

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



Estimación del tiempo y avance de erosión en cárcavas mediante técnicas dendrogeomorfológicas

TESIS DE MAESTRÍA

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias Forestales

Presenta

Ing. Daniela Alexandra Canabal Valdés

Linares, Nuevo León, México

Febrero del 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



TESIS

Estimación del tiempo y avance de erosión en cárcavas mediante técnicas dendrogeomorfológicas

TESIS DE MAESTRÍA

Como requisito parcial para obtener el grado de:  
Maestría en Ciencias Forestales

Presenta

Daniela Alexandra Canabal Valdés

Dra. Wibke Himmelsbach  
Director de Tesis

Dr. Marco Aurelio González Tagle  
Asesor de tesis

Dr. Dr. Israel Yerena Yamallel  
Asesor de tesis

Dr. Marcos González Casares  
Asesor externo

Linares, Nuevo León, México

Febrero del 2025

## Índice

I. Agradecimientos.....	6
II. Dedicatoria .....	7
III. Resumen.....	8
IV. Abstract.....	8
1. Introducción.....	10
2. Antecedentes .....	12
3. Hipótesis.....	14
4. Objetivo .....	14
4.1 Objetivos específicos.....	14
5. Materiales y métodos .....	14
5.1 Área de estudio .....	14
5.1.1 Clima.....	15
5.1.2 Suelo.....	15
5.2 Caracterización de cárcava .....	16
5.3 Muestreo de segmentos de raíz para los análisis dendrogeomorfológicos 18	
5.4 Núcleos de incremento .....	19
5.5 Procesamiento de las muestras en el laboratorio.....	21
5.6 Análisis de datos .....	23
6. Resultados .....	25
6.1 Caracterización de cárcavas .....	25
6.2 Segmentos de raíces.....	26
6.3 Incremento troncal.....	30
6.3.1 Análisis .....	31
7. Discusión.....	32
8. Conclusión.....	36
9. Anexos .....	37
10. Bibliografía .....	38

## Índice de Figuras

Figura 1. Este mapa muestra la zona de estudio en el noreste del cerro El Potosí, Nuevo León, y la ubicación de los árboles seleccionados para el muestreo. Los árboles asociados a la cárcava están marcados en rojo. Por otro lado, los árboles de control sin conexión a la cárcava se representan en azul.....	15
Figura 2 Medición del ancho de cárcava en un punto de muestreo en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León. ....	18
Figura 3 Medición del diámetro de copa (d) como límite para caracterizar la longitud de la cárcava en un punto muestreo en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León.....	17
Figura 4. Árbol conectado a una cárcava con raíces expuestas (vista hacia el árbol transversal a la cárcava). ....	19
Figura 5. Raíz expuesta en una cárcava con marcación para la toma de muestras dendrogeomorfológicas cada 15 cm. ....	19
Figura 6 Toma de muestra de una viruta para el análisis del incremento troncal con un taladro de Pressler ( $\varnothing = 5$ mm) a 1.3 m del suelo. ....	21
Figura 7 Virutas secas, montadas en guías y procesadas para su medición.....	22
Figura 8 Medición de los anillos de crecimiento con estetoscopio empleando el sistema Velmex (Bunn, 2010; VoorTech Consulting, 2021). ....	23
Figura 9 Cronología de disturbios en raíces analizadas a una altitud entre 3,130 y 3,240 msnm en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León. ....	28
Figura 10 Disturbios registrados por medio de dendrogeomorfología. ....	28
Figura 11 Disturbios registrados por medio de dendrogeomorfología.....	29
Figura 12. Índice de ancho de anillos (Modified Negative Exponential) obtenido de árboles de <i>Pinus hartwegii</i> y <i>Pinus strobiformis</i> a una altitud entre 3,130 y 3,240 msnm en el noroeste del cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León.....	31

## Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de cárcavas basado en su profundidad (CONAFOR, 2018). .....	14
Tabla 2 Datos dasométricos de los árboles afectados por cárcava en el cerro "El Potosí" .....	20
Tabla 3. Generalidades de las cárcavas. ....	26
Tabla 4 Distribución radicular en Pinus: Número de raíces y segmentos por especie. ....	26
Tabla 5 Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk de núcleos de incremento. ....	31

## I. Agradecimientos

A Dios, por brindarme la oportunidad de alcanzar esta etapa de mi vida acompañada de las personas más importantes para mí, así como por darme la sabiduría necesaria en la toma de decisiones a lo largo de mi vida y mi carrera.

A CONACTY, por la confianza y el apoyo otorgado a través de su programa de becas, permitiéndome continuar con mis estudios de posgrado y avanzar en mi formación profesional.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL, por abrirme sus puertas y brindarme la confianza para desarrollar mi investigación, permitiéndome aplicar mis conocimientos y prepararme para desempeñarme en el ámbito profesional con ética y compromiso.

A mi directora de tesis, la Dra. Wibke Himmelsbach, ya mis asesores, el Dr. Marco Tagle, el Dr. Yamaliel Yerena y el Dr. Marcos González, por su paciencia, guía y apoyo incondicional. Gracias por motivarme a alcanzar mis metas, por brindarme las bases para el desarrollo de mi investigación y por compartir sus conocimientos conmigo. Su enseñanza ha sido invaluable y siempre las llevaré presente.

A mi madre, Yolanda Valdés, por su esfuerzo incansable para asegurar que nunca me faltara nada en este camino. Gracias por creer en mí y en mis capacidades para superar con éxito este reto académico.

A mi abuelita, Virginia, por su amor incondicional y su valiosa orientación en cada una de mis decisiones. Gracias por confiar en mí y en todo lo que puedo lograr; tu apoyo siempre permanecerá en mi corazón.

A mi pareja, Jorge Garza, por su cuidado, amor y comprensión inquebrantables. Gracias por estar siempre presente, por acompañarme en mis momentos más difíciles, por velar por mi bienestar y por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de este proceso.

## II. Dedicatoria

A mi padre Miguel porque gracias a nuestra promesa retomé mis estudios en un momento estancado de mi vida, a mi abuelito Gilberto quien con su apoyo incondicional siempre creyó en mí. Ellos fueron los hombres de mi vida y la base de mi formación, cada uno aportó valiosas enseñanzas en ella.

A mis hermanas, Michell con quien con he pasado la mayor parte de mi vida, porque sé que siempre puedo contar contigo, mi fuerza se basa en su bienestar, a Fernanda por estar siempre presente a pesar de todo y apoyarme incondicionalmente en cada paso que he dado.

A mi madre, **Yolanda**, quien forjó los cimientos de mi desarrollo tanto académico como profesional. Por su apoyo incondicional, su dedicación y el tiempo que destino para educarme, brindándome enseñanzas que siempre llevaré conmigo. Gracias por enseñarme, con tu ejemplo, a ser una mujer fuerte e independiente, y por impulsarme cada día a seguir creciendo.

Gracias por estar en la evolución de mi carrera y en el desarrollo de mi tesis, ¡¡los amo!!

“Quizás pude cometer un error ayer, pero mi yo de ayer sigo siendo yo, hoy soy quien soy, con todos mis defectos y errores, mañana podría ser un poco más sabia y también seguiré siendo yo, estos defectos y errores, son lo que soy, componiendo las estrellas más brillantes en la constelación de mi vida. He llegado a amarme a mí misma por quien soy, por quien fui y por quien espero convertirme.”

### III. Resumen

La investigación aborda la formación de cárcavas en el Cerro El Potosí, Nuevo León, México, como resultado de factores ambientales. Se empleó la dendrogeomorfología como método indirecto para analizar la dinámica de formación de cárcavas y determinar la tasa de eluviación del suelo. Las técnicas dendrocronológicas y dendrogeomorfológicas se aplicaron para evaluar la dinámica temporal y espacial de la erosión. Como resultado, se estimó una pérdida total de suelo de 165,3 m<sup>3</sup> a lo largo de una línea de muestreo de 28,41 metros del canal de erosión. Los resultados muestran que la eluviación del suelo comenzó en 1982, hace aproximadamente 41 años. Además, se observaron patrones de crecimiento en las raíces que pueden atribuirse al inicio de la exposición de las raíces debido a la erosión y que fueron confirmados mediante técnicas de datación cruzada. Este estudio proporciona un conocimiento detallado de la erosión del suelo en la zona estudiada, resaltando la importancia de las técnicas dendrogeomorfológicas para evaluar y monitorear la dinámica de la erosión a lo largo del tiempo, lo que resulta esencial para el desarrollo de estrategias eficaces de conservación y restauración.

