

## Potencial dendrogeomorfológico de coníferas en volcanes del centro de México

### Dendrogeomorphological potential of conifers on volcanoes of central Mexico

Osvaldo Franco-Ramos <sup>a\*</sup>, Lorenzo Vázquez-Selem <sup>a</sup>, Markus Stoffel <sup>b,c</sup>, José Villanueva Díaz <sup>d</sup>

\*Autor de correspondencia: <sup>a</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México, tel.: +525556224240, ofranco@igg.unam.mx

<sup>b</sup>University of Geneva, Dendrolab.ch., Department of Earth Sciences, Rue des Maraîchers 13, CH-1205 Geneva, Switzerland.

<sup>c</sup>University of Geneva, Climate Change and Impacts, Institute of Environmental Sciences, 7 route de Drize, CH-1227 Carouge, Switzerland.

<sup>d</sup>INIFAP, CENID-RASPA, Gómez Palacio, Durango, Km 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento, Gómez Palacio, Dgo. 35140, México.

#### SUMMARY

Geomorphological processes can influence the growth of the forest or individual trees. Based on dendrogeomorphological methods, we analyzed growth disturbances on several conifers affected by lahars and rockfalls, namely: *Pinus hartwegii*, *Pinus leiophylla*, *Pinus ayacahuite*, *Abies religiosa* and *Juniperus monticola*, localized on volcanic terrains of central Mexico. We also studied the age of these species. The main visible damages on trees by lahars were burial (35 %) and wounds (34 %) of stems. The main growth disturbances on tree-rings are growth suppression (31 %) and tangential rows of traumatic resin ducts (30 %). In the case of rockfalls the most common visible damages on trees were wounds (61 %) and decapitation or loss of apex (20 %). The main growth disturbances were growth suppression (51 %), growth release (16 %) and injuries (15 %). The trunks of young trees had a superior number of impacts due to lahars and falling rocks than those presented by long-lived trees. Trees of *A. religiosa* have better dendrogeomorphological potential than *Pinus* spp. since they form tangential rows of traumatic resin ducts and are more sensitive to impacts and burial by rocks and sediment. For the determination of the minimum age and the stabilization period of landforms, the conifers analyzed were useful for up to hundreds of years, mainly *Pinus hartwegii* (500-600 years old) and *Juniperus monticola* (800-850 years old). Results show that dendrochronological methods can be useful in the study of geomorphological processes on temperate forests of central Mexico.

*Key words:* dendrogeomorphology, lahars, rockfalls, landform minimum age, central Mexico.

#### RESUMEN

Los procesos geomorfológicos pueden alterar el crecimiento natural de un rodal o de un árbol. A base de métodos dendrogeomorfológicos se analizaron disturbios en árboles afectados por lahares y caída de rocas en *Pinus hartwegii*, *Pinus leiophylla*, *Pinus ayacahuite*, *Abies religiosa* y *Juniperus monticola*, localizados en áreas volcánicas del centro de México. Los daños visibles más comunes en los árboles afectados por lahares fueron: sepultamiento de troncos (35 %) y heridas de impacto (34 %). Los disturbios más comunes encontrados en los anillos de crecimiento fueron: supresiones en crecimiento (31 %) y filas tangenciales de ductos de resina traumáticos (TRD) (30 %). En los árboles afectados por caída de rocas, los daños visibles más frecuentes fueron: impactos (61 %) y decapitación (20 %). Los disturbios más comunes en los anillos de crecimiento fueron: supresiones (51 %), realces (16 %) y cicatrices de impacto (15 %). Los troncos de los árboles jóvenes presentaron mayor número de impactos por lahares y caída de rocas que los árboles más longevos. *Abies religiosa* tiene mejor potencial dendrogeomorfológico que *Pinus* spp., ya que forma TRD y es más sensible a impactos y sepultamientos por rocas y sedimento. Para el estudio de edades mínimas de relieve y de estabilización geomorfológica, las especies analizadas fueron útiles para eventos de decenas a cientos de años atrás, destacando *P. hartwegii* (500-600 años) y *J. monticola* (800-850 años). Los métodos dendrocronológicos para estudios de procesos geomorfológicos tienen un buen potencial en bosques templados del centro de México.

*Palabras clave:* dendrogeomorfología, lahares, caída de rocas, edades mínimas de relieve y centro de México.

#### INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Selby (1982), en ambientes de montaña los procesos de remoción en masa son de los fenóme-

nos más frecuentes y peligrosos. Se trata de movimientos masivos de roca, suelo, vegetación que ocurren en laderas inclinadas (> 20°), favorecidos por la gravedad y desencadenados por factores geológicos, climáticos y antrópicos.

Los principales tipos son: caída de rocas, deslizamientos, avalanchas, vuelcos, reptación, y flujos de escombros, conocidos como lahares cuando el proceso ocurre en ambientes volcánicos (Vallance 2000). La mayor parte del centro de México presenta relieve geológicamente joven, construido durante el Cuaternario y se caracteriza por el predominio de sistemas montañosos de origen volcánico y una tectónica activa (Lugo-Hubp 1990). Esta condición sugiere que los procesos geomorfológicos deben ocurrir con cierta frecuencia, sobre todo en áreas geomorfológicamente activas, con escasa vegetación e importantes cambios de uso de suelo, afectadas por fenómenos hidrometeorológicos como los huracanes provenientes del Océano Pacífico y Golfo de México.

En los sistemas montañosos volcánicos del centro de México, se tiene un amplio conocimiento de los tipos y características de los procesos de remoción en masa (Capra *et al.* 2003, Alcántara-Ayala 2004). Sin embargo, se conoce muy poco de lo que sucede con el bosque antes, durante o después de un evento geomorfológico en el interior de las cuencas hidrológicas, así como su frecuencia y magnitud, que en muchos casos puede ser buen indicador del origen, dinámica, poder destructivo y alcances de los procesos de remoción en masa en ambientes volcánicos (Bollschweiler *et al.* 2010).

La dendrogeomorfología estudia la relación entre los procesos geomorfológicos y los disturbios originados en los árboles afectados, es útil para fechar los eventos, determinar su magnitud, frecuencia y alcance espacial. La base de este método es la relación proceso-evento-respuesta, donde el proceso corresponde a los fenómenos geomorfológicos que se llevan a cabo en un tiempo y espacio determinados como caídas de roca, lahares, flujos de escombros, inundaciones, avalanchas de nieve, etc. (Stoffel y Bollschweiler 2008). El evento se considera cuando un árbol o rodal son afectados por alguno de los procesos mencionados. La forma de afectación puede ser impactos, inclinación, sepultamiento, o decapitación, entre otros. La respuesta es el tipo e intensidad del disturbio en los anillos de crecimiento, como cicatrices de impacto, filas tangenciales de ductos de resina traumáticos (TRD, por sus siglas en inglés), madera de reacción, supresión en crecimiento, realce en crecimiento, anillos excéntricos y tejidos callosos (Stoffel y Corona 2014).

En los últimos años, la dendrocronología se ha aplicado de muchas maneras para entender la dinámica de diversos fenómenos geológicos y geomorfológicos, incluyendo el análisis de la frecuencia y magnitud de caídas de rocas (Trappmann y Stoffel 2015), la reconstrucción espacio-temporal de flujos de escombros (Salaorni *et al.* 2017) y la determinación de edades mínimas de nuevos relieves (Pierson 2007, Kroh *et al.* 2008, Koch 2009). En México, los estudios dendrocronológicos de varias coníferas de ambientes templados y subtropicales han demostrado que estas forman anillos anuales bien definidos que pueden alcanzar edades de varios siglos, y son idóneas

para estudios paleoambientales, destacando el caso de *Taxodium mucronatum* Ten., que alcanza más de mil años (Villanueva *et al.* 2010). Varias de las especies utilizadas en análisis dendroclimáticos también podrían utilizarse para reconstruir procesos morfodinámicos y/o para determinar periodos de estabilización-desestabilización geomorfológica en laderas y barrancos. Los trabajos pioneros de dendrogeomorfología son los realizados en terrenos volcánicos del centro de México por Bollschweiler *et al.* (2010), Stoffel *et al.* (2011) y Franco-Ramos *et al.* (2013, 2016ab, 2017ab).

