# MAGÍSTER EN OCEANOGRAFÍA

## TESIS

# Datación de subsidencia cosísmica costera usando $C^{14}$ y dendrocronología: constriñendo la edad del primer terremoto gigante del segundo milenio en el centro sur de Chile.

**Cyntia Mizobe Alcivar**

**Valparaíso 2018**

**COMISIÓN DE TESIS**

Profesor Guía: _____
Director Proyecto Tesis: Marco Cisternas
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Profesor Co-Guía: _____
Ariel Muñoz
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Profesor Informante: _____
Patricio Winckler
Universidad de Valparaíso

## AUTORIZACIÓN DE USO

Al presentar esta Tesis como requisito para la obtención del Grado de Magíster en Oceanografía, autorizo a las Bibliotecas de la Facultad de Recursos Naturales de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y de la Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad de Valparaíso, para disponer libremente de ella. Autorizo además reproducciones parciales o totales de esta Tesis sólo con fines académicos.

_____

Cyntia Mizobe

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo del equipo del Laboratorio de Geología de Tsunamis, en especial al profesor Marco Cisternas y a Gino Figueroa, al Laboratorio de Dendrocronología y Estudios Ambientales, en especial a Ariel Muñoz e Isabella Aguilera, al profesor Antonio Lara de la Universidad Austral de Chile y a Rocío Urrutia del Instituto Forestal de Valdivia por facilitar las cronologías de alerces para este trabajo, al Laboratorio de Esclerocronología y al de Biogeoquímica Marina, pertenecientes a la Facultad de Ciencias del Mar y Geografía de la PUCV.

Esta investigación ha sido financiada por el Núcleo Científico Milenio "CYCLO: The Seismic Cycle along subduction Zones" (NC160025), y el proyecto FONDECYT N°1150321: "Recurrencia de grandes terremotos y tsunamis en Chile Metropolitano".

**ÍNDICE**

1. INTRODUCCIÓN ..... 1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS ..... 6
2.1 Objetivo general ..... 6
2.2 Objetivos específicos ..... 6
2.3 Hipótesis ..... 6
3. MATERIALES Y MÉTODOS ..... 7
3.1 Área de estudio ..... 7
3.2.1 Sitio P-1 ..... 8
3.2.2 Sitio P-2 ..... 8
3.2 Datación de las raíces fósiles con radiocarbono ..... 9
3.3 Datación de las raíces de los sitios P-1 y P-2 con dendrocronología ..... 10
3.4.1 Preparación de las muestras para análisis dendrocronológico ..... 10
3.4.2 Identificación, conteo y medición de los anillos de crecimiento ..... 13
3.4.3 Datación cruzada ..... 15
3.4.4 Validación de la aproximación utilizada ..... 17
3.4.5 Obtención de una edad con un rango temporal reducido. ..... 17
4. RESULTADOS ..... 19
4.1 Obtención de las muestras ..... 19
4.2 Datación de las raíces fósiles con radiocarbono ..... 19
4.3 Datación de las raíces de los sitios P-1 y P-2 con dendrocronología ..... 19
4.3.1 Resultados de la preparación de las muestras ..... 19
4.3.2 Identificación, conteo y medición de los anillos de crecimiento ..... 24
4.3.3 Datación cruzada o cofechado ..... 25
4.3.4 Resultados de la validación de la metodología ..... 27
4.3.5 Reducción del rango de edad del evento D ..... 30
5. DISCUSIÓN ..... 35
6. CONCLUSIONES ..... 37
7. REFERENCIAS ..... 38
8. ANEXOS ..... 42

## RESUMEN

En la región del terremoto gigante de 1960 (Mw 9,5) se ha avanzado considerablemente en la estimación de la recurrencia prehistórica de terremotos de subducción y tsunamis asociados. A la fecha, mediante estudios paleosismológicos se han logrado identificar siete eventos, anteriores a 1960, ocurridos durante los últimos 2000 años. Un terremoto, probablemente similar al de 1960, denominado evento D (Cisternas *et al.*, 2005), habría ocurrido a inicios del segundo milenio. Lamentablemente, debido a las limitaciones de la datación con radiocarbono, la edad de este evento se mantiene con un amplio rango temporal de incertidumbre, abarcando alrededor de un siglo. Dicha incertidumbre genera un importante traslape con los rangos de edad de los otros eventos, también reconocidos a través de la geología, ocurridos durante el segundo milenio. De este modo, es imposible lograr tasas de recurrencia que sean útiles para determinar estadísticamente las probabilidades de ocurrencia futura de este tipo de eventos en base a lo acontecido previamente.

