (Farjon, Pérez-de la Rosa, & Styles, 1997; Callabam, 2015).

Diseño de muestreo

El muestreo fue selectivo. Los ejemplares arbóreos se seleccionaron con base en evidencias claras de daños externos, que muy posiblemente se originaron por avenidas torrenciales (Figura 2). Los indicadores de daños que se consideraron en el análisis fueron: heridas en los troncos con formación de callo o anomalías similares, árboles con pérdida de fuste y sustitución por una(s) rama(s) secundaria(s) o bifurcados, árboles inclinados, así como hundidos por los materiales arrastrados. Los árboles se localizaron con un sistema de posicionamiento global (GPS) y se contextualizaron en unidades geomorfológicas como ladera de montaña, terrazas, lóbulos y abanicos aluviales.

Obtención de muestras dendrocronológicas

Las muestras dendrocronológicas se extrajeron con el apoyo de una motosierra. En árboles vivos y muertos en pie, se extrajeron cuñas pequeñas (Figura 2c); para el caso de árboles derribados se cortó una sección transversal. Las muestras se obtuvieron cerca de donde

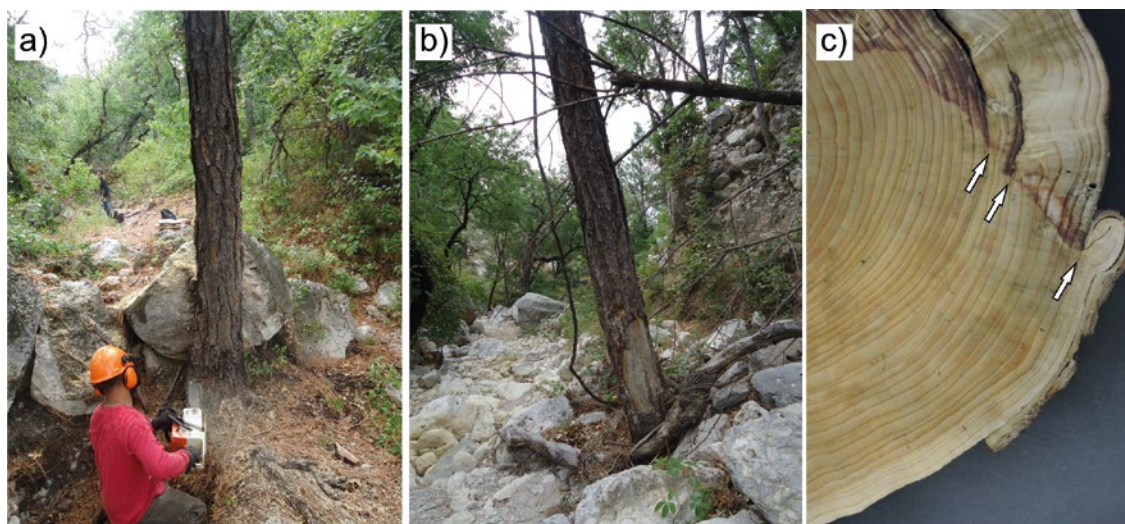


Figure 2. a) Tree with macroscopic indication and potential for detecting flash flood events in the center of El Oso Canyon on the Los Picos de Davis Mountain; b) tree with dendrogeomorphological disturbance: debarking by solid load impact of the stream; and c) wedge prepared for analysis with evidence of scarring by rock impact (arrows).

Figura 2. a) Árbol con indicio macroscópico y con potencial para detectar eventos de avenidas torrenciales en el centro del cañón del Oso en la montaña Los Picos de Davis; b) árbol con disturbio dendrogeomorfológico: descortezado por impacto de carga sólida de la corriente; y c) cuña preparada para su análisis con evidencia de cicatrices por impacto de roca (flechas).

Sample preparation

The samples were polished with several sandpaper grains, progressively from the coarsest to the finest (120-1200), until a smooth surface with good contrast of the structure of the growth rings was reached. Subsequently, the pre-dating was done which consisted of a visual count of the growth rings of each sample under a stereoscopic microscope. Then, skeleton-plots (growth charts) were made for each sample; this technique was used to relate and compare growth series of all samples and to define a common pattern that would allow an exact dating (Stokes & Smiley, 1996). Additionally, each growth series was compared with a master reference timeline of the site to detect anomalies (missing, double and false rings). This chronology was developed from growth curves that were better correlated with each other and without significant ring disturbances. Once the synchronization of growth patterns among samples was observed, dates were assigned to each of the annual growths, as well as the precise date of the growth ring where disturbance or damage was identified.

The next step was the measurement of each annual growth per sample, with a Velmex tree ring measurement system (model TA4030H1-S6, Velmex Inc., New York, USA) that allows an accuracy of 0.001 mm. This equipment with sliding phase is coupled to a computer and linked to the MeasureJ2X measurement

se observó el indicador de daño, se procuró que fueran lo más completas posibles y con la mejor claridad de los registros de daños. A cada muestra se asignó una clave de identificación: OSO, OJO, que señalan el sitio en que se recolectó; seguido de un número (01, 02, 03...) indicando el árbol. Asimismo, en un formato de campo, se registró la información adicional siguiente: clave, coordenadas geográficas, altura sobre el nivel del mar, tipo de disturbio ambiental, indicador de daño (externo o interno) y exposición de cada individuo.

Preparación de muestras

Las muestras se pulieron con varios granos de lija, progresivamente de la más gruesa a la más fina (120-1200), hasta lograr una superficie lisa y con buen contraste de la estructura de los anillos de crecimiento. Posteriormente, se hizo el prefechado que consistió en el conteo visual de los anillos de crecimiento de cada muestra bajo un microscopio estereoscópico. Después, se elaboró un *skeleton-plots* (gráficos de crecimiento) para cada muestra; técnica empleada para relacionar y comparar las series de crecimiento de todas las muestras y definir un patrón común que permita tener un fechado exacto (Stokes & Smiley, 1996). Adicionalmente, cada serie de crecimiento se comparó con una cronología maestra de referencia del sitio para detectar anomalías (anillos perdidos, dobles y falsos). Esta cronología se elaboró a partir de curvas de crecimiento mejor correlacionadas entre sí

software for Windows that serves to capture and read measurements (Robinson & Evans, 1980).

The quality of the dating and measurement of samples was verified with the program COFECHA, which is based on the statistical analysis of correlation among series, comparing segments of 50 years with overlaps of 25 years; the program also compares each of the samples with the average series (Holmes, 1983).

Dating and dendrogeomorphological analysis

The principles of Shroder (1978) were applied for the dendrogeomorphological analysis, which focus on the systematic process/event/response relationship between terrestrial surface phenomena and botanical effects of trees. In this case of study, flash floods are the process; impacts, burials and tilting of trees by the process are the event; and anomalies inside rings and in the growth pattern of *P. ponderosa* are the response. According to the methodologies proposed by Kogelnig-Mayer, Stoffel, Schneuwly-Bollscheider, Hübl, and Rudolf-Miklau (2011) and Stoffel and Corona (2014), a table of dendrogeomorphological events of the two study sites (OSO and OJO) was elaborated regarding the following variables: sample key; height of the tree from which the sample was collected; UTM coordinates (X,Y); sample characterization; date corresponding to the innermost and outer ring; age; year, type and intensity of disturbance; year of event; and, in some cases, intrannual position of disturbance.

The type of disturbance in each sample was identified with a stereomicroscope detecting if it was impact, callus tissue, eccentric growth, compression wood, suppressed growth and growth enhancement. These disturbances are the most common in dendrogeomorphological investigations (Stoffel & Corona, 2014); furthermore, Schweingruber, Eckstein, Serre-Bachet, and IndBrfu (1990) mention that visual analysis is an important tool for the identification of sudden decrease or increase in growth.