Los objetivos centrales de este estudio son (i) exponer el potencial dendrocronológico de algunas especies de coníferas del centro de México para fechar eventos geomorfológicos del pasado reciente; (ii) conocer los tipos y cantidad de daños visibles en los troncos de árboles afectados por procesos geomorfológicos y (iii) el tipo y porcentaje de disturbios en los anillos de crecimiento de árboles afectados, (iv) relacionar la edad de los árboles con los disturbios por lahares y caída de rocas. Las hipótesis de este trabajo son dos: la primera, que los árboles que habitan las laderas de montaña inestables del centro de México son constantemente afectados por procesos geomorfológicos que alteran su crecimiento normal y edad. La segunda, que, a pesar de los problemas de crecimiento de los árboles afectados por procesos, estos se pueden fechar y son útiles para identificar disturbios en los anillos de crecimiento con una resolución anual y permiten estimar edades mínimas del relieve y estabilización geomorfológica.

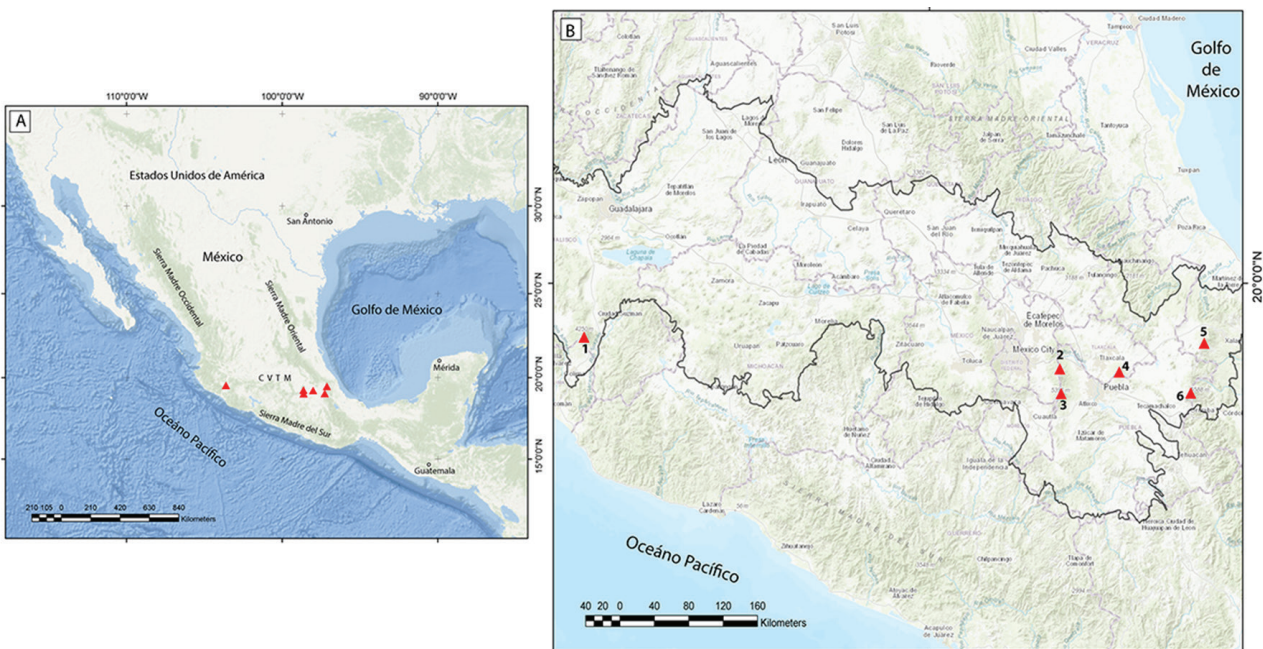
## MÉTODOS

*Sitios de estudio.* En el área de estudio se analizaron sitios de trabajo que se localizan en terrenos volcánicos del centro de México (figura 1). En las barrancas Huiloac, Nexpayantla y Pelagallinas-La Venta del volcán Popocatepetl, entre los 2.000 y 3.500 m s.n.m., se muestrearon árboles de *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus ayacahuite* Ehrenb., y *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. En el valle El Rodadero, al norte del volcán Iztaccíhuatl sobre el límite superior del bosque (~4.000 m s.n.m.), se colectaron árboles de *P. hartwegii*. En las barrancas Montegrande y La Arena al sur del volcán de Colima, alrededor de los 2.000 m s.n.m., se extrajeron muestras de árboles de *Pinus leiophylla* Schiede ex. Schltdl. et Cham. En la barranca Axaltzintle, al noreste del volcán La Malinche, a una altitud aproximada de 2.500 m s.n.m., se colectaron árboles de *A. religiosa*. En el valle La Teta al noroeste del volcán Cofre de Perote, sobre el límite superior del bosque (~4.000 m s.n.m.), fueron muestras de árboles de *P. hartwegii*. En el flujo de lava localizado al sur del volcán Pico de Orizaba, entre 4.000 y 4.500 m s.n.m., se muestrearon individuos vivos y principalmente muertos del arbusto alpino *Juniperus monticola* Martínez f. *orizabensis* Martínez.

*Estrategias de muestreo en campo.* El muestreo dendrogeomorfológico se llevó a cabo en barrancas y laderas que presentaron signos de inestabilidad por procesos geomorfológicos, es decir, en árboles impactados, sepultados, inclinados, decapitados, en troncos con raíces expuestas por lahares (figura 2), en árboles con impactos por desprendimientos de roca (figura 3) y en individuos dispuestos sobre superficies geomórficas de aspecto reciente, como flujos de lava (figura 4), lóbulos de caída y al interior de barrancas para conocer los periodos de estabilización geomorfológica. En individuos impactados, las muestras se tomaron lo más cerca posible de la cicatriz de impacto, para observar con claridad la señal del evento geomorfológico (Stoffel y Corona 2014). En árboles inclinados se tomaron dos núcleos de madera en el ángulo máximo, una en el sector del tronco más expuesto al proceso morfológico a estudiar, con orientación ladera arriba (lado C) y la otra muestra del lado opuesto, que es la cara más protegida a los procesos y en dirección ladera abajo (lado D). La utilidad de coleccionar las caras C y D, es para identificar con mayor claridad la presencia de madera de reacción, supresión de crecimiento y/o crecimiento excéntrico de los anillos anuales (figura 5A). Los lados A y B también pueden ser afectados por algún proceso

geomorfológico y son útiles para reconocer otras anomalías del pasado, así como para identificar anillos perdidos o falsos y precisar el co-fechado entre las muestras de cada árbol (figura 5A). En árboles sepultados, los núcleos se extrajeron lo más cerca posible del relleno detrítico o en la cara expuesta del tronco. Para estimar las edades mínimas de relieve y estabilización geomorfológica se coleccionaron núcleos y secciones transversales lo más cerca posible a la base del tronco, para poder tener la mayoría de los anillos de crecimiento y una edad del arbolado más precisa. Para la extracción de núcleos utilizamos barrenos Pressler de distinta longitud (figura 5B). Para la toma de secciones transversales y cuñas en árboles se empleó una motosierra eléctrica. En cada árbol se coleccionaron al menos dos muestras, buscando llegar a la médula para obtener todos los anillos.