Así, el presente trabajo desarrolló una nueva aproximación para constreñir el rango temporal del evento D. Primero, mediante radiocarbono se dataron raíces fósiles de árboles que murieron por efecto de la subsidencia cosísmica. Posteriormente, esas raíces fueron analizadas dendrocronológicamente y los patrones de crecimiento de sus anillos fueron comparados con cronologías maestras de alerce para reducir el rango temporal. Se experimentaron diversas metodologías, tanto de preparación de las muestras como para su posterior análisis dendrocronológico. Paralelamente, se realizó un experimento para validar la aproximación propuesta. Para ello, se correlacionaron los patrones de crecimiento de raíces de árboles que murieron en 1960 con cronologías maestras de alerces del último siglo.

Las dataciones con radiocarbono de las raíces fósiles indicaron que los árboles murieron entre los años 1043 y 1153 DC, abarcando un rango temporal de 110 años. Posteriormente, aplicando la aproximación dendrocronológica, se redujo el rango de edad del evento D a los años 1030 y 1058 DC, constriñendo el rango de incertidumbre a sólo 28 años.

Sin embargo, es necesario reconocer al menos dos limitaciones que tuvo el estudio. Por una parte, el bajo número de muestras y, por otra, la poca cantidad de anillos que ellas tenían. Esta situación probablemente limitó la robustez estadística de los resultados obtenidos.

A pesar de esos problemas, esta investigación aporta de una manera novedosa al conocimiento científico de la recurrencia sísmica en la región del terremoto gigante de 1960. También supera en parte el problema del traslape de edades entre los terremotos del segundo milenio. Esta edad constreñida para el evento D será útil para subsecuentes estudios estadísticos sobre la probabilidad que un gran terremoto pueda afectar a esta región de Chile en el futuro.

## ABSTRACT

In the region of the giant 1960 Chile earthquake (Mw 9.5) there has been a considerable advance estimating the prehistoric recurrence of megathrust earthquakes and ensuing tsunamis. Until now, seven predecessors to the 1960 earthquake have been identified through paleoseismological studies during the last two millennia. An earthquake likely similar to 1960, named event D (Cisternas *et al.*, 2005), occurred at the beginning of the second millennium. Unfortunately, because the radiocarbon dating limitations, the age of that event is still bounded to about a century. Such uncertainty produces an overlap with the age ranges of the other events, also recognized through paleoseismology. Thus, it is impossible to obtain recurrence rates useful to statistically determine the return probabilities of this kind of events.

This study developed a novel approach to constrain the temporal range of event D. First, fossil roots from trees killed by coseismic subsidence were radiocarbon dated. To reduce the temporal range those roots were dendrochronologically analyzed and the growth patterns of their rings were compared with master alerce chronologies. Diverse methodologies were tested, including sample preparation and further dendrochronological analyses. In parallel, an experiment was carried out to validate the proposed approach. For this, the growth ring patterns of the trees killed by 1960 were correlated with master alerce chronologies spanning the last century.

The radiocarbon dates of the fossil roots showed the trees were killed between the years AD 1043 and 1153, spanning a temporal range of 110 years. Then, applying the dendrochronological approach to the range of year defined by radiocarbon analysis, the event D age range was reduced to the years AD 1030 and 1058, constraining the uncertainty age to only 28 years.

However, it is necessary to recognize at least two limitations of this study. First, the reduced quantity of samples, and second, the few rings the samples had. Which both likely limited the statistical robustness of the results.