Depending on the type of disturbance or response, and based on the criteria proposed by Kogelnig-Mayer et al. (2011), the intensity in trunks of debarked trees was determined, which was divided into very weak, weak, moderate, strong and very strong. For growth suppression, the levels categorized correspond to weak, when ring width was less than 60 % with duration equal to or greater than two years; moderate, when ring width was equal to or greater than 60 % with duration between two and five years; and strong, when ring width was greater than 60 % with duration equal to or greater than five years (Stoffel & Corona, 2014).

In the case of the scars, their location within the annual ring was defined and associated with the approximate

y sin disturbios significativos en los anillos. Una vez observada la sincronía de los patrones de crecimiento entre muestras, se asignaron fechas a cada uno de los crecimientos anuales, así como la fecha precisa del anillo de crecimiento donde se percibió el disturbio o daño.

El siguiente paso fue la medición de cada uno de los crecimientos anuales por muestra, con un sistema de medición de anillos de árboles Velmex (modelo TA4030H1-S6, Velmex Inc., Nueva York, EUA) que permite una precisión de 0.001 mm. Este equipo con platina de fase deslizante es acoplado a una computadora y vinculado al *software* de medición MeasureJ2X para Windows que sirve para capturar y leer las mediciones (Robinson & Evans, 1980).

La calidad del fechado y medición de las muestras se verificó con el programa COFECHA, el cual se basa en el análisis estadístico de correlación entre series, comparando segmentos de 50 años con traslapes de 25 años; el programa también compara cada una de las muestras con la serie promedio (Holmes, 1983).

Datación y análisis dendrogeomorfológico

Para el análisis dendrogeomorfológico se aplicaron los principios de Shroder (1978) que se centran en la relación sistemática del proceso-evento-respuesta entre los fenómenos superficiales terrestres y los efectos botánicos de los árboles. En este caso de estudio, las avenidas torrenciales son el proceso; los impactos, sepultos e inclinación de los árboles por el proceso son el evento; y las anomalías en el interior de los anillos y en el patrón de crecimiento de *P. ponderosa* son la respuesta. De acuerdo con las metodologías propuestas por Kogelnig-Mayer, Stoffel, Schneuwly-Bollscheider, Hübl, y Rudolf-Miklau (2011) y Stoffel y Corona (2014), un cuadro de eventos dendrogeomorfológicos de los dos sitios de estudio (OSO y OJO) se elaboró considerando las siguientes variables: clave de la muestra; altura del árbol de donde se colectó la muestra; coordenadas UTM (X,Y); caracterización de la muestra; fecha correspondiente al anillo más interno y al anillo externo; edad; año, tipo e intensidad de disturbio; año de evento; y, en algunos casos, posición intranual del disturbio.

El tipo de disturbio en cada muestra se visualizó con un estereomicroscopio detectando si fue impacto, tejido calloso, crecimiento excéntrico, madera de compresión, crecimiento suprimido y realce en crecimiento. Estos disturbios son los más comunes en investigaciones dendrogeomorfológicas (Stoffel & Corona, 2014); además, Schweingruber, Eckstein, Serre-Bachet, y IndBrfu (1990) mencionan que el análisis visual es una herramienta importante para la identificación de la disminución repentina del crecimiento o de su aumento.

time or season of the year of occurrence of the event. The growth stage in which the disturbance was perceived was identified using the stereomicroscope and categorized as earlywood and late wood. Early wood is the lighter-colored, less dense part of the growth ring, which is subdivided into three growth stages: Early Earlywood or EE, Middle Earlywood or ME, and Late Earlywood or LE. Late Earlywood corresponds to the darker, denser structure that is visually discernible at the end of the growth ring and is subdivided into two growth stages: Early Latewood or EL and Late Latewood or LL.

Finally, the year of the event of flash floods was defined. The reconstruction of flash floods was based on the analysis of replication and intensity of disturbances within the tree ring series and the spatial distribution of trees affected.

Analysis of historical climate information

Historical climate information was collected from different sources for validation of the dates of geomorphological events reconstructed in the study area. 1) Information on hurricanes that affected the study area and may have been associated with flash floods, which was extracted from the National Hurricane Center (NHC) and the U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2) Historical information from the National Meteorological Service on tropical cyclones that made landfall in Mexico. The trajectory of hurricanes and cyclones and the proximity to the study area were analyzed for each of the years in which a flash flood was recorded. 3) Historical meteorological information on precipitation, and average monthly precipitation from the point closest to the study area, obtained from the precipitation grid for all of Mexico (Terán, 2010). Geomorphological events were associated with increases or extraordinary rainfall events.

Results and discussion

Tree-ring chronology

The record of the rings reached a series of 67 years covering the period from 1949 to 2015. The average age was 45 years; the trees sampled grew in active lobes of flash floods and were located in young terraces and near the sector of the main riverbed, to which their short age is attributed. According to Franco-Ramos, Vázquez-Selem, Stoffel, and Villanueva-Díaz (2018), the areas close to escarpments (areas of rock falls) or under unstable conditions limit tree development, finding young individuals (<50 years), in contrast to more stable areas, where more long-lived trees are usually located. This study did not show long-lived individuals in unstable areas, possibly due to the occurrence of

En función del tipo de disturbio o respuesta, y con base en los criterios propuestos por Kogelnig-Mayer et al. (2011), se determinó la intensidad en los troncos de árboles descortezados, la cual se dividió en muy débil, débil, moderada, fuerte y muy fuerte. Para la supresión en crecimiento, los niveles categorizados corresponden a débil, cuando el ancho del anillo fue menor de 60 % con duración igual o mayor de dos años; moderada, cuando el ancho del anillo fue igual o mayor de 60 % con duración entre dos y cinco años; y fuerte, cuando el ancho del anillo fue mayor de 60 % con duración igual o mayor de cinco años (Stoffel & Corona, 2014).

En el caso de las cicatrices, su ubicación dentro del anillo anual se definió y se asoció con la época o estación del año aproximada de ocurrencia del evento. A través del estereomicroscopio, la etapa de crecimiento en la cual fue percibido el disturbio se identificó y se categorizó como madera temprana y tardía. La madera temprana es la parte del anillo de crecimiento de color claro y menos densa, que se subdivide en tres etapas de crecimiento: madera inicial (*Early Earlywood* o EE), madera intermedia (*Middle Earlywood* o ME) y madera final (*Late Earlywood* o LE). La madera tardía corresponde a la estructura de color oscuro y más densa que visualmente es discernible al final del anillo de crecimiento y se subdivide en dos etapas de crecimiento: madera inicial (*Early Latewood* o EL) y madera final (*Late Latewood* o LL).

Finalmente, se definió el año del evento de dinámica torrencial. La reconstrucción de avenidas torrenciales se basó en el análisis de replicación e intensidad de disturbios dentro de las series de los anillos de árboles y en la distribución espacial de los árboles afectados.

Análisis de información climatológica histórica

La información climatológica histórica se recopiló de varias fuentes para la validación de las fechas de eventos geomorfológicos reconstruidas en el área de estudio. 1) Información sobre los huracanes que afectaron el área de estudio y pudieron estar asociados con las avenidas torrenciales, la cual fue extraída del Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés) y de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés). 2) Información histórica del Servicio Meteorológico Nacional sobre los ciclones tropicales que tocaron tierra en México. La trayectoria de los huracanes y ciclones y su cercanía al área de estudio se analizaron para cada uno de los años en que se registró una avenida torrencial. 3) Información meteorológica histórica de precipitación, y precipitación promedio mensual del punto más cercano al área de estudio, obtenidas de la malla de precipitación para todo México (Terán, 2010). Los eventos geomorfológicos se asociaron con incrementos o eventos extraordinarios de lluvia.

some natural (fire) or geomorphological phenomenon that suppresses tree development. In areas affected by flash floods in Andean Patagonia, Casteller et al. (2015) reported that the age of trees tends to be longer in areas with low slopes (stable), as opposed to those with steep slopes (unstable).