En total se obtuvieron 1.174 muestras (cuadro 1), de las cuales 1.095 fueron núcleos de crecimiento o virutas (figura 5D), 62 secciones transversales (figura 5C) y 17 cuñas. En campo cada árbol muestreado fue posicionado mediante un GPS con un rango de error de  $\pm 3$  m. En las barrancas del sur del volcán de Colima se coleccionaron 78 árboles vivos de *P. leiophylla*, En el Popocatépetl 68 árboles vivos de *A. religiosa*, *P. hartwegii* y *P. ayacahuite*



**Figura 1.** Localización del área y sitios de estudio. A) Principales provincias fisiográficas de México. El área de estudio se localiza en el centro de México, en la provincia volcánica Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM). B) Los sitios de estudio corresponden a terrenos volcánicos templados y sub-tropicales del CVTM (línea negra): 1 = Colima (3.860 m s.n.m.), 2 = Iztaccihuatl (5.228 m s.n.m.), 3 = Popocatepetl (5.460 m s.n.m.), 4 = La Malinche (4.461 m s.n.m.), 5 = Cofre de Perote (4.282 m s.n.m.) y 6 = Pico de Orizaba (5.640 m s.n.m.).

Location of study area and sampled sites. A) Main physiographic provinces of Mexico. The study area is on central Mexico namely Trans-Mexican volcanic belt. B) The sampled sites are on temperate and sub-tropical volcanic terrains (black line): 1 = Colima (3,860 m a.s.l.), 2 = Iztaccihuatl (5,228 m a.s.l.), 3 = Popocatepetl (5,460 m a.s.l.), 4 = La Malinche (4,461 m a.s.l.), 5 = Cofre de Perote (4,282 m a.s.l.) and 6 = Pico de Orizaba (5,640 m a.s.l.).

en la barranca Huiloac, 74 árboles vivos de *P. hartwegii* en la barranca Pelagallinas-La Venta, y 1,00 individuos vivos de *A. religiosa* en la barranca Nexpayantla. En La Malinche 86 árboles vivos en la barranca Axaltzintle. En el Iztaccíhuatl 24 especímenes vivos de *P. hartwegii* en el talud El Rodadero (volcán Iztaccíhuatl). En el Cofre de Perote, 1,10 árboles vivos de *P. hartwegii* en el talud La Teta. Finalmente, en el Pico de Orizaba, sobre el flujo de lava localizado en el lado suroeste del volcán, 27 individuos muertos y cinco vivos del arbusto alpino de *J. monticola*.

*Análisis en laboratorio.* En laboratorio las muestras fueron preparadas de acuerdo con criterios estandarizados para su conteo y fechado. Una vez que asignamos las fechas a cada anillo de crecimiento de todas las muestras, estas se midieron utilizando un microscopio estereoscópico, un micrómetro digital LINTAB (Rinntech 2016) y una de tipo VELMEX de precisión 0,001 (Robinson y Evans 1980). Para el análisis de correlación visual y co-fechado entre las series medidas para cada sitio de estudio, se utilizó el programa de análisis de series de tiempo TSAP-Win



**Figura 2.** Disturbios en coníferas por lahares sin e intra-eruptivos: A) *A. religiosa*, volcán La Malinche, B) *P. leiophylla*, volcán de Colima, C) *P. hartwegii* y D) *P. ayacahuite* en el volcán Popocatepetl. Las flechas rojas indican la cara del tronco impactada.

Growth disturbances on conifers by syn-eruptive and post-eruptive lahars: A) *A. religiosa* on La Malinche volcano, B) *P. leiophylla* on Colima volcano, C) *P. hartwegii*; and D) *P. ayacahuite* on Popocatepetl volcano. Red arrows indicate the scars in the stem.

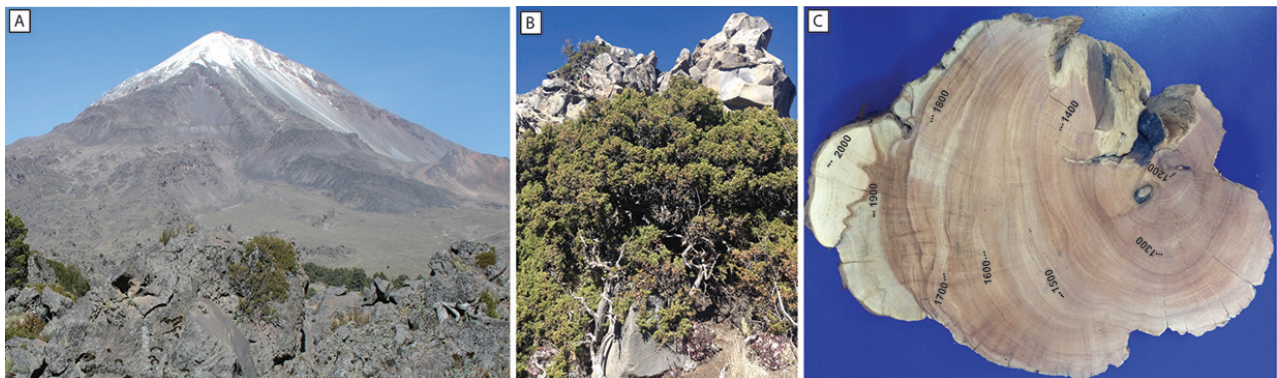
(Rinntech 2016). Para la validación del fechado e inter-correlación de las series se utilizó el programa COFECHA (Holmes 1983). La edad de los árboles, la interpretación y el análisis de los disturbios en los anillos de crecimiento, asociados a procesos geomorfológicos (lahares y caída de rocas), se realizó con el conteo preciso de las muestras y la observación de las virutas y secciones, a través del microscopio estereoscópico 10X y siguiendo la propuesta de Stoffel y Corona (2014).

Para la estimación de edades mínimas de relieve y periodo de estabilización geomorfológica, a la edad máxima de cada árbol se le aplicó una calibración considerando la altura de la muestra, el número de anillos faltantes en el caso de no haber llegado a la médula, y el periodo de écesis que en ambientes volcánicos templados del centro de México (~4.000 m s.n.m.), se estima que puede ser de entre 7 y 10 años (Franco-Ramos *et al.* 2017a).



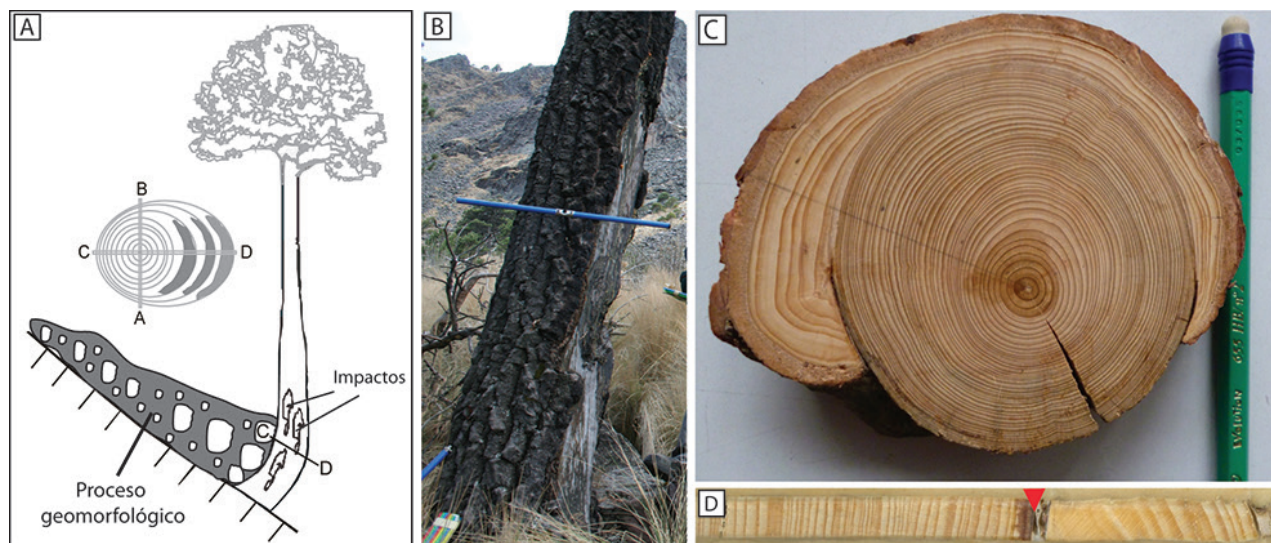
**Figura 3.** Impactos por caída de roca en los individuos de *P. hartwegii*, A) Talud detrítico del valle La Teta y B) Talud detrítico El Rodadero, Iztaccíhuatl. La flecha roja indica la cara del tronco impactada, en algunos casos aún se observa el bloque que impactó al árbol.