**Palabras claves:** dendrogeomorfología, anillos de crecimiento, exposición radicular, erosión del suelo.

### IV. Abstract

The research addresses gully formation in Cerro El Potosí, Nuevo León, Mexico, because of environmental factors. Dendrogeomorphology was used as an indirect method to analyze the dynamics of gully formation and to determine the rate of soil eluviation. Dendrochronological and dendrogeomorphological techniques were applied to evaluate the temporal and spatial dynamics of erosion. As a result, a total soil loss of 165.3 m<sup>3</sup> was estimated along a 28.41 m sampling line of the erosion channel. The results show that soil eluviation began in 1982, approximately 41 years ago. In addition, root growth patterns were observed that can be attributed to the onset of root exposure due to erosion and were confirmed by cross-dating techniques. This study provides detailed knowledge of soil erosion in the studied

area, highlighting the importance of dendrogeomorphological techniques to assess and monitor erosion dynamics over time, which is essential for the development of effective conservation and restoration strategies.

**Key words:** dendrogeomorphology, growth rings, root exposure, soil erosion.

## 1. Introducción

El suelo es la capa superficial de la tierra donde se desarrollan las raíces de la vegetación y la materia de los organismos terrestres (Soil Science Society of America, 2008). Puede estar formado de diferentes minerales, materia orgánica, agua, aire, roca continua o suelos urbanos y es fundamental para la producción de alimentos, purificación del agua y la mitigación del cambio climático (IUSS Working Group WRB, 2015).

La IUSS clasifica 32 unidades de suelo con cuatro horizontes: D (roca madre), C (roca erosionada sin materia orgánica), B (receptora de arcillas) y A (superficie con interacción con la flora y fauna). La zona A es el principal proveedor de recursos del ecosistema.

De acuerdo con la SEMARNAT (2003), el 42% de la superficie nacional de México está afectada en algún grado de erosión hídrica. La investigación de la erosión del suelo constituye una herramienta fundamental para la gestión ambiental (SEMARNAT, 2016). Esto se debe a que la degradación del suelo es un problema cada vez más urgente de abordar. Además, es importante considerar que el suelo es un recurso finito y no renovable, cuya regeneración excede la escala temporal de la vida humana (Anglés et al. 2019).

Los procesos de erosión tienen lugar en el centro de la geomorfología del relieve. Obtener información objetiva y fiable sobre la dinámica de los cambios en la ecología del paisaje ha sido desafiante (Lawler 2005).

De acuerdo con Villanueva-Díaz et al. (2004), la dendrocronología es una rama de la dendrología que estudia la edad de los árboles e interpreta fenómenos ambientales pasados que ocurrieron alrededor del árbol. Esto se basa en la correlación del crecimiento de los anillos con el clima y las condiciones del sitio (Villanueva-Díaz et al. 2004). En particular, la dendrogeomorfología es una rama que estudia la relación del crecimiento de los árboles conforme a los procesos geomorfológicos alrededor del árbol. Este estudio se basa en el análisis de las

perturbaciones que causan dichos procesos que quedan evidenciados como registros con precisión anual o incluso estacional (Villanueva-Díaz et al. 2004).

El análisis dendrogeomorfológico se justifica en el contexto de la necesidad urgente de comprender y mitigar los impactos de la erosión del suelo, especialmente en áreas montañosas y sensibles como el Cerro El Potosí en Nuevo León (Mendoza, 2014). La importancia radica en su capacidad para proporcionar una visión única y detallada de la dinámica de los procesos erosivos a lo largo del tiempo. Dado que la región se enfrenta a desafíos ambientales como los incendios forestales y el aumento del ecoturismo, es importante comprender la relación entre los anillos de crecimiento de los árboles y determinados factores de perturbación (Vandekerckhove et al., 2001). Por lo tanto, el conocimiento detallado de los fenómenos geomorfológicos es crucial para el desarrollo de estrategias de conservación eficaces.

La dendrogeomorfología permite realizar un seguimiento preciso del impacto de los fenómenos naturales y las actividades humanas en el contexto de la formación de cárcavas y la degradación del suelo, lo que proporciona información valiosa para la toma de decisiones en la gestión ambiental. Además, como método de medición de medición indirecta, ofrece una perspectiva innovadora y profunda que complementa los métodos tradicionales de evaluación de la erosión del suelo (Sánchez-Asunción, et al., 2020).

La aplicación del análisis dendrogeomorfológico en esta región concreta puede ayudar a identificar patrones, tendencias y factores desencadenantes de la erosión, permitiendo una mejor comprensión de los procesos que afectan al paisaje. En este contexto, uno de los fenómenos más evidentes de degradación del terreno son las cárcavas, las cuales representan una forma extrema de erosión que modifica el relieve y reduce significativamente la productividad del suelo. Cuando las prácticas de conservación a nivel de ladera no son suficientes para controlar el escurrimiento, es necesario implementar trabajos específicos en las cárcavas. Estas acciones buscan disminuir la velocidad del agua, favorecer la sedimentación de partículas en

suspensión y, en última instancia, estabilizar la cárcava. De esta manera, los resultados del análisis dendrogeomorfológico pueden contribuir al desarrollo de estrategias más eficaces de conservación y restauración del paisaje, garantizando la protección de la integridad ecológica de la zona (Yocom et al., 2010; Cotler, 2020).

Por lo tanto, este estudio analizó el flujo de eluviación en una cárcava del Cerro El Potosí con la aplicación de métodos dendrocronológicos. Además, se analizó el efecto de la eluviación en el incremento basal de los árboles asociados a la cárcava.

## 2. Antecedentes

De acuerdo con Gisbert e Ibáñez (2002), en el estudio de suelos se emplean los términos *eluviación* e *iluviación* como sinónimos para *emigración* e *inmigración*, respectivamente. La eluviación indica el movimiento de las partículas fuera de un horizonte del suelo, en cambio, la iluviación es la entrada de estas. Este evento sucede con zonas climáticas de pluviometría intensa, como el Cerro El Potosí.

De acuerdo con Lawler (2005), la caracterización de los cambios anatómicos en los anillos de crecimiento comienza con la exposición del sistema radicular. El análisis de los anillos de crecimiento en las raíces permite predecir la tasa de erosión al comparar los datos relacionados con el alcance de la eluviación y la exposición de las raíces. De manera similar, Gärtner et al. (2001) señalan que los cambios anatómicos en los anillos de crecimiento están vinculados a diversos factores. Entre ellos, destacan los efectos de la exposición de la raíz, las fluctuaciones de temperatura, la reducción en la presión edáfica y la incidencia de la luz.

Ballesteros et al. (2013) mencionan que el uso de técnicas de dendrogeomorfología para estimar tasas de erosión ofrece importantes ventajas. Entre ellas, permite cuantificar no solo tasas anuales promedio, sino también tasas asociadas a eventos específicos.

De acuerdo con Strunk (1997), los procesos geomorfológicos de iluviación y eluviación influyen en el crecimiento de los árboles afectados. Estas alteraciones se manifiestan en las variaciones de los anillos de crecimiento. El análisis detallado de

los anillos permite reconstruir la fecha de inicio de estos procesos, así como evaluar su duración, intensidad y frecuencia (Strunk, 1997).

Hitz et al. (2007) identificó patrones de cambios en la anatomía de la madera en las raíces, atribuibles a diversos efectos derivados de la exposición. Entre estos efectos destacan las variaciones de temperatura, la reducción de la presión ejercida por la cobertura del suelo y la incidencia de la luz. Estos cambios también reflejan el estrés mecánico que experimentan las raíces al perder progresivamente su cubierta edáfica. Por otro lado, García-Oteyza et al. (2015) dataron evidencias en la formación de tejidos callosos caóticos. Dichas estructuras son claramente visibles en las secciones y núcleos extraídos en los géneros *Populus*, *Fraxinus*, *Prunus*, *Acer* y *Juglans*.

Así mismo, Díez-Herrero (2013) identificó patrones de distribución en las edades de los árboles afectados, los cuales representan evidencia dendrogeomorfológica de carácter macroscópico. En su estudio, encontró secuencias de crecimiento completas de catorce ejemplares de *Populus* y ocho de *Fraxinus*. Las edades máximas y las edades medias en ambos taxones resultaron ser similares. Además, los datos recabados coincidieron con la información previamente documentada.

De acuerdo con los tipos de crecimiento de una cárcava, es necesario conocer su longitud, amplitud y profundidad.