Of the total samples analyzed with evidence of disturbance (19 trees), 68 % were dated (Figure 3a); the correlation between growth series was significant ($r = 0.403$; $P < 0.001$). This was statistically acceptable compared with the minimum significant correlation ($r = 0.328$; $P < 0.001$) established by the COFECHA program to achieve an exact date (Holmes, 1983). These results show the dendrochronological potential of *P. ponderosa* in northern Mexico, as previously reported by Dieterich and Swetnam (1984), who determined the potential of this species for the date and fire scar analysis in Arizona, USA.

The remaining samples (32 %) could not be included in the database to validate the dates with the COFECHA program, because they showed different growth

Resultados y discusión

Cronología de anillos de árboles

El registro de los anillos alcanzó una serie de 67 años que comprende el periodo de 1949 a 2015. La edad media fue de 45 años; los árboles muestreados crecieron en lóbulos activos de dinámica torrencial y se ubicaron en terrazas jóvenes y cerca al sector del cauce principal, a lo cual se atribuye su corta edad. De acuerdo con Franco-Ramos, Vázquez-Selem, Stoffel, y Villanueva-Díaz (2018), las zonas próximas a escarpes (zonas de desprendimientos de rocas) o en condiciones inestables limitan el desarrollo del arbolado, encontrando individuos jóvenes (<50 años), en contraste con zonas más estables, donde generalmente se ubican árboles más longevos. En este estudio, no se registraron individuos longevos en zonas inestables, posiblemente por la ocurrencia de algún fenómeno natural (incendio) o geomorfológico que suprime el desarrollo de los árboles. En territorios afectados por avenidas torrenciales en la Patagonia andina, Casteller et al. (2015) reportaron que la edad de los árboles

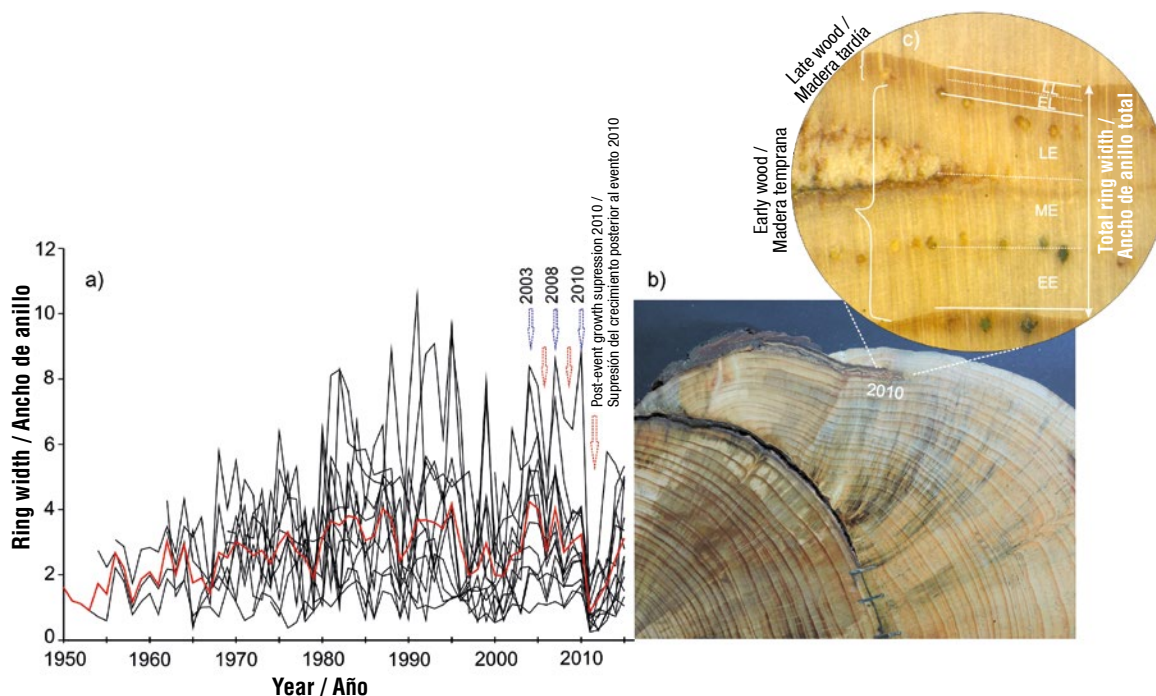


Figure 3. a) Series of ring width of *Pinus ponderosa* in the canyons of Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila. The individual series are shown in black and the average series in red. Arrows in blue indicate growth increases attributable to increased rainfall from hurricanes, and in red, suppressions due to damage caused by flash floods. **b)** Example of the intrannual position of a scar as dendrogeomorphological evidence caused by a flash flood. **c)** Close-up of a scar produced by impact between the middle and the end of early wood of 2010.

Figura 3. a) Series de ancho de anillos de *Pinus ponderosa* en los cañones de Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila. Las series individuales se indican en color negro y la serie promedio en color rojo. Las flechas en color azul indican los incrementos en crecimiento atribuibles al aumento de las lluvias por los huracanes, y en color rojo, las supresiones por efecto del daño causado por las avenidas torrenciales. **b)** Ejemplo de la posición intranual de una cicatriz como evidencia dendrogeomorfológica causada por una avenida torrencial. **c)** Acercamiento de una cicatriz producida por impacto entre la mitad y el final de la madera temprana del año 2010.

patterns, which is attributed to the fact that the events affected the study area and generated a high degree of disturbance in the growth rings.

Analysis of tree-rings disturbances by flash floods

The growth rings of the 19 samples analyzed had 25 disturbances caused by flash floods. El OSO canyon had more disturbances (68 %) compared to OJO canyon (32 %). The most common disturbance was in the form of a scar caused by direct impact on the tree with 72 % of the total, divided into 52 % and 20 % for El OSO canyon and OJO canyon, respectively. The second most common disturbance (20 %) was the ring growth suppression, recording 8 % for El OSO canyon and 12 % for OJO canyon. Finally, 8 % of the samples recorded eccentric rings and compression wood; these types of disturbance were only observed for El OSO canyon (Table 1).

In the case of lahars (Franco-Ramos et al., 2018) and floods (Ballesteros-Cánovas, Stoffel, & Bodoque, 2010), impact scars and callus tissue, in *Pinus* trees, are anomalies of greater dendrogeomorphological significance because they have a strong signal and certainty. The greater the intensity of any disturbance in growth rings, the greater the reliability of geomorphological processes recorded, while the uncertainty due to other factors, such as climate and pests, is reduced (Stoffel & Corona, 2014).

According to the dendrochronological methods used, the scars were dated with a seasonal or subannual resolution. The highest number of scars was recorded at Late Earlywood (LE) and in Latewood (Table 2), corresponding to the summer rainy season or flash flood events; soil water saturation could favor the occurrence of debris flows. According to Casteller

suele ser más longeva en relieves con poca inclinación (estables), a diferencia de los territorios con pendientes abruptas (inestables).

Del total de las muestras analizadas con evidencia de disturbio (19 árboles), se logró fechar 68 % (Figura 3a); la correlación entre series de crecimiento fue significativa ($r = 0.403$; $P < 0.001$). Esta resultó estadísticamente aceptable comparada con la correlación significativa mínima ($r = 0.328$; $P < 0.001$) que el programa COFECHA establece para lograr un fechado exacto (Holmes, 1983). Estos resultados dejan de manifiesto el potencial dendrocronológico del *P. ponderosa* en el norte de México, como previamente reportaron Dieterich y Swetnam (1984), quienes determinaron el potencial de esta especie para el fechado y análisis de cicatrices de incendio en Arizona, EUA.