Scars on the stem of *P. hartwegii* by rockfall events. A) Detritic talus of Valle La Teta, Cofre de Perote; and B) detritic talus at El Rodadero, Iztaccíhuatl volcano.



**Figura 4.** A) Flujo de lava al sur del volcán Pico de Orizaba, colonizado por *J. monticola* y *P. hartwegii* alrededor de los 4.000 m snm. B) Detalle del enebro *J. monticola*, sobre las crestas de lava. C) Sección transversal de un individuo de *J. monticola* con una edad superior a los 834 años.

A) Lava flow on southern slope of Pico de Orizaba volcano colonized by *Juniperus monticola* and *Pinus hartwegii*. B) Detail of *J. monticola* above lava flow ridge. C) Cross section > 834 years old sample of *J. monticola*.



**Figura 5.** Para el análisis dendrogeomorfológico se utilizaron virutas, cuñas y secciones transversales. A) Caras del árbol utilizadas para el muestreo dendrogeomorfológico con base en los criterios de Stoffel y Bollschweiler, 2008. Núcleo en la cara “C” es la que mira hacia el origen del proceso. B) En árboles vivos con impactos se tomaron muestras muy cerca de la cicatriz, además se obtuvieron virutas de árboles sin disturbios para cronología de referencia. C) Las secciones transversales permiten visualizar un mayor número de disturbios, como el impacto ocurrido en este espécimen de *A. religiosa* en el año 2005 en el volcán La Malinche. D) Viruta de *P. hartwegii* del Cofre de Perote. La variabilidad en el ancho de los anillos de crecimiento y la cicatriz de impacto por caída de roca en 1998 (flecha roja), sugiere una sensibilidad climática y geomorfológica. Posterior al evento se identificaron anillos “ausentes” y realce en el crecimiento.

Different types of samples for dendrogeomorphological analyses. A) Sampling strategies based on Stoffel and Bollschweiler (2008). Core “C” is taken upslope. B) On live trees with damage we used increment borer close to the scars, in addition we obtained samples from trees without disturbances for reference chronology. C) Cross section on *A. religiosa* showing growth disturbances by a geomorphologic event in 2005 on La Malinche volcano. D) Increment core of *P. hartwegii* on Cofre de Perote volcano; the variability in tree-ring growth and the injury by rockfall dated in AD 1998 indicate the climatic and geomorphic sensibility of the tree.

## RESULTADOS

Las distintas especies de coníferas que se analizaron en este estudio registraron edades que varían de decenas a cientos de años, sin superar los 1.000 años. Los árboles más viejos se encontraron en superficies geomorfológicas relativamente estabilizadas como terrazas altas, laderas de barranco y lóbulos de caída antiguos. En cambio, los individuos más jóvenes se reconocieron en superficies morfo-dinámicamente activas, como lechos fluviales, terrazas bajas y lóbulos de caída recientes. La especie analizada más longeva es el arbusto leñoso alpino *J. monticola* con edades superiores a 800 años, lo que la hace la segunda más longeva hasta ahora identificada en México (solo después de *Taxodium mucronatum*, Villanueva Díaz *et al.* 2010). En general se identificaron valores bajos de intercorrelación en las series dendrocronológicas de ancho de anillo en el programa COFECHA ( $P < 0,01$ ). Los valores más altos de inter-correlación se obtuvieron en las series de *P. leiophylla* (0,5) de las barrancas Montegrande-La Arena y en *A. religiosa* (0,5) de la barranca Axaltzintle. Los valores intermedios de intercorrelación fueron en *A. religiosa* (0,4) de la barranca Nexpayantla y las series de *J. monticola* (0,4) del Pico de Orizaba. El valor más bajo de inter-correlación, se

observó en las series de *P. hartwegii* (0,3) en el talud detrítico del valle La Teta, Cofre de Perote (cuadro 1).

*Disturbios en los anillos de crecimiento de árboles afectados por lahares en el centro de México.* Los individuos más longevos para reconstruir lahares en el centro de México fueron los de *P. leiophylla*, muestreados en las barrancas Montegrande y La Arena al sur del volcán de Colima, con una edad promedio de  $77 \pm 12$  años (árbol más viejo: 98 años). Los árboles más jóvenes se encontraron sobre las terrazas laháricas en el interior de las barrancas. En cambio, los árboles más viejos (~ 100 años) se encontraron afuera de las barrancas, que son los sitios más estables y protegidos por el paso de lahares y flujos piroclásticos. Los efectos visibles en los árboles de *P. leiophylla* más recurrentes en el interior de las barrancas, fueron troncos sepultados (49 %), inclinados (33 %) y los individuos impactados solo fueron el 17 % (figura 2B; cuadro 2), como resultado del paso constante de lahares post-eruptivos y sin-eruptivos. Los disturbios encontrados en los anillos de crecimiento fueron principalmente supresiones en el crecimiento con el 53 % de los casos, seguido de tejidos callosos (14 %), realces en el crecimiento (11 %) y cicatrices de impacto (figura 6A) (10 %).



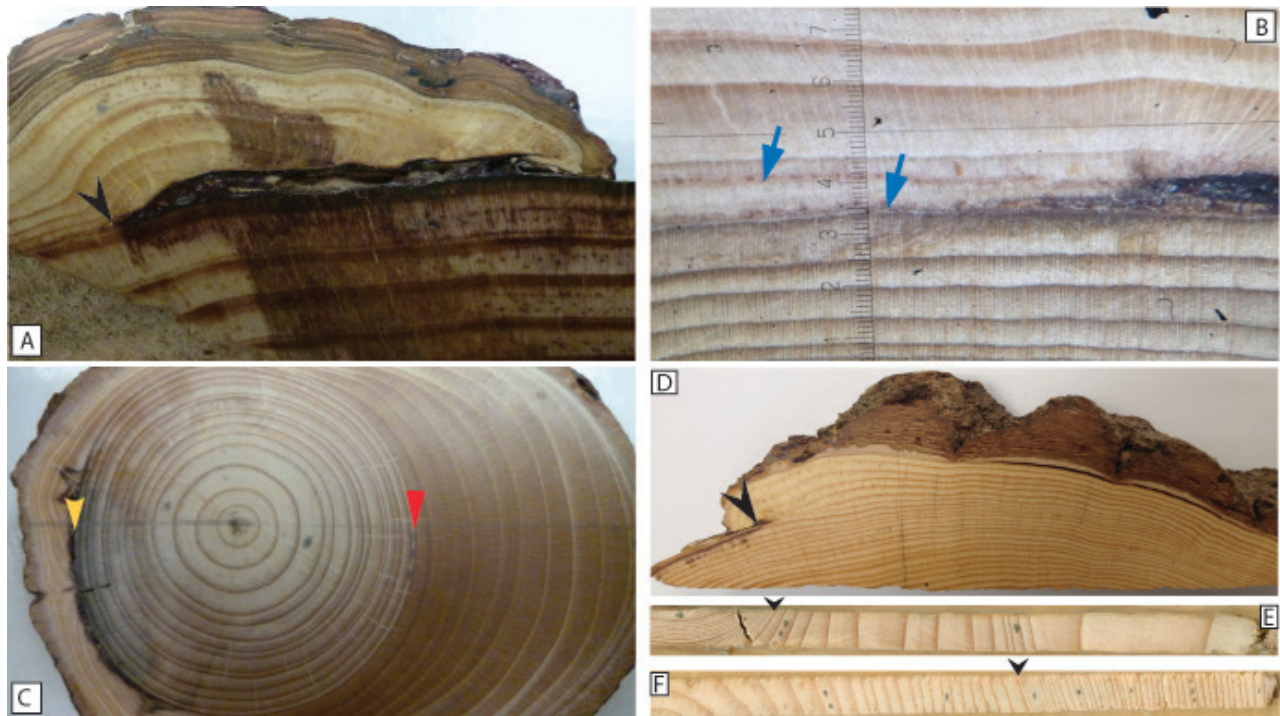
**Cuadro 2.** Cantidad absoluta y relativa (porcentaje) de daños visibles en los árboles afectados por lahares y caída de rocas por sitio de estudio.