Profundidad: El incremento de la profundidad ocasiona el escurrimiento superficial en el piso de la cárcava y depende de la velocidad del escurrimiento y de las características del suelo o material que construye el fondo de la cárcava. Es primordial conocer el tipo de forma que posee la cárcava ya que hay de tipo "U", "V" y trapezoidal (T), esto se debe a la resistencia del suelo a la erosión, tanto el suelo superficial como el subsuelo. Conociendo la profundidad se pueden clasificar en tres tipos de acuerdo con la Tabla 1 extraída del Manual de Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales Obras y Practicas de CONAFOR, además, la longitud es importante ya que esto conforma uno o varios sistemas de drenaje, por

lo que se divide en cárcavas continuas las cuales se conforman por varios sistemas y no continuas las cuales se presentan aisladas (CONAFOR 2018).

*Tabla 1. Clasificación de cárcavas basado en su profundidad (CONAFOR, 2018).*

<b>Clase</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Área de drenaje (ha)</b>
Pequeña	<1	<2
Mediana	1 a 5	2 a 20
Grande	>5	>20

### 3. Hipótesis

El incremento basal de los árboles se ve afectado por la eluviación del suelo.

### 4. Objetivo

- Determinar el inicio del proceso de eluviación de suelo en cárcavas en una sección del cerro El Potosí por medio de técnicas dendrogeomorfológicas.
- Determinar el efecto de la exposición de una parte de las raíces en el incremento basal de los árboles afectados.

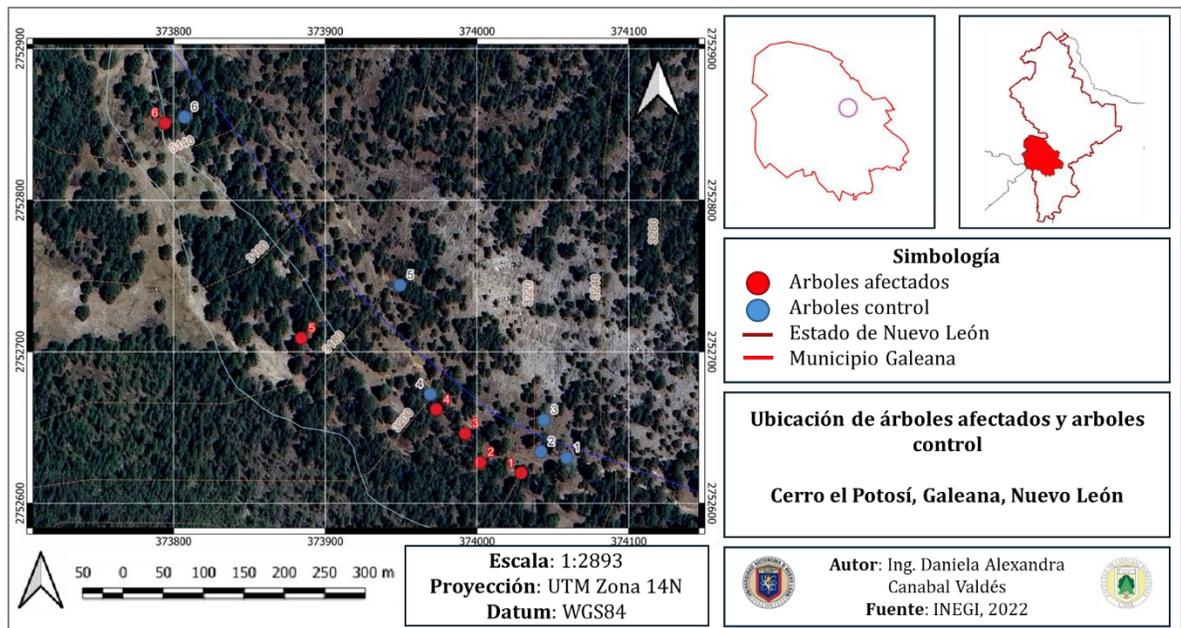
#### 4.1 Objetivos específicos

- Determinar la franja de estudio en el cerro El Potosí.
- Medir la profundidad de cárcavas para la determinación del volumen de eluviación.
- Determinar el año del disturbio por medio de técnicas dendrogeomorfológicas.
- Evaluar el incremento basal a través de análisis dendrocronológicos de árboles afectados por cárcavas y árboles sin afectación por cárcavas.

### 5. Materiales y métodos

#### 5.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el cerro El Potosí en el municipio de Galeana, Nuevo León. En la parte noroeste del cerro, se eligió el área de estudio en una pendiente de 10% a 15% (Figura 1).



*Figura 1. Zona de estudio en el noreste del cerro El Potosí, Nuevo León, y la ubicación de los árboles seleccionados para el muestreo. Los árboles asociados a la cárcava están marcados en rojo. Por otro lado, los árboles de control sin conexión a la cárcava se representan en azul.*

### 5.1.1 Clima

En el área de estudio se cuenta con clima semiseco templado, donde se registran lluvias escasas durante todo el año (INEGI, 2022). La precipitación total anual oscila entre los 400 y 600 mm. La máxima precipitación mensual se presenta en mayo y agosto con volúmenes de 35 mm a 40 mm y la mínima en marzo con menos de 10 mm. El rango de temperatura media anual tiene una fluctuación entre los 12° y 18° C. Los meses más cálidos son julio y agosto con una temperatura media de 19° a 20°. El mes más frío es enero con una temperatura promedio de 9° a 10°C (INEGI, 2022).

### 5.1.2 Suelo

De acuerdo con la cartografía de suelos del INEGI (2022), publicada en el anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos, el tipo de suelo predominante en esta región corresponde a los Leptosoles. Su clave edafológica es LPskrz+LPskli+CLsklep/2R.

## 5.2 Caracterización de cárcava

En la metodología para la caracterización de cárcavas, inicialmente se analizan parámetros como longitud, amplitud y profundidad para comprender el escurrimiento del fondo (Gerencia de Restauración Forestal, 2018). Posteriormente, se procede a medir el área de secciones transversales en diferentes tramos y determinar la distancia entre ellas (Figura 2).

Estos datos se utilizan para calcular el volumen de suelo perdido. Finalmente, se estima el peso perdido utilizando la densidad del suelo, proporcionando una evaluación cuantitativa del impacto de la erosión.

Para evaluar con precisión el volumen de suelo perdido en las cárcavas, se emplea la siguiente fórmula, ilustrada en la Figura 2:

$$A = d \left( \frac{he}{2} + \sum_{i=1}^n h_i + \frac{he'}{2} \right)$$

Donde:

A: área de sección.

d: ancho definido para la toma de las profundidades de la cárcava.

h: profundidad de la cárcava.

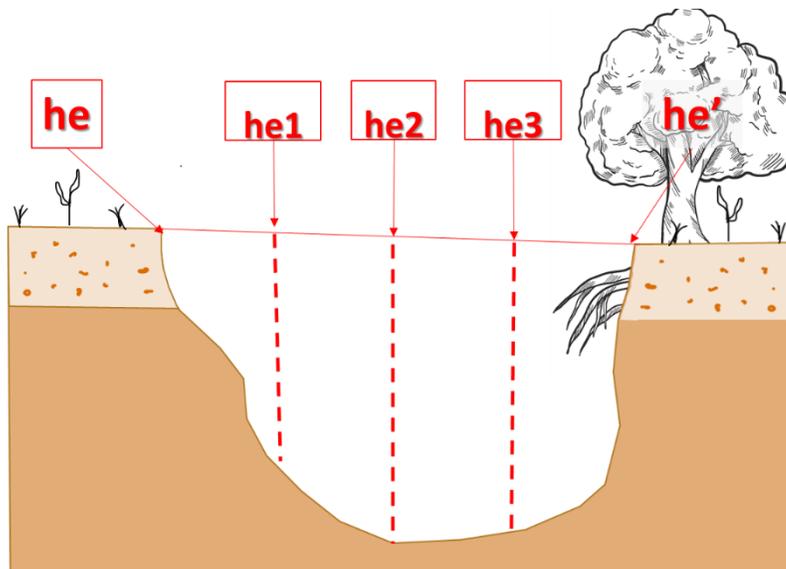
$\sum_{i=1}^n h_i$ : Suma de las “n” secciones.

Para elegir los sitios de muestreo para la caracterización de la cárcava se tomaron en cuenta individuos de coníferas, que tenían una conexión con la cárcava (Figura 1). Es decir, donde se expusieron unas raíces de los árboles de coníferas dentro de la cárcava. La ubicación de estos árboles se determinó para el muestreo de la cárcava. El ancho de la copa de estos árboles muestra determinó el punto de inicio y término, la longitud, del segmento de la cárcava que se mostró para su caracterización (Figura 2).