Las muestras restantes (32 %) no se pudieron incluir en la base de datos para validar su fechado con el programa COFECHA, debido a que presentaron patrones de crecimiento diferentes, lo cual se atribuye a que los eventos impactaron la zona de estudio y generaron gran magnitud de disturbios en los anillos de crecimiento.

Análisis de los disturbios en los árboles por avenidas torrenciales

Los anillos de crecimiento de las 19 muestras analizadas tuvieron 25 disturbios ocasionados por el paso de avenidas torrenciales. En general, el cañón del OSO tuvo más disturbios (68 %) que el cañón del OJO (32 %). El disturbio más común fue en forma de cicatriz por impacto directo en el árbol con 72 % del total, dividido en 52 % y 20 % para el cañón del OSO y cañón del OJO, respectivamente. El segundo disturbio más común (20 %) fue la supresión en el crecimiento de los anillos,

Table 1. Disturbances found in the growth rings of *Pinus ponderosa* in two canyons of the mountain Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila.

Cuadro 1. Disturbios encontrados en los anillos de crecimiento de *Pinus ponderosa* en dos cañones de la montaña Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila.

Type of disturbance / Tipo de disturbio	El Oso canyon / Cañón del Oso		Ojo de Agua canyon / Cañón Ojo de Agua		Total	
	Number / Número	%	Number / Número	%	Number / Número	%
Impact scars / Cicatrices de impacto	13	52	5	20	18	72
Growing suppression / Supresión en crecimiento	2	8	3	12	5	20
Compression wood / Madera de compresión	2	8	0	0	2	8
Growth release / Realce de crecimiento	0	0	0	0	0	0
Callus tissue / Tejido calloso	0	0	0	0	0	0
Total	17	68	8	32	25	100

et al. (2015) in the mountains of Patagonia, flash floods usually occur in periods of intense rain during one or three consecutive days. In volcanic areas of central Mexico, Franco-Ramos et al. (2016) and Franco-Ramos, Vázquez-Selem, Stoffel, Cerano-Paredes, and Villanueva-Díaz (2019b) have reported that most of the disturbances in the rings associated with lahars are found in late wood (July to October), due to the presence of torrential rains favored by the Atlantic and Pacific hurricane season. Nevertheless, Muñoz-Salinas and Castillo (2015) have detected that flood events with the greatest flow for southeast Mexico are related to climatic anomalies such as ENSO (El Niño-Southern Oscillation) and that the greatest flash floods occur during La Niña, resulting in floods.

In 8 % of the samples with eccentric growth on leaning trees, the intensity of disturbance was classified as strong (Table 2), as they showed a dramatic increase in ring width of more than 50 % compared to the other rings. This eccentricity lasted for at least five years. This fact could also influence the low correlation between series of 32 % of the samples that were not included in the database verified by COFECHA. Compression wood identified in *P. ponderosa* trees, within the dynamics of flash floods, could be caused by the weight of the materials (blocks and debris) on the base of trunks in both study canyons. According to Gottesfeld (1996), tree trunks in riparian areas are commonly sloped, sunken, bark-free and have exposed roots due to flash floods. These botanical evidences are useful to date and reconstruct geomorphological processes. On the other hand, Stoffel and Corona (2014) mention that the tilting of tree trunks also suggests other geomorphological processes such as debris flows and landslides.

Of the 20 % of the disturbances shown as growth suppression, 16 % showed ring suppression at weak intensity and the other 4 % showed growth suppression

registrando 8 % en el cañón del OSO y 12 % en el cañón del OJO. Por último, 8 % de las muestras registraron anillos excéntricos y madera de compresión; estos tipos de disturbio solo se observaron en el cañón del OSO (Cuadro 1).

Para el caso de lahares (Franco-Ramos et al., 2018) e inundaciones (Ballesteros-Cánovas, Stoffel, & Bodoque, 2010), las cicatrices por impacto y el tejido calloso, en árboles del género *Pinus*, son anomalías de mayor significancia dendrogeomorfológica por tener una fuerte señal y certidumbre. Entre mayor sea la intensidad de cualquier disturbio en los anillos de crecimiento, mayor será la confiabilidad de que se registraron procesos geomorfológicos, mientras que la incertidumbre de que sea por otros factores, como el clima y las plagas, se reduce (Stoffel & Corona, 2014).

De acuerdo con los métodos dendrocronológicos utilizados, las cicatrices se fecharon con una resolución estacional o subanual. El mayor número de cicatrices se registró al final de la madera temprana (LE) y en la madera tardía (Cuadro 2), correspondientes a la estación de lluvias de verano o eventos de lluvia torrencial; la saturación hídrica del suelo pudo favorecer la ocurrencia de los flujos de escombros. De acuerdo con Casteller et al. (2015) en montañas de la Patagonia, las avenidas torrenciales suelen ocurrir en periodos de lluvia intensa durante uno o tres días consecutivos. En zonas volcánicas del centro de México, Franco-Ramos et al. (2016) y Franco-Ramos, Vázquez-Selem, Stoffel, Cerano-Paredes, y Villanueva-Díaz (2019b) han reportado que la mayoría de los disturbios en los anillos asociados a lahares se encuentran en la madera tardía (julio a octubre), debido a la presencia de lluvias torrenciales favorecidas por la temporada de huracanes del Atlántico y del Pacífico. No obstante, Muñoz-Salinas y Castillo (2015) han detectado que los eventos de inundaciones con

Table 2. Intensity of the types of disturbance according to Stoffel and Corona (2014) and intrannual position of the disturbance in the rings of *Pinus ponderosa* in Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila.

Cuadro 2. Intensidad de los tipos de disturbios de acuerdo con Stoffel y Corona (2014) y posición intranual del disturbio en los anillos de *Pinus ponderosa* en Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila.

Type of disturbance / Tipo de disturbio	Intensity / Intensidad					Ring position / Posición del anillo						Total
	1	2	3	4	5	EE	ME	LE	EL	LL	N/A	
Growth suppression / Supresión de crecimiento		4	1									5
Compression wood / Madera de compresión				2								2
Impact scars / Cicatrices de impacto					18	1	2	7	3	4	1	18
Total												25

Disturbance intensity: 1 = very weak, 2 = weak, 3 = moderate, 4 = strong when growth suppression or eccentricity is present; scars represent intensity, 5 = very strong. Ring position: Early earlywood (EE), Middle Earlywood (ME) and Late Earlywood (LE); and Early Latewood (EL) and Late Latewood (LL). N/A = Not available. Intensidad de disturbio: 1 = muy débil, 2 = débil, 3 = moderada, 4 = fuerte cuando se presenta supresión en crecimiento o excentricidad; las cicatrices representan intensidad 5 = muy fuerte. Posición del anillo: madera temprana = madera inicial (EE), madera intermedia (ME) y madera final (LE); y madera tardía = madera inicial (EL) y madera final (LL). N/A = No se aprecia.

at moderate intensity (Table 2). Sixteen percent of the samples had width rings reduced by less than 60 % in relation to the ring pattern before suppression and lasted for more than two years. The rest of the series had the width of each ring decreased by more than 60 % in relation to the pre-event ring pattern and lasted for five years. Suppression is caused by the sinking of logs due to debris and blocks or by the decapitation of tree crowns (Stoffel, Bollschweiler, Butler, & Luckman, 2010).

Reconstruction of flash floods

Based on the date of growth-ring disturbances and degree of intensity, 10 flash floods were reconstructed in Los Picos de Davis during the period 1990 to 2015 (Figure 4). The low-magnitude flash floods (related to the number of trees affected) damaged one to four trees. On the other hand, three flash floods were dated; the first occurred in 2010 with the maximum number of trees damaged (five trees with impacts) and was the most synchronized event, as it occurred in both canyons. The second event occurred in 2008 with four trees with rock impacts in the two canyons. The

mayor caudal para el sureste México se relacionan con anomalías climáticas como el ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) y que las avenidas más grandes de ríos se producen durante La Niña, lo que resulta en inundaciones.