Absolute (abs.) and relative (rel.) number of visible growth defects observed on stems affected by lahars and rockfalls for each study site.

Característica	Lahares sin-eruptivos e intra-eruptivos										Caída de rocas																													
	<i>Abies religiosa</i>	<i>Pinus ayacahuite</i>	<i>Pinus hartwegii</i>	<i>Abies religiosa</i>	<i>Abies religiosa</i>	<i>Pinus leiophylla</i>	Total	<i>Pinus hartwegii</i>	<i>Pinus hartwegii</i>	Total																														
	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)																										
Decapitación	5	11	2	7	5	14	0	0	0	0	12	3	11	15	15	25	26	20																						
Impactos	19	40	10	33	10	27	30	43	40	45	16	17	125	34	58	81	23	38	61																					
Troncos inclinados	13	28	10	33	10	27	4	6	10	11	30	33	77	21	3	4	7	12	10	8																				
Troncos sepultados	5	11	4	13	10	27	34	49	28	32	45	49	126	35	0	0	15	25	15	11																				
Raíces expuestas	5	11	4	13	2	5	1	1	10	11	1	1	23	6	0	0	0	0	0	0																				
Subtotal	47	100	30	100	37	100	69	100	88	100	92	100	363	100	72	100	60	100	132	100																				
Edad promedio en años	58					49					44					77					-					85					155					-				

abs: absoluto; rel: relativo.





**Figura 6.** Principales disturbios en los anillos de crecimiento de los árboles afectados por procesos geomorfológicos como lahares y caída de rocas. A) Cicatriz de impacto en *P. leiophylla* en madera temprana del año 2005 (flecha negra), volcán de Colima. B) Cicatriz de impacto y ductos de resina traumáticos en *A. religiosa* en madera temprana del año 2005 (flechas azules), volcán Popocatepetl. C) Cicatriz de impacto (flecha amarilla), crecimiento excéntrico y madera de reacción (flecha roja) en *A. religiosa* en madera tardía del año 2001, volcán La Malinche. D) Cicatriz de impacto en *P. hartwegii* en madera tardía del año 2005 (flecha negra), volcán Cofre de Perote. E) Realce de crecimiento en *A. religiosa* en el año 1998 (flecha negra), volcán La Malinche. F) Crecimiento suprimido en *P. hartwegii* en año 1967 (flecha negra), volcán Cofre de Perote.

Main growth disturbances on trees affected by geomorphic processes such as lahars and rockfalls. A) Injury in the early wood period of 2005 on *P. leiophylla*, Colima volcano (black arrow). B) Injury and tangential row of traumatic resin ducts in the early wood period of 2005 on *A. religiosa*, Popocatepetl volcano (blue arrows). C) Injury (yellow arrow), eccentric growth and reaction wood (red arrow) in 2001 on *A. religiosa*, La Malinche volcano. D) Injury in *P. hartwegii* on late wood period in 2005, Cofre de Perote volcano (black arrow). E) Growth release in 1998 on *A. religiosa*, La Malinche volcano (black arrow). F) Growth suppression in 1967 on *P. hartwegii*, Cofre de Perote volcano (black arrow).

En la barranca Huiloac, localizada al NE del V. Popocatepetl, donde la edad promedio de los árboles analizados fue de  $58 \pm 38$  años (árbol más viejo: 213 años). Las especies muestreadas fueron *P. hartwegii*, *P. ayacahuite* y *A. religiosa*, en las cuales se observaron principalmente troncos impactados, inclinados y sepultados por bloques y sedimento provenientes de los lahares que se emplazan en la cara norte del volcán (figura 2C, D). La especie *A. religiosa* fue la más sensible a presentar heridas en las caras expuestas del tronco con el 40 % (cuadro 2). En relación con las cicatrices de impacto identificadas en los anillos de crecimiento, el principal disturbio encontrado en *A. religiosa* fueron las columnas tangenciales de ductos de resina traumáticos (54 %), disturbio que prácticamente fue nulo en los pinos de la barranca Huiloac. El disturbio más común identificado en *P. hartwegii* fue la madera de compresión (31 %) y supresiones en crecimiento de anillo (24 %). En *P. ayacahuite* fueron las supresiones en crecimiento (39 %) y realces en crecimiento (25 %) (cuadro 3).

En la barranca Nexpayantla (volcán Popocatepetl) se encontraron los rodales más jóvenes de *A. religiosa*, con edades promedio de  $44 \pm 17$  (árbol más viejo: 104 años), de los cuales 45 % presentaron impactos visibles y el 32 % eran troncos sepultados por detritos y sedimento (cuadro 2). De este modo, los principales disturbios identificados en los anillos de crecimiento de *A. religiosa* en los dos sitios de estudio fueron los ductos de resina traumáticos (48 % y 39 %, respectivamente) (figura 6B), supresiones en crecimiento (30 % y 23 %, respectivamente) y cicatrices de impacto con el 10 % y 22 % respectivamente (cuadro 3). Sin embargo, en algunos árboles de *A. religiosa* inclinados se observó madera de compresión y anillos excéntricos (figura 6C) y realces en crecimiento (figura 6E).

En las barrancas Axaltzintle (volcán La Malinche) la edad promedio de *A. religiosa*, fue de  $49 \pm 16$  años (árbol más viejo: 95 años). Si bien, en estos dos sitios los disturbios por procesos geomorfológicos fueron muy recientes (solo de algunas decenas de años atrás), la ventaja del

**Cuadro 3.** Cantidad absoluta y relativa (porcentaje) de disturbios encontrados en los anillos de crecimiento de árboles afectados por lahares y caída de rocas por sitio de estudio. Absolute (abs.) and relative (rel.) number of growth disturbances by lahars and rockfalls for each study site.