*Figura 2 Medición del diámetro de copa (d) como límite para caracterizar la longitud de la cárcava, inicio (i) y punto terminal (t), en un sitio de muestreo en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León.*

Luego, en cada extremo de la copa, inicio (i) y punto terminal (t), se muestreó el ancho de la cárcava como ilustra la Figura 3. En cada extremo (i y t), se midió el ancho total de la cárcava o canal. Luego, este ancho se dividió en secciones uniformes, aumentando la cantidad de secciones en casos de fondo irregular. La profundidad se midió en cada una de estas tres secciones (Figura 3).



*Figura 3 Medición del ancho total y de secciones de una cárcava en un punto de muestreo en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León.*

Finalmente, se calculó un promedio de las secciones y se multiplicó por la longitud de los tramos evaluados, obteniendo así una estimación precisa del volumen de suelo perdido.

### 5.3 Muestreo de segmentos de raíz para los análisis dendrogeomorfológicos

Los mismos árboles o individuos de coníferas que se determinaron para el muestreo de la cárcava, se seleccionaron para el muestreo de las raíces y los análisis dendrogeomorfológicos. Se tomó como criterio que los árboles tuvieran la raíz expuesta y que fueran individuos de características morfológicas similares. Para la colecta de las muestras se empleó una motosierra eléctrica de la marca BGSFF de 4" con sierra eléctrica de cadena, modelo FYD-003 y un serrucho de poda de 12" mango de madera con hoja curva marca "Truper" para obtener muestras de raíces en cárcavas cada 15 cm, preferiblemente perpendiculares a los anillos de crecimiento (Figura 4 y 5) (Strunk, 1997; Ballesteros-Cánovas et al., 2013; Fuster & Díez Herrero, 2022).

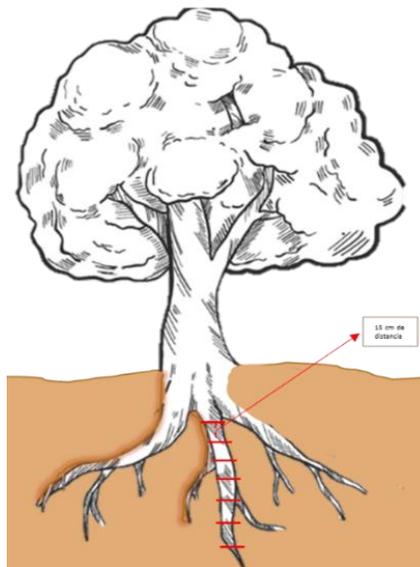


Figura 3. Árbol conectado a una cárcava con raíces expuestas (vista hacia el árbol transversal a la cárcava).



Figura 4. Raíz expuesta en una cárcava con marcación para la toma de muestras dendrogeomorfológicas cada 15 cm.

#### 5.4 Núcleos de incremento

Se realizó una caracterización de los árboles afectados por cárcavas en el cerro El Potosí, incluyendo datos de especie, DAP, área basal, altura y diámetro de copa

(Tabla 2). Se identifican dos especies: Pino blanco (*Pinus strobiformis*) y Ocote blanco (*Pinus hartwegii*), con DAP entre 0.21 m y 0.34 m, alturas de 8.4 m a 13.1 m, y diámetros de copa de 4.2 m a 7.3 m (Tabla 2).

*Tabla 2 Datos dasométricos de los árboles de muestreo afectados por una cárcava en el cerro "El Potosí"*

No.	Nombre común	Nombre científico	DAP (m)	Altura (m)	Diámetro de copa (m)
1	Pino blanco	<i>P. strobiformis</i>	0.32	9.4	7.29
2	Ocote blanco o Pino de las alturas	<i>P. hartwegii</i>	0.34	13.1	6.2
3	Pino blanco	<i>P. strobiformis</i>	0.32	10.4	7.305
4	Ocote blanco o Pino de las alturas	<i>P. hartwegii</i>	0.21	10.6	4.295
5	Pino blanco	<i>P. strobiformis</i>	0.32	12.3	6.39
6	Pino blanco	<i>P. strobiformis</i>	n/d	n/d	n/d

Corregir los nombres científicos, especie es con minúscula.

De cada árbol de muestreo (6 individuos en total) afectados por la cárcava, se extrajeron dos virutas (Figura 6) usando dos modelos de taladro Pressler ( $\varnothing = 5$  mm) de la marca Haglöf (450 mm/18", 5.15/0.200" de diámetro interno con 3 filos y 450 mm/18", 4.3/0.169" de diámetro interno con 3 filos) para posteriormente determinar la edad y el incremento basal (Fritts, 2001). Las muestras se tomaron a la altura del DAP (1.3 m) y se tomaron muestras en exposiciones contrarias a la pendiente (este y oeste). Las muestras fueron etiquetadas y transportadas en charolas de alta resistencia con divisiones para procesarlas posteriormente.

Además, se determinó la misma cantidad de árboles de control, 6 individuos que no presentaron ninguna conexión con la cárcava y que se encontraron al lado de la cárcava bajo de las mismas condiciones ambiental (Figura 1 y 6).



*Figura 5 Toma de muestra de una viruta para el análisis del incremento troncal con un taladro de Pressler ( $\varnothing = 5 \text{ mm}$ ) a 1.3 m del suelo.*

### 5.5 Procesamiento de las virutas y muestras de raíces en el laboratorio

Todas las muestras maderables, los segmentos de las raíces, así como los núcleos de crecimiento, se procesaron en el laboratorio de Dendrocronología y Tecnología de la madera de la Facultad de Ciencias Forestales (Figuras 7 y 8). El procesado de las virutas se llevó a cabo siguiendo los procedimientos adecuados para su análisis.

Las muestras de raíz recolectadas en campo fueron segmentadas cada 15 cm a la longitud de las muestras y aproximadamente con 1 cm de espesor. Posteriormente, se sometieron a un proceso de secado al aire libre y, una vez deshidratadas, fueron lijadas con papel de lija de grano progresivo, desde 80 hasta 1,200, con el objetivo de mejorar la visualización de los anillos de crecimiento. Este procedimiento se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por González-Tagle et al. (2020) y Phipps (1985) para la preparación y análisis de núcleos de crecimiento.

Las virutas o muestras de los fustes de los árboles de muestreo fueron sometidas a un proceso de secado al aire en guías de madera. Luego se pegaron a las guías

y se lijaron utilizando lijas de grano que varían desde 80 hasta 1,200 con el propósito de mejorar la visualización de los anillos de crecimiento. Este procedimiento se basa en las recomendaciones de González Tagle et al. (2020) y Phipps (1985).

Posteriormente, cada muestra se analizó y pre-fechó mediante la comparación de patrones de crecimiento. Se determinó el año de formación usando el método de datado cruzado o crossdating (Bunn, 2010).

El ancho de cada anillo se midió utilizando el sistema de medición VELMEX con una precisión de 0.001 mm. Se empleó el software Measure J2X de VoorTech Consulting para el análisis (VoorTech Consulting, 2021).



*Figura 6 Virutas secas, montadas en guías y procesadas para su medición.*



*Figura 7 Medición de los anillos de crecimiento con estetoscopio empleando el sistema Velmex (Bunn, 2010; VoorTech Consulting, 2021).*

Una vez obtenidos los datos se desarrolló una cronología maestra con base en los crecimientos anuales de las coníferas en las zonas afectadas por las cárcavas, lo cual será utilizado también como referencia en el fechado en el comienzo de la lignificación de la raíz y su generación de anillos. Se realizó una variación estadística de la datación visual con el software COFECHA (Grissino-Mayer, 2001).

Para obtener los índices de ancho de anillo de cada especie, se eliminaron las tendencias a largo plazo potencialmente relacionadas con la geometría y edad del árbol, mediante el ajuste de curvas exponenciales negativas para cada serie de ancho de anillo (Bunn, 2010).

### 5.6 Análisis de datos

Una vez que se obtuvieron los resultados de los anchos de anillos de crecimientos tanto de los árboles como de las raíces se realizó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, con la finalidad de evaluar si los datos de las variables en este estudio seguían una distribución normal. La prueba fue desarrollada por Samuel Shapiro y Martin Wilk en 1965 y su hipótesis nula ( $H_0$ ) establece que los datos provienen de una distribución normal (Shapiro & Wilk, 1965).