En 8 % de las muestras con crecimiento excéntrico en árboles inclinados, la intensidad del disturbio se clasificó como fuerte (Cuadro 2), ya que mostraron incremento abrupto en el ancho del anillo de más del 50 % en comparación con los demás anillos. Dicha excentricidad duró mínimo cinco años. Este hecho también pudo influir en la baja correlación entre series del 32 % de las muestras que no se integraron a la base de datos verificada por COFECHA. La madera de compresión identificada en los árboles de *P. ponderosa*, dentro de la dinámica de avenidas torrenciales, pudo ser ocasionada por el peso de los materiales (bloques y detritos) sobre la base de los troncos en ambos cañones de estudio. De acuerdo con Gottesfeld (1996), los troncos de los árboles en zonas ribereñas son comúnmente inclinados, hundidos, descortezados y tienen raíces expuestas por el paso de las avenidas

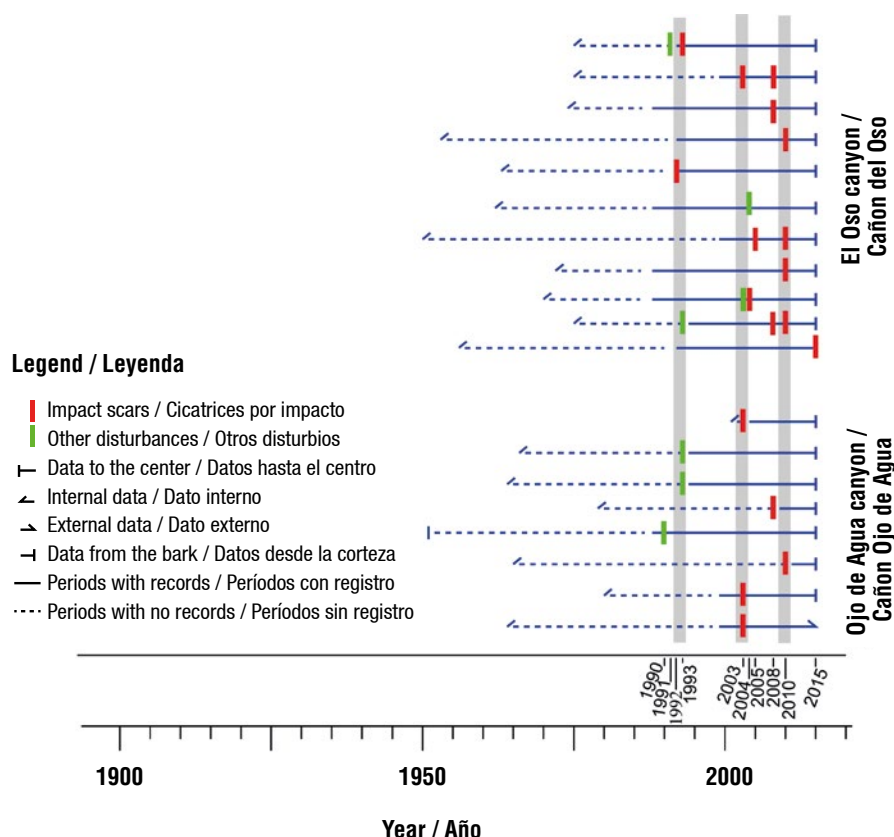


Figure 4. Reconstruction of flash floods in two canyons in Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila. The horizontal lines in blue represent the length of each of the samples; in red, the impact scars; and in green, suppressions and eccentric growths. Gray bars indicate events with the highest number of trees affected.

Figura 4. Reconstrucción de avenidas torrenciales en dos cañones de Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila. Las líneas horizontales en color azul representan la longitud de cada una de las muestras; en color rojo, las cicatrices por impacto; y en color verde, las supresiones y crecimientos excéntricos. Las barras en color gris señalan los eventos con mayor número de disturbios en los árboles.

third occurred in 2003 with five trees affected, four of which had rock and sediment impacts. Other possible flash floods were dated in 1992 (one impact) and 1993 (impact and buried trunks), suggesting that these are the oldest events in the chronology of the study area (Figure 4). Franco-Ramos et al. (2019a) reported peak debris flow events at La Malinche volcano of 20, 20 and 21 disturbances for the years 1998, 2005 and 2009, respectively. According to Franco-Ramos et al. (2018), the number of trees affected can give an idea of the magnitude of the event; however, the number of damaged individuals also has to do with the type and dynamics of the geomorphological process, position of the trees with respect to the channel flow, age and availability of the trees for sampling.

Influence of Hurricanes on flash floods

According to historical information, extreme hydrometeorological events (hurricanes and cyclones) have affected the region of Los Picos de Davis by means of major flash floods (Table 3).

torrenciales. Estas evidencias botánicas son útiles para fechar y reconstruir procesos geomorfológicos. Por otro lado, Stoffel y Corona (2014) mencionan que la inclinación de los troncos de los árboles también sugiere otros procesos geomorfológicos como son los flujos de escombros y deslizamientos.

Del 20 % de los disturbios que se presentaron como crecimiento suprimido, 16 % mostró supresión de los anillos en una intensidad débil y el otro 4 % mostró crecimiento suprimido con intensidad moderada (Cuadro 2). En 16 % de las muestras se observó que el ancho de los anillos se redujo menos de 60 % con relación al patrón de los anillos anteriores a la supresión y duró más de dos años. En el resto de las series, el ancho de cada anillo decreció más de 60 % con respecto al patrón de los anillos anteriores al evento, con una duración de cinco años. La supresión es provocada por el hundimiento de troncos a causa de detritos y bloques o por la decapitación de copas de los árboles (Stoffel, Bollschweiler, Butler, & Luckman, 2010).

Table 3. Debris flows identified by dendrogeomorphological methods in the canyons of Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila, and relation to hurricanes and torrential rains.

Cuadro 3. Flujos de escombros identificados mediante métodos dendrogeomorfológicos en los cañones de Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila, y relación con los huracanes y lluvias torrenciales.

Year with flash floods/ Año con avenidas torrenciales	Number of events/ Número de disturbios	Type of tree damage/ Tipo de daño en el árbol	Weather data/Datos meteorológicos	
			Annual rainfall (mm)/ Lluvia anual (mm)	Tropical cyclones/ Ciclones tropicales
1990	1	Loss of apex or burial/ Decapitación o sepulto	728	---
1991	1	Tilting/Inclinación	579	---
1992	1	Impact/Impacto	658	---
1993	4	Impact, loss of apex or burial/ Impacto, decapitación o sepulto	383	---
2003	5	Impact and tilting/ Impacto e inclinación	257	“Claudette” tropical depression/ “Claudette” depresión tropical
2004	2	Impact, loss of apex or burial/ Impacto, decapitación o sepulto	311	---
2005	1	Impact/Impacto	194	---
2008	4	Impact/Impacto	391	“Dolly” hurricane (H1)/ “Dolly” huracán (H1)
2010	5	Impact/Impacto	790	“Alex” hurricane (H2) and “DOS” tropical depression/ “Alex” huracán (H2) y depresión tropical “DOS”
2015	1	Impact/Impacto	662	

Note: Historical data showed an average cumulative rainfall of 413 mm. The tropical cyclone record in the highest category was obtained from the NOAA database (<https://www.nhc.noaa.gov/data/#tcr>). H2 = Category II hurricane, H1 = Category I hurricane, Saffir-Simpson scale.

Nota: Los datos históricos arrojaron un promedio de lluvia acumulada de 413 mm. El registro de ciclones tropicales en su mayor categoría se obtuvo de la base de datos de NOAA (<https://www.nhc.noaa.gov/data/#tcr>). H2 = huracán categoría II, H1 = huracán categoría I, escala Saffir-Simpson.