Característica	Lahares sin-eruptivos e intra-eruptivos										Caída de rocas										
	Barranca Huiloac, Popocatepetl		Barranca Axtzintle, Nexpayantla, y La Malinche		Barranca Popocatepetl		Barranca Montegrande y La Arena, Volcán de Colima		Total		Talud El Rodadero, Iztacelhuatl		Talud La Teta, Cofre de Perote		Total						
	<i>Abies religiosa</i>	<i>Pinus ayacahuite</i>	<i>Pinus hartwegii</i>	<i>Abies religiosa</i>	<i>Abies religiosa</i>	<i>Pinus leiophylla</i>	<i>Pinus hartwegii</i>	<i>Pinus hartwegii</i>	<i>Pinus hartwegii</i>	<i>Pinus hartwegii</i>											
Disturbios en anillos de crecimiento	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)	abs.	rel. (%)					
Realce de crecimiento	22	9	26	25	18	20	5	2	36	12	26	11	133	11	63	22	0	0	63	16	
Supresión de crecimiento	45	19	41	39	21	24	66	30	68	23	124	53	365	31	116	40	84	78	200	51	
Tejido calloso	20	8	10	10	11	13	2	1	10	3	33	14	86	7	33	11	8	7	41	10	
Cicatriz	13	5	11	11	10	11	22	10	63	22	24	10	143	12	44	15	14	13	58	15	
Madera de compresión	11	5	14	13	27	31	6	3	0	0	13	6	71	6	31	11	2	2	33	8	
Anillos excéntricos	0	0	0	0	0	0	11	5	0	0	12	5	23	2	0	0	0	0	0	0	
Ductos de resina traumáticos	128	54	2	2	1	1	105	48	115	39	0	0	351	30	0	0	0	0	0	0	
Subtotal	239	100	104	100	88	100	217	100	292	100	232	100	1172	100	287	98	108	100	395	100	
Edad promedio en años	58					49					44		77		-		85		155		-

abs: absoluto; rel: relativo.

*A. religiosa* es que es altamente sensible a los efectos ocasionados por lahares. En la barranca Axaltzintle se observó en campo que el 49 % de los individuos estaban sepultados por bloques y sedimento y el 43 % de los troncos estaban impactados (figura 2A).

*Disturbios en los anillos de crecimiento de árboles afectados por caída de rocas en el centro de México.* En el talud detrítico del valle La Teta, se encontró un bosque de *P. hartwegii* relativamente maduro, con una edad promedio de los árboles de  $155 \pm 91$  años (árbol más viejo: 451 años), incluso se pueden encontrar algunos individuos con una edad de 600 años o más. En este sitio se observaron muchos árboles claramente perturbados por los desprendimientos de bloques (figura 3A), el 38 % de ellos presentaron heridas en las caras de los troncos expuestas, en el 25 % se observaron árboles decapitados y en el otro 25 % troncos sepultados por detritos y bloques. El 12 % restante fueron troncos inclinados (cuadro 2). En ese sentido, los disturbios más frecuentemente identificados en *P. hartwegii* fueron las supresiones súbitas en el crecimiento (78 %) (figura 6F), seguido de las cicatrices de impacto (13 %) (figura 6D) y tejidos callosos (7 %).

Otro sitio con una dinámica geomorfológica y dendrocronológica similar al talud detrítico del valle La Teta, fue el talud detrítico El Rodadero (norte del Iztaccíhuatl). Aquí los árboles de *P. hartwegii* fueron más jóvenes con una edad promedio de  $85 \pm 39$  años (árbol más viejo: 209 años). Los desprendimientos de roca que ocurren en la zona han afectado el crecimiento de la vegetación arbustiva y arbórea. El 81 % de los árboles muestreados presentaron heridas visibles en alguna cara del tronco (figura 3B). El 15 % de los individuos fueron decapitados y solo en el 4 % restante observamos troncos con inclinación (cuadro 2). Los disturbios en los anillos de crecimiento identificados

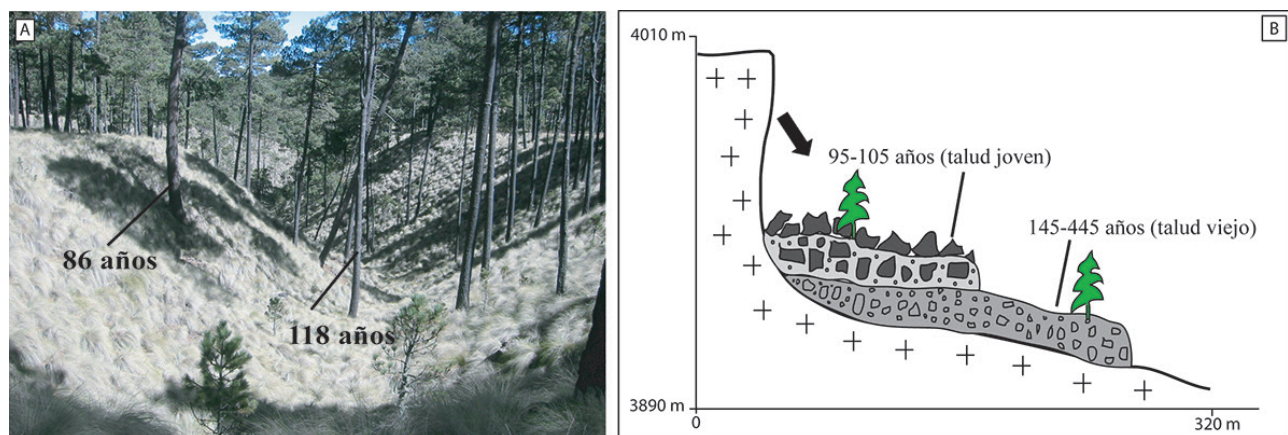
fueron, en primer lugar, supresiones en crecimiento con el 40 %, seguido de realces en crecimiento (22 %), cicatrices de impacto (15 %), tejido calloso (11 %) y madera de compresión (11 %).

*Edad mínima de relieves y estabilización geomorfológica.*

El flujo de lava que se encuentra al sur del Pico de Orizaba (~4.000 m s.n.m.), está colonizado por *P. hartwegii* de ~200 años. Por encima de los 4.000 m s.n.m. predomina *J. monticola* con una edad promedio de  $368 \pm 157$  años (figura 4A), muchos de los arbustos están muertos posiblemente por algún incendio forestal en los periodos de sequía. Sin embargo, se encontró que el individuo vivo más longevo tiene 834 años. De este modo se puede decir que la edad mínima del flujo de lava es de ~850 años (figura 4B).

La variabilidad en las edades de los árboles localizados al interior de las barrancas Pelagallinas-La Venta (norte del Popocatepetl), se pudo relacionar con los periodos de estabilización geomorfológica. La edad máxima encontrada en los árboles supera los ~200 años, por lo general son individuos que se localizan en las laderas de los barrancos, geomorfológicamente más estables que las cabeceras y lechos fluviales. Por ejemplo, en un sector de la barranca Pelagallinas (figura 7A) se observa un individuo de *P. hartwegii* de ~118 años en el lecho aluvial, sin daños o disturbios en el tronco, lo que sugiere que en esta barranca no han ocurrido procesos de incisión vertical ni acumulación de sedimentos significativos en los últimos ~120 años. Por otro lado, la presencia de árboles en las cabeceras de estos barrancos, indica la ausencia de procesos geomorfológicos importantes desde hace al menos ~95 años.

Además, la edad del arbolado fue útil para relacionar y comparar las edades de los distintos lóbulos de caída de rocas, como el caso del talud detrítico del valle La Teta, NW



**Figura 7.** Edades mínimas de relieve y de estabilización geomorfológica con base en la edad del arbolado de *P. hartwegii*. A) Barranca Pelagallina norte del volcán Popocatepetl y B) Talud detrítico del valle La Teta, NW del volcán Cofre de Perote.

Landforms and stabilization geomorphic minimum age based on tree age of *P. hartwegii*. A) Pelagallina gorge, northern slope of Popocatepetl volcano. B) Detritic talus at La Teta valley on NW slope, Cofre de Perote volcano.

del volcán Cofre de Perote (figura 7B), donde las edades de los individuos de *P. hartwegii* muestran por lo menos dos etapas de formación de lóbulos detríticos. El lóbulo más antiguo tiene al menos ~445 años y el más reciente al menos ~105 años. Los árboles más viejos crecen sobre taludes detríticos con fuertes limitaciones edáficas, por lo que encuentran entre los rodales más longevos identificados en el centro de México.