El estadístico “W” de la prueba Shapiro-Wilk compara la ordenación de los datos observados con los valores esperados de una distribución normal. El valor “W” varía entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican que los datos se ajustan a una distribución normal. Si el valor  $p$  asociado al estadístico “W” es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha=0.05$ ), no se rechaza la hipótesis nula, sugiriendo que los datos siguen una distribución normal. Por otro lado, si el valor  $p$  es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que los datos no se distribuyen normalmente. La fórmula se define como:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{(\sum_{i=1}^n x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

- $x_{(i)}$ : Datos ordenados de menor a mayor.
- $a_i$ : son los coeficientes calculados a partir de los valores esperados bajo una distribución normal.
- $\bar{x}$ : es el promedio de los datos.

La prueba de Shapiro-Wilk se realizó para cada conjunto de datos antes de aplicar cualquier prueba paramétrica posterior. Los resultados, presentados con el estadístico “W” y el valor  $p$  correspondiente, se usaron para decidir si era apropiado continuar con análisis paramétricos o no paramétricos.

Dado que los resultados nos arrojan que son datos no normales, el análisis estadístico que más se ajusta a nuestra investigación es la Prueba U de Mann-Whitney. Para comparar las diferencias entre dos grupos independientes en términos de la variable de estudio, se utilizó la prueba U de Mann-Whitney. Esta prueba no paramétrica es adecuada para datos que no cumplen con el supuesto de normalidad. La prueba U de Mann-Whitney fue desarrollada por Henry Mann y Donald Whitney en 1947, y permite evaluar si una muestra tiende a tener valores mayores que la otra, sin hacer suposiciones sobre la distribución de los datos (Mann & Whitney, 1947).

La estadística U se calcula a partir de los rangos asignados a los valores de ambas muestras combinadas. Posteriormente, se evalúa la diferencia entre las dos muestras en términos de sus rangos, en lugar de sus valores directos. La hipótesis nula ( $H_0$ ) de la prueba establece que no existen diferencias significativas entre las distribuciones de los dos grupos. En cambio, la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) sostiene que una de las muestras tiene valores consistentemente mayores o menores que la otra. Esta prueba se define con la siguiente fórmula:

$$U_A = n_A * n_B + \frac{n_A(n_A + 1)}{2} - R_A$$

$$U_B = n_A * n_B + \frac{n_B(n_B + 1)}{2} - R_B$$

Donde:

- $n_A$  y  $n_B$  representan los tamaños de las muestras A y B.
- $R_A$  y  $R_B$  son las sumas de los rangos de las muestras.
- El valor final de U es el mínimo entre  $U_A$  y  $U_B$ .

Los resultados de la prueba U de Mann-Whitney fueron interpretados en función del valor  $p$ , comparándolo con el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ) establecido para el análisis. Si el valor  $p$  es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula, sugiriendo que existen diferencias significativas entre los dos grupos.

## 6. Resultados

### 6.1 Caracterización de cárcavas

En total, se analizó un área expuesta de 28.41 metros lineales, los cuales representan el 8% del total del tramo de la cárcava considerado para el muestreo. El volumen total de suelo perdido en el área muestreada es de 165.3 m<sup>3</sup>. La cárcava ha estado presente durante un período de 46 años, lo que ha contribuido significativamente a la pérdida de suelo en la zona (Tabla 3).

Tabla 3. Características generales de la cárcava muestreada.

Características	Cantidad
Longitud total	351 m
Longitud muestreada	28.41 m (8% del total de la cárcava)
Volumen de eluviación	165.3 m <sup>3</sup>
Edad de la cárcava	46 años

## 6.2 Segmentos de raíces

En el campo se obtuvieron 51 segmentos o rodajas de raíces correspondientes a seis individuos afectados por la cárcava en el área de estudio. La suma de todos los anillos medidos resultó en un total de 1,018 anillos de crecimiento. El patrón de crecimiento mostró una correlación de 0.018 entre los segmentos medidos, la cual es inferior a la correlación mínima exigida por el programa COFECHA (0.328).

Tabla 4 Distribución radicular en *Pinus*: Número de raíces y segmentos por especie.

No.	Nombre científico	Raíz	No. de segmentos
1	<i>P. strobiformis</i>	1	3
		2	2
		3	6
2	<i>P. hartwegii</i>	1	2
		2	5
		3	14
3	<i>P. strobiformis</i>	1	2
		2	3
4	<i>P. hartwegii</i>	1	2
		2	3
5	<i>P. strobiformis</i>	1	2

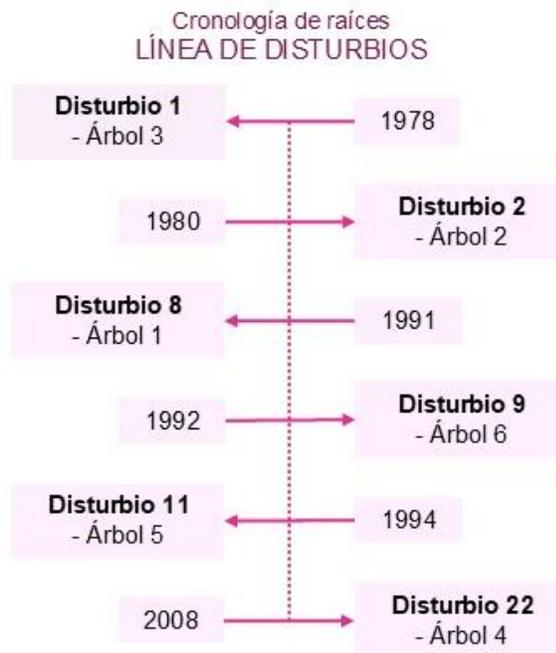
		2	3
6	<i>P. strobiformis</i>	1	4

---

El disturbio pluvial más antiguo registrado en el área de estudio data del año 1978, con una antigüedad de 46 años. En la Figura 9 se presenta una cronología general de los disturbios pluviales que han afectado a los individuos muestreados dentro de la cárcava, evidenciando el momento en que sus raíces quedaron expuestas y comenzaron el proceso de lignificación, es decir, la formación de anillos de crecimiento.

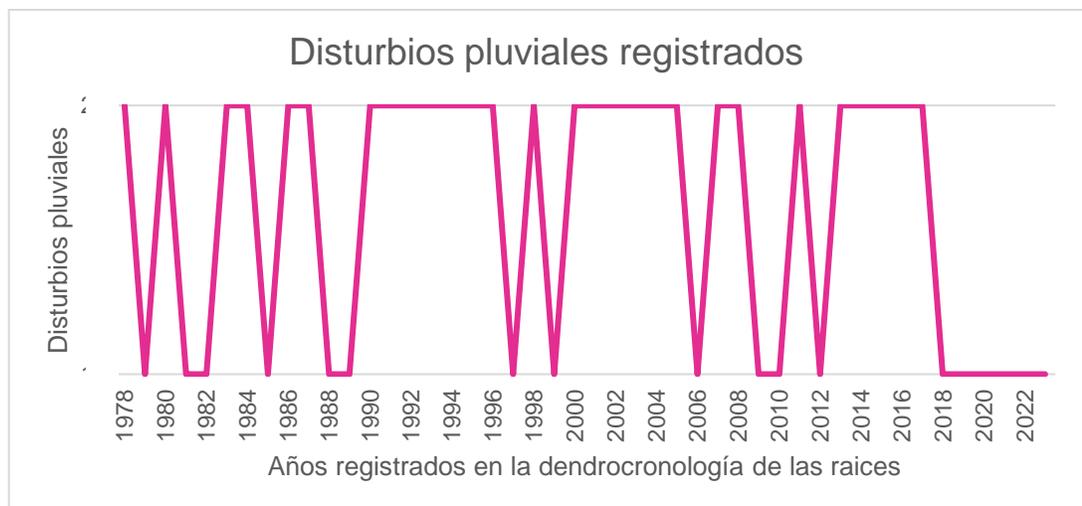
El análisis dendrogeomorfológico revela que el árbol 3 fue el primero en ser afectado en 1978. Posteriormente, en 1980, el árbol 2 sufrió alteraciones en su sistema radicular, iniciando la generación de anillos de crecimiento en sus raíces expuestas. En 1991, durante el disturbio pluvial 8, el árbol 1 presentó el mismo proceso, seguido por el árbol 6 en 1992 con el disturbio pluvial 9. En 1994, el disturbio pluvial 11 afectó al árbol 4, mientras durante el disturbio 22, registrado en 2008, consolidó la formación de la cárcava muestreada y afectó al árbol 4 iniciando su proceso de generación de anillos en las raíces afectadas.