The most important and largest event due to the process of flash floods occurred in 2010. This year had the largest number of trees affected in both canyons of Los Picos de Davis (Figure 4) and the maximum intensity of the disturbance. The intrannual position showed that the event occurred at Middle Earlywood and Late Earlywood (ME and LE) (Figure 3b), which synchronize with intense rainfall of 691 mm (cumulative monthly average from April to September). These humidity conditions coincide with the presence of the category II Hurricane “Alex”, the first hurricane of season 2010 in the Atlantic Ocean, coming from the Caribbean Sea (Table 3; Figure 5). Hurricane “Alex” crossed the state of Tamaulipas as a Category II hurricane, through the state of Nuevo León as a Category I hurricane and followed through San Luis Potosí with lower intensity.

Reconstrucción de avenidas torrenciales

A partir del fechamiento de los disturbios en los anillos de crecimiento y su grado de intensidad, se reconstruyeron 10 avenidas torrenciales en Los Picos de Davis durante el periodo 1990 a 2015 (Figura 4). Las avenidas torrenciales de baja magnitud (relacionada con el número de árboles afectados) dañaron de uno a cuatro árboles. Por otro lado, se fecharon tres avenidas torrenciales de mayor magnitud; la primera ocurrió en 2010 con el máximo número de árboles perjudicados (cinco árboles con impactos) y fue el evento con mayor sincronía, ya que se registró en los dos cañones. El segundo evento sucedió en el 2008 con cuatro árboles con impactos de roca en los dos cañones. El tercero se presentó en el 2003 con cinco árboles afectados, de los

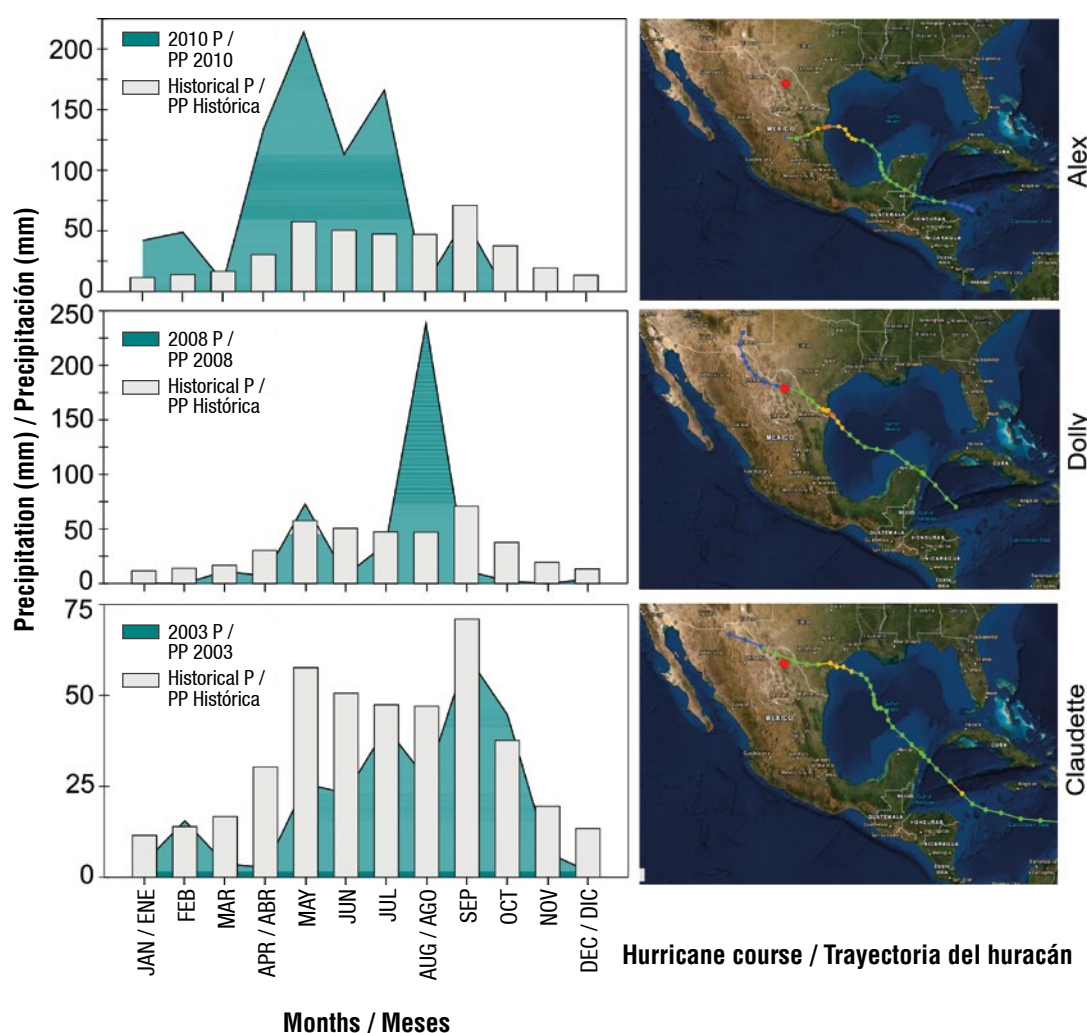


Figure 5. Relationship between historical average precipitation (PP) (1972-2013) and annual PP for the years 2010, 2008 and 2003, during the major events in Los Picos de Davis (left). Trajectory of Hurricanes Alex in 2010, Dolly in 2008 and Claudette in 2003 (right, images taken from NOAA, <https://www.nhc.noaa.gov/data/#tcr>). The red circle indicates the area of study.

Figura 5. Relación entre la precipitación promedio (PP) histórica (1972-2013) y la PP anual de los años 2010, 2008 y 2003, durante los eventos de mayor magnitud en Los Picos de Davis (izquierda). Trayectoria de los huracanes Alex en el año 2010, Dolly en el año 2008 y Claudette en el año 2003 (derecha, imágenes tomadas de la NOAA, <https://www.nhc.noaa.gov/data/#tcr>). El círculo en color rojo indica el área de estudio.

The hurricane also affected the state of Coahuila, where it caused torrential rains and significant flood damage. In Nuevo León, the hurricane caused human losses; therefore, it is considered one of the most powerful that has impacted northeastern Mexico in the last 40 years (Hernández & Bravo, 2010). In addition, after the hurricane, the tropical depression “DOS” made landfall in Texas and crossed the states of Tamaulipas, Nuevo León and Coahuila, causing extreme rains that intensified the damage caused by Hurricane “Alex” (Bravo, 2010).

The second flash flood was dated in 2008, the impact scars were dated at the Early Latewood (EL). Rainfall and hydrometeorological records suggest that this flash flood was triggered by the category I hurricane “Dolly” (Figure 5) which impacted directly on Los Picos de Davis. This hurricane was generated in July 2008 in the Atlantic Ocean, it entered the Gulf of Mexico and moved northwest, where it intensified to a Category II hurricane (Hernández & Bravo, 2008).

The third flash flood occurred in 2003 (Figure 5), with impact scars dated at Late Earlywood (LE). This event showed spatial-temporal synchronization, because it was identified in the two canyons. The triggering factor could have been the intense rain caused by Hurricane “Claudette”, originating in the Atlantic, which kept its trajectory directly towards Los Picos de Davis in northwest Mexico (Figure 5). However, rainfall did not record a significant increase in relation to the historical average for that year (Figure 5).

This could be due to two aspects: (i) soil water saturation due to previous accumulated rainfall and (ii) rain caused by Hurricane “Claudette” could have been recorded in a short period, together with the occurrence of an extensive fire in the spring of 2003 affecting the two canyons, which consumed the vegetation that supported the soil and favored the triggering of the present floods.