## DISCUSIÓN

En las laderas de montañas volcánicas del centro de México, existen condiciones de inestabilidad geomórfica, donde los árboles y la vegetación que habita en esos ambientes son afectados frecuentemente por lahares y caída de rocas. A partir del análisis dendrogeomorfológico de 1.174 muestras de anillos de crecimiento de *P. hartwegii*, *P. ayacahuite*, *P. leiophylla* y *A. religiosa*, se demuestra que estas especies tienen un buen potencial dendrocronológico para fechar procesos geomorfológicos, a pesar de las bajas inter-correlaciones arrojadas por el programa COFECHA (cuadro 1). Esta situación se debe a que las series de ancho de anillo se obtuvieron de árboles con importantes problemas de crecimiento, debido al efecto de procesos geomorfológicos como anillos excéntricos, supresiones abruptas, realces en crecimiento, tejidos callosos y cicatrices de impacto. En el caso de *P. hartwegii* en taludes detríticos del valle La Teta (Cofre de Perote), es significativo 0,3 ( $P < 0,01$ ), sin embargo, la baja inter-correlación de las series puede deberse a que la especie presenta importantes problemas de crecimiento por otros factores ambientales como incendios, plagas y sequías (Cerano-Paredes 2017). En el caso de las barrancas Huiloac y Pelagallinas-La Venta en el Popocatepetl, así como en el sitio el Rodadero del Iztaccíhuatl las muestras no se midieron, solo se utilizaron para saber el número, tipo de daños y disturbios en los árboles, así como para el conteo de anillos y asignar edades mínimas de relieve y estabilización geomorfológica.

La edad de los árboles está determinada por la especie, pero se pueden relacionar otros factores externos como el clima, el espesor del suelo, la dinámica geomorfológica y el aprovechamiento antrópico. Los rodales más viejos se encontraron en el Pico de Orizaba con la especie *J. monticola* (368 años promedio), seguido del Cofre de Perote donde la edad promedio de los *P. hartwegii* es de 155 años. En cambio, el bosque más joven se encontró al interior de barrancas morfo-dinámicamente activas y cercanas a asentamientos humanos como el caso de la barranca Nexpayantla, Axalzintle y Huiloac, con edades promedio que van de 44 a 58 años (cuadro 1). En estos sitios se observó un mayor porcentaje de impactos por lahares (27 % a 45 %), a diferencia de las barrancas del volcán de Colima donde la edad promedio es mayor (77 años) y solo se tiene el 17 % de cicatrices. También se observó una diferencia significativa entre las especies de los árboles, por ejemplo, el *P. hartwegii* y *P. leiophylla* presentaron menor porcentaje

de impactos que el *A. religiosa*. Una relación similar entre la edad de arbolado y daños en los troncos ocurre en los sitios afectados por caída de rocas, donde existe un mayor porcentaje de impactos (81 %) en el Rodadero, que es un bosque más joven (85 años promedio) que el talud detrítico del valle La Teta (155 años promedio), en donde solo el 38 % de los árboles se observaron impactos (cuadro 2). En los disturbios encontrados en los anillos de crecimiento por lahares y caída de rocas se encontró una relación con la edad, las supresiones abruptas aumentan con la edad, en cambio, el tejido caloso y la madera de reacción disminuye con la edad del arbolado (cuadro 3). Estos resultados coinciden con trabajo de Šilhán *et al.* (2015), donde reportan que a menor edad los árboles presentan mayor número de disturbios en el tronco y reacciones en los anillos de crecimiento, ya que los jóvenes asimilan más eventos, incluso los de menor magnitud. Por otro lado, la especie del árbol también influye en el número de disturbios, ya que especies con xilema más duro y una corteza más gruesa y flexible, son más resistentes a los disturbios geomorfológicos.

La resolución del fechado de eventos puede ser anual e incluso sub-anual, debido a que las especies tienen periodos de crecimiento muy marcados, siendo posible distinguir disturbios como impactos y TRD en las dos principales etapas de crecimiento, madera temprana y madera tardía, así como el periodo de dormancia. Sin embargo, en zonas volcánicas activas y muy dinámicas como las barrancas del sur del volcán de Colima, que en algunos años pueden presentar  $\geq 10$  eventos en un solo año, el método dendrogeomorfológico permitirá reconstruir un mínimo de lahares, es decir, los árboles captarán la señal del o de los eventos de mayor magnitud. Lo anterior se debe a que no todos los depósitos de lahar tienen la misma dimensión para dañar a los árboles, y en muchos casos existen árboles en zonas más protegidas del paso de lahares.

Los TRD que únicamente se identificaron en la especie *A. religiosa* del centro de México, también se han observado en otras especies de abetos impactados como los *Larix decidua* Mill., *Picea abies* (L.) Krast. y *Abies alba* Mill. (Bollschweiler *et al.* 2008), y han sido muy utilizados para fechar y reconstruir flujos de escombros, avalanchas de nieve y caída de rocas, dado que estos ductos de resina se desarrollan radialmente a las cicatrices de impacto. Además, los *A. religiosa* abundan al interior de barrancas donde predomina la humedad, son más jóvenes, tienen corteza más delgada y flexible que los *Pinus* spp., lo que permite identificar daños visibles en los troncos por lahares. Capta mejor la señal geomorfológica en los anillos de crecimiento, como madera de compresión, supresiones abruptas y cicatrices de impacto, incluso asimila los eventos geomorfológicos de menor magnitud. Por lo tanto, es de las coníferas más sensibles del centro de México y con mayor potencial dendrogeomorfológico.

Después del ahuehuete (*T. mucronatum*) la especie más longeva hasta ahora conocida en el centro de México es

el enebro alpino *J. monticola*, que habita en laderas rocosas en general por encima de los 4.000 m s.n.m. Recientemente se ha determinado que esta especie tiene buen potencial dendrocronológico, ya que forma anillos anuales bien definidos y responde principalmente a la temperatura y a la humedad de verano. Sin embargo, en muchos casos los anillos de crecimiento son irregulares y usualmente tiene anillos perdidos, lo que dificulta su fechado y correlación (Villanueva *et al.* 2016). Esta especie alcanza ~900 años en el Cofre de Perote<sup>1</sup>, lo cual en combinación con su sensibilidad la hace útil para reconstrucciones dendroclimáticas, dendropirocronológicas, dendroecológicas y dendrogeomorfológicas (edades mínimas de relieves y reconstrucción de procesos).

El individuo más viejo de *J. monticola* encontrado en el flujo de lava al sur del Pico de Orizaba, tuvo una edad de 834 años, por lo tanto se considera que el flujo de lava tiene al menos ~840 años. No obstante, el trabajo de Alcalá-Reygosa *et al.* (2018) muestra que este flujo de lava es más antiguo: ~3.000 años A.P. según métodos cosmogénicos y ~1.000 años con base en liquenometría de la especie *Rhizocarpon geographicum*. Por lo tanto, es muy probable que los individuos muestreados de *J. monticola*, correspondan a varias generaciones posteriores al emplazamiento del flujo de lava. Parte de las limitaciones del método dendrocronológico, es la dificultad de fechar, de manera absoluta, los relieves mayores a mil años, debido en parte a la escasez de especies longevas y en parte a que en muchos casos no se conoce el periodo de écesis (tiempo que transcurre entre la estabilización geomórfica, la germinación de la especie y el crecimiento a la altura muestreada) (Pierson 2007, Kroh *et al.* 2008, Koch 2009). En las laderas del volcán Popocatepetl, se estima un periodo de écesis de 7 a 10 años para *P. hartwegii*, dependiendo de las características litológicas, edáficas, climáticas y de la cercanía con los árboles semilleros (Franco-Ramos *et al.* 2017a). Para *J. monticola* hasta ahora se desconoce la duración del periodo de écesis.