Adicionalmente, en el Anexo 1 se presenta un desglose detallado de la cronología de disturbios pluviales y la generación de anillos en las raíces de los árboles afectados por la cárcava



*Figura 8 Cronología de eventos pluviales en raíces analizadas a una altitud entre 3,130 y 3,240 msnm en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León.*

En la Figura 10 se presenta una cronología de los eventos pluviales registrados a lo largo del tiempo, obtenida mediante el análisis dendrogeomorfológico de las raíces muestreadas.



*Figura 9 Disturbios pluviales registrados por medio de dendrogeomorfología.*

La Figura 11 muestra la variación anual de los disturbios pluviales a lo largo de los últimos 46 años, proporcionando una perspectiva temporal de los eventos que han afectado el crecimiento de las raíces en el área de estudio. En la Figura 11 se muestra la relación entre la fluctuación de los disturbios pluviales y el número de individuos afectados por los eventos registrados.

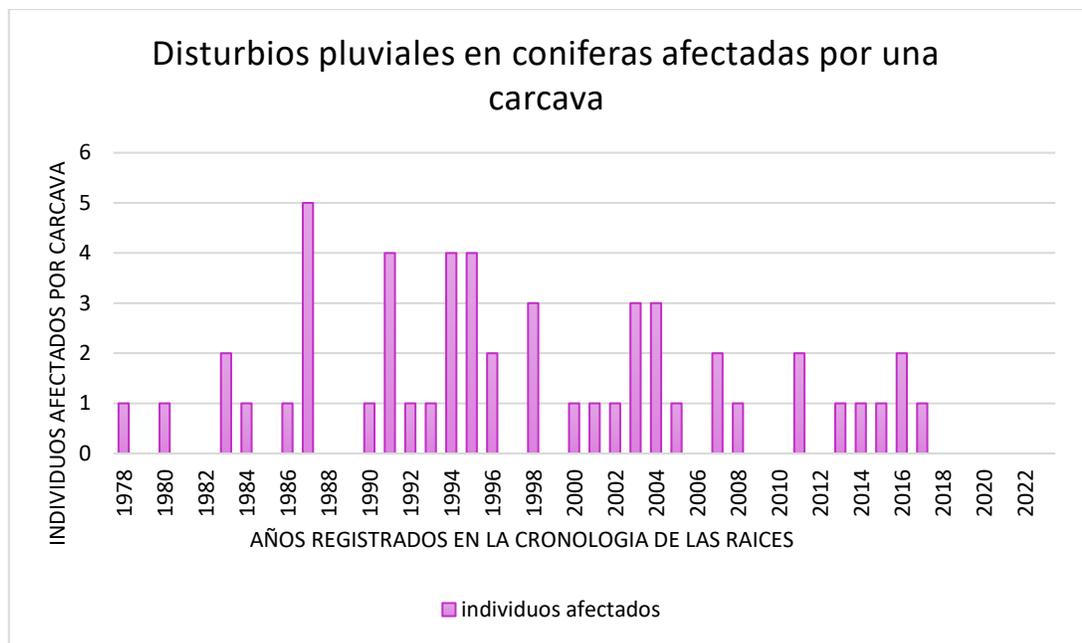


Figura 10. Disturbios pluviales registrados por medio de la dendrogeomorfología en una cárcava del cerro El Potosí.

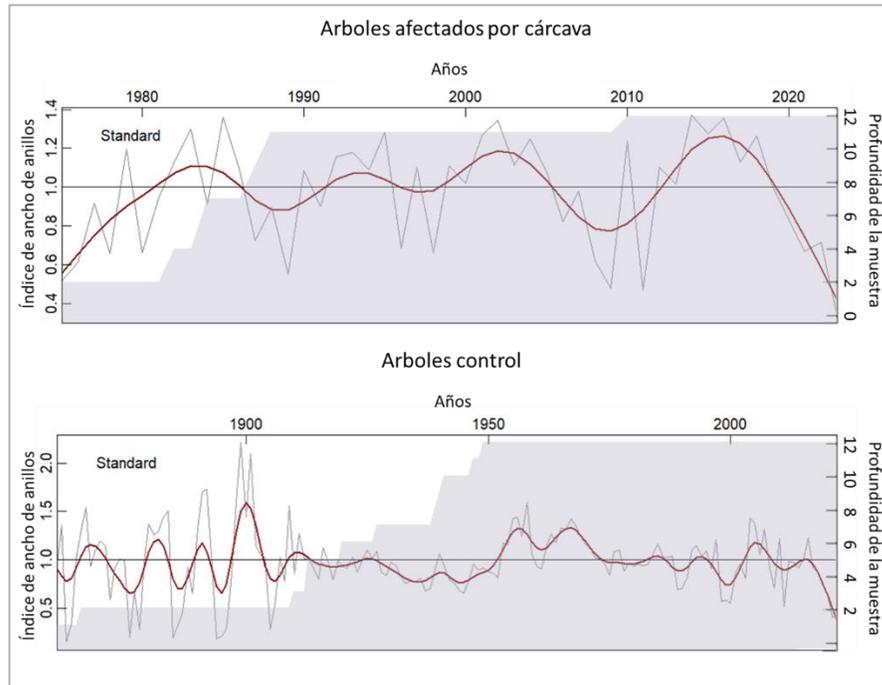
El año 1987 se distingue como el periodo con el mayor número de árboles impactados, registrando un total de cinco individuos afectados. Este valor representa un pico en la cronología de los disturbios pluviales en individuos asociadas a la cárcava, evidenciando un evento significativo de erosión o afectación en el ecosistema. Además, se observan otros años con altos niveles de afectación, como 1991, 1994 y 1995, donde se registraron cuatro individuos impactados respectivamente. Estos aumentos sugieren la ocurrencia de eventos de precipitación intensa o condiciones ambientales que propiciaron la erosión y afectación de las raíces en esos periodos.

### 6.3 Incremento troncal

Como resultado de la medición del ancho de los anillos de crecimiento de los seis árboles afectados por la cárcava, correspondientes a las especies *Pinus strobiformis* y *Pinus hartwegii*, se obtuvo un patrón de crecimiento con una correlación entre los núcleos medidos de 0.507, lo cual supera la correlación mínima requerida por el programa COFECHA (0.422). El registro de crecimiento más antiguo data del año 1975, con una edad de 49 años. De manera similar, en los seis árboles control de las mismas especies, el patrón de crecimiento mostró una correlación entre los núcleos medidos de 0.390, también superando la correlación requerida por COFECHA (0.328). La edad máxima registrada fue de 162 años, datando el árbol al año 1861.

En la Figura 12 se presenta la estandarización de la serie de crecimiento con una media de 1.0, lo que muestra la eliminación de las tendencias asociadas al

crecimiento natural, que tiende a disminuir con la edad del árbol. Para ello, se utilizó la función "ModNegExp" (Modified Negative Exponential) (Bunn, 2024).



**Figura 11.** Índice de ancho de anillos (Modified Negative Exponential) obtenido de árboles de *Pinus hartwegii* y *Pinus strobiformis* a una altitud entre 3,130 y 3,240 msnm en el noroeste del cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León.

En la imagen se observa la tendencia de las muestras en relación con la longevidad de cada individuo muestreado. Se registra un menor ancho de anillos en los años 2006, 2008, 2009, 2011 y 2021, mientras que se observa un mayor índice de crecimiento en los años 2003, 2005, 2010, 2014 y 2016.

### 6.3.1 Análisis

Se realizó un análisis de normalidad de los datos utilizando la prueba de Shapiro-Wilk, cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5** Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk de núcleos de incremento.

<b>ID</b>	<b>Desviación <i>W</i></b>	<b>Valor de <i>p</i></b>
Arboles afectados	0.94401	0.02126
Arboles control	0.96775	0.00079

La prueba de Shapiro-Wilk rechazó la normalidad en las mediciones tanto de los árboles afectados ( $W = 0.94401$ ,  $p = 0.02126$ ) como de los árboles control ( $W = 0.96775$ ,  $p = 0.00079$ ), indicando que los datos no siguen una distribución normal.

Se realizó la prueba U de Mann-Whitney para comparar las distribuciones de los dos grupos, correspondientes a los árboles afectados (Grupo A) y a los árboles de control (Grupo C). Los resultados indicaron que no existen diferencias significativas entre ambos grupos ( $W = 1326$ ,  $p = 0.2821$ ), lo que sugiere que las distribuciones de las muestras son similares.