The oldest flash floods were dated in 1992 and 1993; in both cases impact scars were identified (maximum dendrogeomorphic evidence). Although there is no record of hurricanes for those years in the region, annual rainfall of 658 mm and 383 mm, respectively, suggests the possible occurrence of two flash floods.

Conclusions

Growth rings of *Pinus ponderosa* recorded disturbances (impact scars, abrupt suppressions and compression wood) caused by flash floods in Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila; therefore, the species has dendrogeomorphological potential. Extreme hydrometeorological events such as hurricanes and torrential summer rains are factors that could have

cuales cuatro tuvieron impacto de roca y sedimentos. Otras posibles avenidas torrenciales se fecharon en los años 1992 (un impacto) y 1993 (impacto y troncos sepultados), lo que sugiere que son los eventos más antiguos en la cronología de la zona de estudio (Figura 4). Franco-Ramos et al. (2019a) reportaron eventos máximos por flujo de escombros en el volcán La Malinche de 20, 20 y 21 disturbios para los años 1998, 2005 y 2009, respectivamente. De acuerdo con Franco-Ramos et al. (2018), el número de árboles con disturbios puede dar idea de la magnitud del evento; sin embargo, la cantidad de individuos dañados también tiene que ver con el tipo y dinámica del proceso geomorfológico, posición de los árboles respecto al canal fluvial, edad y disponibilidad de los árboles para muestreo.

Influencia de huracanes en las avenidas torrenciales

De acuerdo con información histórica, los eventos hidrometeorológicos extremos (huracanes y ciclones) han afectado la región de Los Picos de Davis a través de las avenidas torrenciales más importantes (Cuadro 3).

El evento más importante y de mayor magnitud por proceso de avenidas torrenciales ocurrió en el 2010. En este año se registró el mayor número de árboles impactados en ambos cañones de Los Picos de Davis (Figura 4) y la máxima intensidad del disturbio. La posición intranual mostró que el evento sucedió a la mitad y al final de la madera temprana (ME y LE) (Figura 3b), lo cual sincroniza con lluvias intensas de 691 mm (promedio mensual acumulado de abril a septiembre). Estas condiciones de humedad coinciden con la presencia del huracán “Alex” de categoría II, el primer huracán de la temporada del año 2010 en el océano Atlántico, proveniente del mar Caribe (Cuadro 3; Figura 5). El huracán “Alex” cruzó por el estado de Tamaulipas como huracán categoría II, por el estado de Nuevo León en categoría I y siguió por San Luis Potosí con intensidad más baja. El huracán también afectó al estado de Coahuila, donde causó lluvias torrenciales y daños significativos por inundaciones. En Nuevo León, el huracán causó pérdidas humanas, por lo que es considerado uno de los más potentes que ha impactado al noreste de México en los últimos 40 años (Hernández & Bravo, 2010); además, después del huracán, la depresión tropical “DOS” tocó tierra en Texas y cruzó por los estados de Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila, originando lluvias extremas que agudizaron los daños causados por el huracán “Alex” (Bravo, 2010).

La segunda avenida torrencial se fechó en 2008, las cicatrices de impacto se fecharon al inicio de la madera tardía (EL). Los registros de lluvia e hidrometeorológicos sugieren que esta avenida torrencial se desencadenó por el huracán “Dolly” de categoría I (Figura 5) que impactó directamente sobre Los Picos de Davis. Este huracán se generó en julio de 2008 en el océano

triggered flash floods in the canyons. The results are novel for the northern region of Mexico and represent a starting point for further studies. The results are new to the north part of Mexico and represent a starting point for further studies. This type of dendrogeomorphological studies in the north of the country, which are considered border studies, can be useful in management plans, territorial planning and prevention of natural hazards, if the number of trees sampled is increased and other species are explored in order to extend the chronologies of geomorphological events in the region.

Acknowledgements

This research was funded by the projects *Reconstrucción de la frecuencia histórica de incendios y caracterización de las cargas de combustible en ecosistemas forestales del norte-centro de México* of INIFAP and *Estudios dendrocronológicos en las Sierras Madre Occidental, Oriental y del Sur de México*, with number 38111-425103001-2346 of the UAAAN. The authors thank Ing. Fernando A. Dorantes García for his support in the field work and Ing. Edgar Guzmán Arreola for his help in the laboratory work. The authors also thank the owner of the area Los Picos de Davis for the consent granted to carry out this study, and to the reviewers for the valuable comments that improved the manuscript.

End of English version

References / Referencias

- Ballesteros-Cánovas, J. A., Czajka, B., Janecka, K., Lempa, M., Kaczka, R. J., & Stoffe, M. (2015). Flash floods in the Tatra Mountain streams: Frequency and triggers. *Science of the Total Environment*, 511, 639–648. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.081
- Ballesteros-Cánovas, J. A., Eguibar, M., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., & Gutiérrez-Pérez, I. (2011). Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendrogeomorphic paleostage indicators. *Hydrological Processes*, 25(6), 970–979. doi: 10.1002/hyp.7888
- Ballesteros-Cánovas, J. A., Stoffel, M., & Bodoque, J. M. (2010). Changes in wood anatomy in tree rings of *Pinus pinaster* Ait. following wounding by flash floods. *Tree-Ring Research*, 66(2), 93–103. Retrieved from https://doc.rero.ch/record/18328/files/hit_cwa.pdf
- Ballesteros-Cánovas, J. A., Stoffel, M., Spyth, B., Janecka, K., Kaczka, R. J., & Lempa, M. (2016). Paleoflood discharge reconstruction in Tatra Mountain streams. *Geomorphology*, 272, 92–101. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.12.004
- Ballesteros-Cánovas, J. A., Stoffel, M., St George, S., & Hirschboeck, K. (2015). A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 39(6), 794–816. doi: 10.1177/0309133315608758

Atlántico, ingresó al golfo de México y se desplazó hacia el noroeste, donde se intensificó a huracán categoría II (Hernández & Bravo, 2008).

La tercera avenida torrencial ocurrió en el año 2003 (Figura 5), cuyas cicatrices de impacto fueron fechadas al final de la madera temprana (LE). Este evento mostró sincronía espacio-temporal, ya que se identificó en los dos cañones. El factor desencadenante pudo ser la lluvia intensa provocada por el huracán “Claudette”, originado en el Atlántico, el cual mantuvo su trayectoria directamente hacia Los Picos de Davis en el noroeste de México (Figura 5). No obstante, la lluvia no registró incremento importante en relación con la media histórica de ese año (Figura 5). Esto pudo deberse a dos aspectos: (i) saturación de agua del suelo por lluvias previas acumuladas y (ii) la lluvia provocada por el huracán “Claudette” se pudo haber registrado en un periodo corto, aunado a la ocurrencia de un incendio extenso en la primavera del 2003 que afectó los dos cañones, el cual consumió la vegetación que daba soporte al suelo y favoreció el desencadenamiento de los torrentes presentes.

Las avenidas torrenciales más antiguas fueron fechadas en 1992 y 1993; en ambos casos se identificaron cicatrices de impacto (máxima señal de los disturbios). Si bien, no se tiene registro de huracanes para esos años en la región, las lluvias anuales de 658 mm y 383 mm, respectivamente, sugieren la posible ocurrencia de dos avenidas torrenciales.

Conclusiones

Los anillos de crecimiento de *Pinus ponderosa* registraron disturbios (cicatrices de impacto, supresiones abruptas y madera de compresión) ocasionados por avenidas torrenciales en Los Picos de Davis, Múzquiz, Coahuila; por tanto, la especie tiene potencial dendrogeomorfológico. Los eventos hidrometeorológicos extremos como huracanes y lluvias torrenciales de verano son factores que pudieron desencadenar las avenidas torrenciales en los cañones. Los resultados son novedosos para la región norte de México y representan un punto de partida para estudios posteriores. Este tipo de estudios dendrogeomorfológicos en el norte del país, que se consideran de frontera, pueden ser útiles en los planes de manejo, ordenamiento territorial y prevención de peligros naturales, si se amplía el número de árboles muestreados y se exploran otras especies para poder extender las cronologías de eventos geomorfológicos en la región.