## CONCLUSIONES

Las hipótesis de la presente investigación fueron validadas. Los daños visibles en la corteza de los árboles y el análisis de los disturbios asociados a una dinámica geomorfológica, permiten fechar con una resolución anual y/o sub-anual lahares y caída de rocas del pasado reciente, con miras a evaluar su frecuencia, magnitud y distribución. Sin embargo, la edad del bosque, la especie y la posición geomorfológica de los árboles influye en el tipo e intensidad de los disturbios. Además, la dendrogeomorfología es un método viable para estimar las edades mínimas en relieves jóvenes de las montañas volcánicas, con base en especies de amplia distribución en la zona como: *P. leiophylla*, *P. ayacahuite*, *A. religiosa*, *P. hartwegii*, y *J. monticola*.

Estos dos últimos con edades superiores a 500 años, cercanas incluso al milenio en el caso de *J. monticola*. A pesar de los logros alcanzados hasta ahora, aún falta por explorar el potencial dendrogeomorfológico de otras especies de árboles que habitan en las laderas medias y bajas de la misma región y que hasta ahora solo han sido estudiadas con fines dendroclimáticos, como *T. mucronatum*, así como algunas especies del género *Alnus* y *Quercus* que también habitan en áreas geomorfológicamente inestables de los bosques del centro de México.

## AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a los revisores anónimos que con sus valiosos comentarios y sugerencias mejoraron sustancialmente este trabajo. Este estudio se llevó a cabo gracias al financiamiento de los proyectos PAPIIT-UNAM con claves: IA101117 y IN1092.

## REFERENCIAS

- Alcalá-Reygosa J, D Palacios, I Schimmelpfennig, L Vázquez-Selem, L García-Sancho, O Franco-Ramos, J Villanueva, JJ Zamorano. 2018. Dating late Holocene lava flows in Pico de Orizaba (Mexico) by means of in situ-produced cosmogenic <sup>36</sup>Cl, lichenometry and dendrochronology. *Quaternary Geochronology* 47: 93-106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2018.05.011>.
- Alcántara-Ayala I. 2004. Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology* 61: 19-40. DOI:10.1016/j.geomorph.2003.11.004.
- Bollschweiler M, M Stoffel, D Schneuwly. 2008. Traumatic resin ducts in *Larix deciduas* stems impacted by debris flows. *Tree Physiology* 28: 255-263. DOI:10.1016/j.cate-na.2007.04.004.
- Bollschweiler M, M Stoffel, L Vázquez-Selem, D Palacios. 2010. Tree-ring reconstruction of past lahar activity at Popocatepetl volcano, México. *The Holocene* 20(2): 265-274. DOI: 10.1177/0959683609350394.
- Capra L, J Lugo-Hubp, N Dávila-Hernández. 2003. Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20(2): 95-106.
- Cerano Paredes J. 2017. Relación clima-incendios en el norte y centro de México: un enfoque dendrocronológico. Tesis de doctorado en Geografía. México DF, México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 399 p.
- Franco-Ramos O, M Stoffel, L Vázquez-Selem, L Capra. 2013. Spatio-temporal 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.jvolgeoes.2013.09.011.
- Franco-Ramos O, M Castillo, E Muñoz-Salinas. 2016a. 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.

<sup>1</sup> Julián Cerano, comunicación personal.

- Franco-Ramos O, M Stoffel, L Vázquez Selem. 2016b. Tree-ring based record of intra-eruptive lahar activity: Axaltzintle valley, Malinche volcano, Mexico. *Geochronometria* 43: 74-83. DOI:10.1515/geochr-2015-0033.
- Franco-Ramos O, L Vázquez-Selem, JJ Zamorano-Orozco, J Villanueva-Díaz. 2017a. Edad, dinámica geomorfológica y tipología de barrancos en el sector norte del volcán Popocatepetl, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 69 (1): 1-19.
- Franco-Ramos O, M Stoffel, L Vázquez-Selem. 2017b. Tree-ring based reconstruction of rockfalls at Cofre de Perote volcano, Mexico. *Geomorphology* 290: 142-152. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.04.003.
- Holmes RL. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Šilhán K, T Pánek, J Hradecký, M Stoffel. 2015. Tree-age control on reconstructed debris-flow frequencies: examples from a regional dendrogeomorphic reconstruction in the Crimean Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms* 40: 243-251. DOI:10.1002/esp.3623.
- Kroh GC, K McNew, JE Pinder. 2008. Conifer colonization of a 350-year old rock fall at Lassen Volcanic National Park in northern California. *Plant Ecology* 199: 281-294. DOI:10.1007/s11258-008-9432-z.
- Koch J. 2009. Improving age estimates for late Holocene glacial landforms using dendrochronology - some examples from Garibaldi Provincial Park, British Columbia. *Quaternary Geochronology* 4: 130-139. DOI:10.1016/j.quageo.2008.11.002.
- Lugo-Hubp J. 1990. El Relieve de la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 9: 82-111.
- Pierson T. 2007. Dating young geomorphic surfaces using age of colonizing Douglas fir in southwestern Washington and northwestern Oregon, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 811-831. DOI:10.1002/esp.1445.
- Rinntech. 2016. LINTAB (Precision - for every single tree ring) & TSAP-Win (Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications). Version 4.64 for Microsoft Windows. Consultado 10 ene. 2016. Disponible en <http://www.rinntech.de>
- Robinson WJ, R Evans. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin* 40: 59-64.
- Salaorni E, M Stoffel, O Tutubalina, S Chernomorets, I Seynova, A Sorg. 2017. Dendrogeomorphic reconstruction of lahar activity and triggers: Shiveluch volcano, Kamchatka Peninsula, Russia. *Bulletin of Volcanology* 79(6):1-19. DOI:10.1007/s00445-016-1094-4.
- Selby MJ. 1982. Hillslope materials and Processes. Oxford, USA. Oxford University Press. 264 p.
- Stoffel M, M Bollschweiler. 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research - an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 187-202. DOI:10.5194/nhess-8-187-2008.
- Stoffel M, M Bollschweiler, L Vázquez-Selem, O Franco-Ramos, D Palacios. 2011. Dendrogeomorphic dating of rockfall on low-latitude, high-elevation slopes: Rodadero, Iztaccihuatl volcano, México. *Earth Surface Processes and Landforms* 36: 1209-1217. DOI:10.1002/esp.2146.
- Stoffel M, C Corona. 2014. Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree-Ring Research* 70(1): 3-20. DOI:10.3959/1536-1098-70.1.3.
- Trappmann D, M Stoffel. 2015. Visual dating of rockfall scars in *Larix decidua* trees. *Geomorphology* 245: 62-72. DOI:10.1016/j.geomorph.2015.04.030.
- Vallance JW. 2000. Lahars. In Sigurdsson H, BF Houghton, SR McNutt, H Rymer, J Stix eds. *Encyclopedia of volcanoes*. London, UK. Academic Press. p. 601-616.
- Villanueva Díaz J, J Cerano Paredes, DW Stahle, V Constante García, L Vázquez Selem, J Estrada Avalos, J Benavides Solorio. 2010. Árboles longevos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(2): 7-29.
- Villanueva-Díaz J, L Vázquez-Selem, A Gómez-Guerrero, J Cerano-Paredes, NA Aguirre-González, O Franco-Ramos. 2016. Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el Monte Tláloc, México. *Revista Fito-tecnia Mexicana* 39(2): 175-185.

Recibido: 16/10/17  
Aceptado: 04/04/18