## 7. Discusión

La magnitud de la pérdida de suelo coincide con lo planteado por Ballesteros et al. (2013), quienes destacan la eficacia de las técnicas de dendrogeomorfología para cuantificar tasas de erosión. En este caso, la utilización de los anillos de crecimiento en las raíces como indicadores de perturbaciones geomorfológicas ha permitido no solo conocer la fecha de inicio de la cárcava caracterizada sino, también asociar dicho fenómeno a cambios en el crecimiento de los árboles a lo largo del tiempo. La técnica aplicada ha demostrado ser útil para la reconstrucción temporal de los eventos erosivos, en línea con lo mencionado por Strunk (1997). Strunk argumenta que los anillos de crecimiento en las raíces pueden reflejar tanto la frecuencia como la intensidad de los procesos de eluviación e iluviación, los resultados de la presente investigación confirman la viabilidad de utilizar este método para cuantificar dichos procesos. Se observó que, después de cada disturbio pluvial que expuso raíces de los individuos afectados por la cárcava, la generación de los anillos de crecimiento se inició, proporcionando información para estimar la recurrencia y magnitud de los disturbios en la zona de estudio.

La relación entre la erosión del suelo y la formación de cárcavas está estrechamente vinculada a los procesos de eluviación y iluviación descritos por Gisbert e Ibáñez (2002). Estos procesos, influenciados por precipitaciones intensas, provocan la eluviación y su posterior iluviación en otras zonas. En el contexto de este estudio, los resultados muestran que la cárcava ha estado activa durante casi medio siglo, un lapso considerable que ha tenido efectos acumulativos en la pérdida de suelo.

El análisis estadístico realizado, específicamente la prueba de Shapiro-Wilk, reveló que los datos de los anillos de crecimiento no siguen una distribución normal, tanto en los árboles afectados como en los árboles de control. Este resultado es consistente con estudios previos, como el de Strunk (1997), quien demostró que los cambios en las condiciones geomorfológicas y ambientales generan distribuciones no lineales en los patrones de crecimiento. Las perturbaciones en el entorno, como la erosión, tienden a afectar el crecimiento de los árboles de manera impredecible, lo que explica la falta de normalidad en los datos. Este comportamiento es esperado en estudios dendrocronológicos, donde las perturbaciones naturales y las variaciones ambientales generan datos con distribuciones asimétricas o no normales, como se observa en los estudios de Lawler (2005) y Gärtner et al. (2001). La ausencia de normalidad en los datos sugiere que los árboles, tanto en las zonas afectadas por cárcavas como en las áreas control, han estado sujetos a presiones ambientales que afectan su crecimiento de manera no lineal.

Es importante considerar que el muestreo incluye individuos de dos especies, *Pinus hartwegii* y *Pinus strobiformis*, cuya distribución en los grupos de control y afectados podría no haber sido equitativa. Esta diferencia en la composición específica puede haber influido en las correlaciones obtenidas y en la distribución de los datos, afectando así la normalidad de estos.

La prueba U de Mann-Whitney, aplicada para comparar las distribuciones de los árboles afectados y los de control, no encontró diferencias significativas entre ambos grupos ( $p = 0.2821$ ). Esta baja significancia no permite marcar un patrón distinto en comparación con los árboles de control ya que la estabilidad estructural

y la disponibilidad de recursos para la mayoría de las raíces de los árboles afectados por la cárcava no se vieron comprometidas en gran medida. Esto podría explicarse, por el tamaño reducido del muestreo, la distribución irregular de *Pinus strobiformis* y *Pinus hartwegii* entre los grupos de control y afectados, así como la estabilidad estructural y la disponibilidad de recursos para la mayoría de las raíces de los árboles afectados por la cárcava no se vieron comprometidas. Es importante señalar que, en la mayoría de los individuos muestreados, solo una pequeña parte de las raíces quedó expuesta, mientras que la mayor proporción permaneció protegida dentro del suelo.

Además, es importante considerar que el muestreo realizado representa el 8 % del total de la cárcava, lo que podría limitar la detección de patrones significativos en las tasas de crecimiento. Por lo tanto, las fluctuaciones en el ancho de los anillos no reflejan un cambio general en las tasas de crecimiento, sino más bien respuestas puntuales a eventos específicos o a las condiciones heterogéneas del sitio de estudio.

Los resultados del presente estudio muestran que la correlación obtenida en el patrón de crecimiento de los segmentos de raíces muestreados (0.018) es considerablemente inferior a la mínima exigida por el programa COFECHA (0.328), lo que indica que la variabilidad de los anillos de crecimiento no presenta una estructura definida que permita identificar patrones significativos. Esto sugiere que, a pesar de las técnicas aplicadas para el análisis dendrogeomorfológico, no se lograron obtener evidencias concluyentes en la medición de los disturbios que han afectado a los árboles en la cárcava.

A lo largo de los últimos 46 años, se ha documentado la cronología de los disturbios, con el año 1987 destacando por el mayor número de individuos afectados (cinco árboles). Sin embargo, la falta de correlación significativa en los datos plantea interrogantes sobre la precisión y el alcance de los eventos registrados. Comparado con estudios previos, como los de Hitz et al. (2007) y García-Oteyza et al. (2015), en los que se identificaron cambios anatómicos evidentes en las raíces y secuencias

de crecimiento relacionadas con la exposición de las raíces y la pérdida progresiva de la cobertura edáfica, los resultados actuales no reflejan con claridad esos patrones.

Es posible que la variabilidad en los anillos de crecimiento de los árboles estudiados no esté exclusivamente relacionada con los disturbios dendrogeomorfológicos, sino que también esté influenciada por otros factores ambientales o estresores que no fueron capturados adecuadamente en el presente muestreo. Hitz et al. (2007) señala que las raíces expuestas experimentan cambios anatómicos por la variación de temperatura, la reducción de la presión edáfica y la mayor incidencia de luz, lo que provoca estrés mecánico. Aunque estas condiciones fueron consideradas en el análisis, no se reflejaron en patrones de crecimiento suficientemente consistentes para ser estadísticamente significativos.

Respecto a los antecedentes proporcionados por Díez-Herrero (2013), se mostró que los estudios dendrogeomorfológicos pueden ser efectivos al comparar datos de crecimiento de diferentes especies, identificando patrones claros en la distribución de edades y en la presencia de secuencias de crecimiento. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta investigación no revelan patrones comparables en los árboles de la cárcava, lo que podría deberse al número limitado de individuos estudiados o a la variabilidad intrínseca de los datos.

Al analizar la serie estandarizada de crecimiento (Figura 9), se observan fluctuaciones significativas en los anillos de crecimiento a lo largo del tiempo, lo que coincide con las tendencias descritas en la literatura. Lawler (2005) menciona que la exposición de las raíces puede ser un buen indicador de la tasa de erosión, y estos resultados respaldan dicha afirmación.

La disminución en el ancho de los anillos en años específicos, como 2006, 2008, 2009, 2011 y 2021, podría estar relacionada con eventos climáticos extremos o episodios de erosión acelerada. Gärtner et al. (2001) también señalan que factores como las variaciones de temperatura, la presión edáfica y la incidencia de luz

pueden alterar los patrones de crecimiento, lo que coincide con los picos de crecimiento observados en años como 2003, 2005, 2010, 2014 y 2016, cuando los anillos de crecimiento fueron más anchos.

## 8. Conclusión

A través de técnicas de dendrogeomorfología, se ha logrado cuantificar el tiempo del volumen de suelo perdido. Los procesos de eluviación e iluviación descritos por Gisbert e Ibáñez (2002) y Strunk (1997) se ven reflejados en los resultados obtenidos, los cuales muestran la sensibilidad de los anillos de crecimiento a las perturbaciones geomorfológicas. La relación entre los patrones de crecimiento y la pérdida de suelo no representa un factor significativo en el desarrollo de los árboles a lo largo de los últimos 49 años; por lo tanto, se rechaza la hipótesis.