Agradecimientos

Esta investigación se financió a través de los proyectos “Reconstrucción de la frecuencia histórica de incendios y caracterización de las cargas de combustible en

- Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Eguibar, M. A., Benito, G., Ruiz-Villanueva, V., & Ballesteros-Cánovas, J. A. (2015). Challenges in paleoflood hydrology applied to risk analysis in mountainous watersheds—A review. *Journal of Hydrology*, 529(2), 449–467. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.12.004
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., & Vázquez-Selem, L. (2010). Tree-ring reconstruction of past lahar activity at Popocatepetl volcano, México. *The Holocene*, 20(2), 265–274. doi: 10.1177/0959683609350394
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194–205. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.022
- Bravo, C. (2010). Reseña de la depresión tropical DOS del Océano Atlántico. Retrieved from <https://smn.cna.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- Callabam, R. Z. (2015). *Pinus ponderosa: A taxonomic review with five subspecies in the United States*. USA: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Casteller, A., Stoffel, M., Crespo, S., Villalba, R., Corona, C., & Bianchie, E. (2015). Dendrogeomorphic reconstruction of flash floods in the Patagonian Andes. *Geomorphology*, 228(1), 116–123. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.08.022
- Dieterich, J.H., & Swetnam, T.W. (1984). Dendrochronology of a fire-scarred ponderosa pine. *Forest Science*, 30(1), 238–247. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228332972_Dendrochronology_of_fire-scarred_ponderosa_pine
- Díez-Herrero, A., Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M., Eguibar, M. A., Fernández, J. A., Génova, M. M., ... Stoffel, M. (2007). Mejoras en la estimación de la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales mediante técnicas dendrogeomorfológicas. *Boletín Geológico y Minero*, 118(4), 789–802. Retrieved from http://www.igme.es/boletin/2007/118_4.htm
- Farjon, A., Pérez-de la Rosa, J. A., & Styles, T. B. (1997). *A field guide to the pines of Mexico and Central America*. USA: Royal Botanic Gardens, Kew.
- Franco-Ramos, O., Castillo, M., & Muñoz-Salinas, E. (2016). Using tree-ring analysis to evaluate the intra-eruptive lahar activity in the Nexpayantla Gorge, Popocatepetl Volcano (Central Mexico). *CATENA*, 147, 205–215. doi: 10.1016/j.catena.2016.06.045
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M., & Ballesteros-Cánovas, J. A. (2019a). Reconstruction of debris-flow activity in a temperate mountain forest catchment of central Mexico. *Journal of Mountains Science*, 16(9), 2096–2109. doi: 10.1007/s11629-019-5496-6
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M., Vázquez-Selem, L., & Capra, L. (2013). Spatiotemporal reconstruction of lahars on the southern slopes of Colima volcano, Mexico—A dendrogeomorphic approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 267, 30–38. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.09.011
- Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Stoffel, M., Cerano-Paredes, J., & Villanueva-Díaz, J. (2019b). Tree-rings based analysis of the 2001 pyroclastic flow and post-eruptive tree colonization on Popocatepetl volcano, Mexico. *CATENA*, 179, 149–159. doi: 10.1016/j.catena.2019.04.004
- ecosistemas forestales del norte-centro de México” de INIFAP y “Estudios dendrocronológicos en las Sierras Madre Occidental, Oriental y del Sur de México, con clave número 38111-425103001-2346” de la UAAAN. Agradecemos al Ing. Fernando A. Dorantes García por su apoyo en el trabajo de campo y al Ing. Edgar Guzmán Arreola por su ayuda en el trabajo de laboratorio. Gracias al propietario del área Los Picos de Davis por el permiso otorgado para llevar a cabo esta investigación, y a los revisores por los valiosos comentarios que mejoraron el manuscrito.
- Fin de la versión en español**
- =====
- Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Stoffel, M., & Villanueva-Díaz, J. (2018). Potencial dendrogeomorfológico de coníferas en volcanes del centro de México. *Bosque*, 39(2), 191–204. doi: 10.4067/S0717-92002018000200191
- Garrote, J., Díez-Herrero, A., Génova, M., Bodoque, J. M., Perucha, M. A., & Mayer, P. L. (2018). Improving flood maps in ungauged fluvial basins with dendrogeomorphological data. An example from the Caldera de Taburiente National Park (Canary Islands, Spain). *Geosciences*, 8(8), 300. doi: 10.3390/geosciences8080300
- Gottesfeld, A. S. (1996). British Columbia flood scars: maximum flood-stage indicator. *Geomorphology*, 14(4), 319–325. doi: 10.1016/0169-555X(95)00045-7
- Hernández, A., & Bravo, C. (2008). Reseña del huracán “DOLLY”. Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2008-Dolly.pdf>
- Hernández, A., & Bravo, C. (2010). Reseña del huracán “Alex” del Océano Atlántico. Retrieved from <http://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2010-Alex.pdf>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/261223/trb-43-069-078.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Marco geoestadístico municipal 2018. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463674658>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Múzquiz, Coahuila de Zaragoza. Clave geoestadística 05020. Retrieved from http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/05/05020.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Carta de datos topográficos H13D59 (Coahuila de Zaragoza). Escala 1:50 000, serie III. México: Author.
- Kogelnig-Mayer, B., Stoffel, M., Schneuwly-Bollschweiler, M., Hübl, J., & Rudolf-Miklau, F. (2011). Possibilities and limitations of dendrogeomorphic time-series reconstructions on sites influenced by debris flows and frequent snow avalanche activity. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 43(4), 649–658. doi: 10.1657/1938-4246-43.4.649

- Miranda, R., Puy, M. J., & Martínez, J. J. (2007). El árbol: fuente de información de las ciencias de la tierra. *Elementos: Ciencia y Cultura*, 14(67), 41–43. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/294/29406708.pdf>
- Muñoz-Salinas, E., & Castillo, M. (2015). Streamflow and sediment load assessment from 1950 to 2006 in the Usumacinta and Grijalva Rivers (Southern Mexico) and the influence of ENSO. *CATENA*, 127, 270–278. doi: 10.1016/j.catena.2015.01.007
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J. A. Granados, S., Birkel, C., & Stoffel, M. (2020). Dendrogeomorphic reconstruction of floods in a dynamic tropical river. *Geomorphology*, 352, 107133. doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107133
- Robinson, W. J., & Evans, R. (1980). A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin*, 40, 59–64. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/260443/trb-40-059-064.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Roca, M., Martín-Vide, J. P., & Moreta, P. J. M. (2008). Modelling a torrential event in a river confluence. *Journal of Hydrology*, 364(3-4), 207–215. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.10.020
- Schweingruber, F. H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F., & IndBrfu, O. U. (1990). Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, 8, 9–38. Retrieved from <https://www.naturfagsenteret.no/c1761334/binfil/download2.php?tid=1856970>
- Shroder, J. (1978). Dendrogeomorphological analysis of mass movement on table cliffs plateau, UTA. *Quaternary Research*, 9(2), 168–185. doi: 10.1016/0033-5894(78)90065-0
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D. R., & Luckman, B. H. (2010). *Tree rings and natural hazards: a state-of-art*. Netherlands: Springer. doi: 10.1007/978-90-481-8736-2
- Stoffel, M., & Corona, C. (2014). Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree-Ring Research*, 70(1), 3–20. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/630491/StoffelCoronaTRR70-1-2014.pdf?sequence=1>
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to the tree-ring dating*. USA: The University of Arizona Press.
- Terán, C. A. R. (2010). *Escenarios de lluvia en México*. Tesis doctoral, CIEMAD-IPN, Ciudad de México, México. Retrieved from <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/23294>