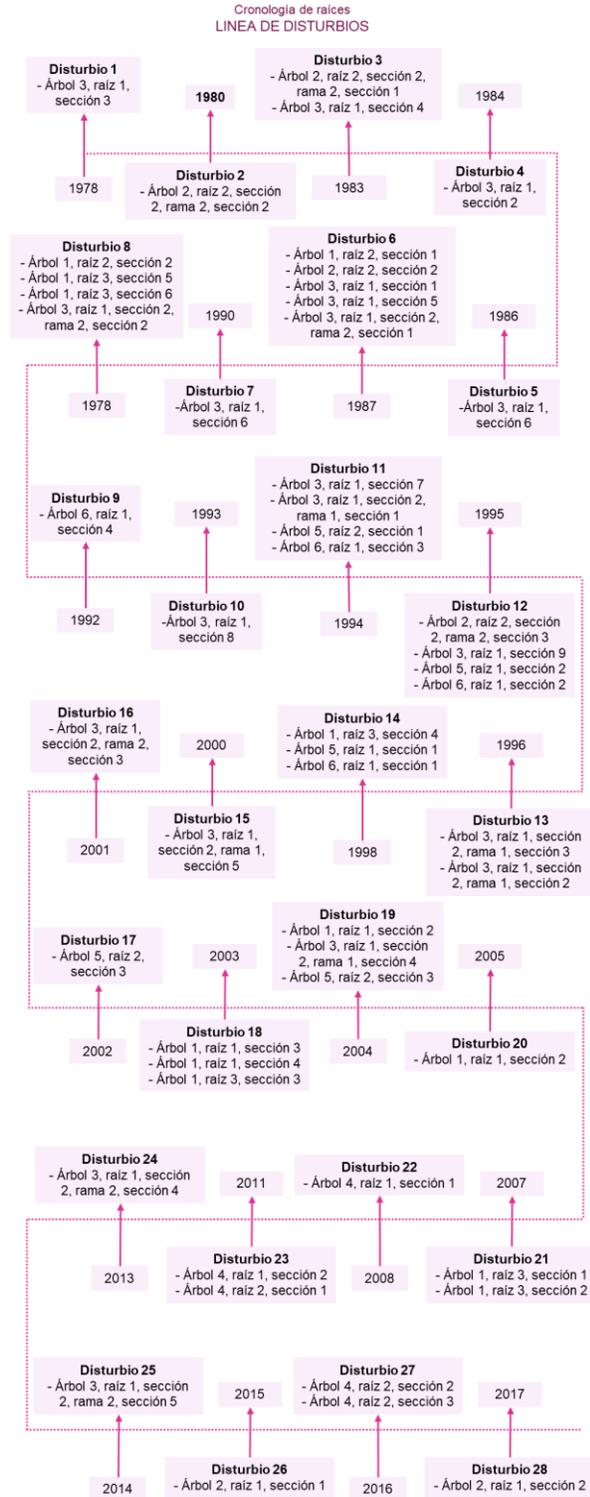
### Tiempo expuesto de las raíces

Los hallazgos sugieren que los datos actuales no son suficientes para proporcionar una caracterización robusta de los disturbios dendrogeomorfológicos en el área de estudio. La correlación baja entre los anillos de crecimiento y la ausencia de patrones significativos en la cronología de los disturbios indican la necesidad de un enfoque más amplio. Para futuros estudios, se recomienda realizar un muestreo más extenso que considere un mayor número de individuos afectados. Esto permitiría una mejor identificación de los patrones de crecimiento y una mayor comprensión de los procesos geomorfológicos que afectan a la vegetación forestal en zonas de cárcavas.

### Núcleos de incremento

Los resultados sugieren que las cárcavas no han afectado el crecimiento de los árboles estudiados. Las fluctuaciones observadas en los anillos de crecimiento están en línea con los estudios previos sobre el impacto de la exposición radicular, la erosión y otros factores ambientales. A futuro, sería útil analizar más detalladamente el papel de las condiciones climáticas y otros factores ambientales para comprender mejor las dinámicas de crecimiento en estas especies forestales.

## 9. Anexos



## 10. Bibliografía

Anglés, M., Bocco, G., Cotler, H., Cram, S., Lee, W. H., Ortiz, S., Prado, B., Reyes, L. B., Saniger, J. M., & Siebe. (2019). Por una gestión sostenible del suelo que promueva su reconocimiento, recuperación, preservación y gobernanza. Ch. Vol. 2. Pronunciamento: Gestión sostenible del suelo. <http://www.cic-ctic.unam.mx/>

Ballesteros-Cánovas, J. A., Bodoque, J. M., Lucía, A., Martín-Duque, J. F., Díez-Herrero, A., Ruiz-Villanueva, V., ... & Genova, M. (2013). Dendrogeomorphology in badlands: Methods, case studies and prospects. *Catena*, 106, 113-122.

Bunn, A. G. (2010). Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia*, 28(4), 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.12.001>

Bunn, A., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., Mérian, P., Qeadan, F., Zang, C., Buras, A., Cecile, A., Mudelsee, M., Schulz, M., Klesse, S., Frank, D., Visser, R., Cook, E., & Anchukaitis, K. (2024). dplR: Dendrochronology Program Library in R (Version 1.7.7) [Paquete R]. CRAN. <https://github.com/OpenDendro/dplR>

Cotler, Helena (2020). Manual para evaluar la erosión de los suelos en zonas forestales. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, México.

Díez-Herrero, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Bodoque, J. M., & Ruiz-Villanueva, V. (2013). A review of dendrogeomorphological research applied to flood risk analysis in Spain. *Geomorphology*, 196, 211-220.

Fuster, M. G., & Herrero, A. D. (2022). Dendrocronología: Datación de materiales, formas y eventos a través de los anillos de los árboles. *Cuaternario y Geomorfología*, 36(3-4), 45-58.

Fritts, H. C. (2001). *Tree Rings and Climate*. Blackburn Press.

García-Oteyza, J., Génova, M., Calvet, J., Furdada, G., Guinau, M., & Díez-Herrero, A. (2015). Datación de avenidas torrenciales y flujos de derrubios

mediante metodologías dendrogeomorfológicas (barranco de Portainé, Lleida, España). *Ecosistemas*, 24(2), 43-50.

Gärtner, H., Schweingruber, F. H., & Dikau, R. (2001). Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia*, 19(1), 81-91.

Gerencia de Restauración Forestal. (2018). Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

Gisbert, J. M., & Ibáñez, S. (2002). *Genesis de Suelos*. Ediciones Universidad Politécnica de Valencia.

Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205–221. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/251654/trr-57-02-205-221.pdf>

González Tagle, M., Avila Flores, D. Y., Himmelsbach, W., & Cerano Paredes, J. (2020). Fire history of conifer forests of Cerro el Potosí, Nuevo León, Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 64(3–4), 203–209. <https://doi.org/10.1894/0038-4909-64.3-4.203>

Hitz, O., Gärtner, H., Heinrich, I., & Monbaron, M. (2007). Application of ash (*Fraxinus excelsior* L.) roots to determine erosion rates in mountain torrents. *CATENA*, 72(2), 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.05.008>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México). (2022). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2021. México INEGI.

IUSS Working Group WRB (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para

la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.

Lawler, D. M. (2005). The importance of high-resolution monitoring in erosion and deposition dynamics studies: Examples from estuarine and fluvial systems. *Geomorphology*, 64(1-2), 1-23.

Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>

Mendoza, M. E., & Carlos, T. (2014). Dendrogeomorfología: Un enfoque en el análisis de peligros naturales. *Investigación Geográfica*, 48(2), 337-356. <https://www.redalyc.org/journal/6061/606170065004/606170065004.pdf>

Phipps, R. L. (1985). Collecting, preparing, crossdating, and measuring tree increment cores geological survey. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/wri/1985/4148/report.pdf>

Sánchez-Asunción, W. ., Cerano-Paredes, J., Franco-Ramos, O., Cornejo-Oviedo, E. ., Villanueva-Díaz, J. ., Flores-López, C. ., & Garza-Martínez, M. . (2020). Potencial dendrogeomorfológico de *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson para la reconstrucción de avenidas torrenciales en Los Picos de Davis, Coahuila. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 26(3), 451–467. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.02.006>

SEMARNAT. (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. SEMARNAT. México.

SEMARNAT. (2003). Evaluación de la pérdida de suelos por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, escala 1:000 000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Universidad Autónoma Chapingo.

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591–611.

<https://doi.org/10.2307/2333709>

Strunk, H. (1997). Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *Catena*, 31(1-2), 137-151.

Soil Science Society of America. (2008). Glossary of soil science terms 2008. ASA-CSSA-SSSA.

Vandekerckhove, L., Muys, B., Poesen, J., De Weerd, B., & Coppé, N. (2001). A method for dendrochronological assessment of medium-term gully erosion rates. *Catena*, 45(2), 123-161.

Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Stahle, D.W., Therrell, M.D., Cleaveland, M. K., & Sánchez-Cohen, I. (2004). Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México. INIFAP, CENID-RASPA. Folleto técnico No. 2, Gómez Palacio, Dgo.

Yocom, L., Fulé, P. Z., Brown, P. M., Cerano, J., Villanueva-Díaz, J., Falk, D. A., & Cornejo-Oviedo, E. (2010). El Niño-southern oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology*, 91(6), 1660–1671.

<https://doi.org/10.1890/09-0845.1>