Despite these problems, this study contributes in a novel way to the scientific knowledge of the seismic recurrence of giant 1960 type of earthquake in the region. It also overcomes in part the problem of the age overlap among earthquakes that occurred at the beginning second millennium. This constrained age for event D will be useful for subsequent studies on the probability that a great earthquake could strike this region of Chile in the future.

## 1. INTRODUCCIÓN

La paleosismología es la disciplina que reconoce la ocurrencia pasada de grandes terremotos y tsunamis, anteriores a los registros escritos e instrumentales (Atwater, 1992; Cisternas *et al.,* 2005; Nanayama *et al.,* 2007; Cisternas *et al.,* 2018). Alrededor del Océano Pacífico, la mayoría de los registros de largo término de grandes terremotos se basan en pruebas paleosismológicas como el alzamiento y hundimiento de la superficie terrestre, y depósitos de tsunamis. Este tipo de evidencia ha ayudado por ejemplo a explicar la enormidad del terremoto gigante ocurrido el 22 de mayo de 1960, a lo largo de la costa del centro-sur de Chile (Satake y Atwater, 2007).

Diversos estudios han utilizado la estratigrafía de los humedales intermareales y la paleoecología como claves para extender la historia de los grandes terremotos a escala de miles de años en las costas de zonas de subducción (Satake y Atwater, 2007). Así ha ocurrido en Cascadia (Shennan *et al.,* 1996; Atwater y Hemphill-Haley, 1997; Peters *et al.,* 2007), Sumatra-Andaman (Monecke *et al.,* 2008; Malik *et al.,* 2011; Rajendran *et al.,* 2013) y en Japón (Nanayama *et al.,* 2007; Tanigawa *et al.,* 2014).

En Chile, algunas investigaciones se han basado en evidencia de tsunamis y hundimiento (subsidencia) de la costa (Reed *et al.,* 1988; Atwater *et al.,* 1992; Bartsch-Winkler y Schmoll, 1993; Cisternas *et al.,* 2005; Nelson *et al.,* 2009; Atwater *et al.,* 2013; Ely *et al.,* 2014; Garret *et al.,* 2015; Nentwing *et al.,* 2015; Hong *et al.,* 2016; Cisternas *et al.,* 2018). Otros trabajos utilizan la evidencia de sacudimiento, mediante la interpretación de depósitos de turbiditas, generadas por corrientes de turbidez, en lagos y en el talud continental (Moernaut *et al.,* 2007; Blumberg *et al*., 2008; Moernaut *et al.,* 2014; Bernhardt *et al.,* 2015; Moernaut *et al.,* 2018).

El presente trabajo se enmarca en la zona del terremoto más grande registrado instrumentalmente (Kanamori, 1977), ocurrido el 22 de mayo de 1960 (Mw 9,5). Este evento comprendió una ruptura de aproximadamente 1000 km de largo (Plafker y Savage, 1970); generando subsidencia costera desde el Golfo de Arauco por el norte hasta la Península de Taitao por el sur. Hasta el momento, en esta región se ha avanzado considerablemente en la estimación de los intervalos de recurrencia de terremotos de subducción, pudiéndose identificar eventos pasados ocurridos en los últimos 2000 años (Cisternas *et al*., 2005).

En la figura 1 se observa una comparación cronológica, de norte a sur, de la evidencia actualmente disponible de terremotos y tsunamis a lo largo del área del evento de 1960 (Cisternas *et al.,* 2018). Un caso interesante de estudio es el evento denominado "D", identificado en la marisma de Chuyáquen, cercana al poblado de Maullín (Cisternas *et al*., 2005). Se trata de un gran terremoto que generó subsidencia costera y un gran tsunami, quizás similar al de 1960, a inicios del segundo milenio entre los años 1020 y1180 DC, de acuerdo a dataciones con radiocarbono. Del mismo modo, este evento también fue identificado en la marisma de Chucalén, al norte de la Isla de Chiloé. Aquí, los resultados de radiocarbono lo fechan entre el 1070 y1220 DC (Garret *et al*., 2015).

Interesantemente, el evento D también fue reconocido a través de una metodología independiente y basada en el estudio de las marismas. Mediante el análisis de turbiditas

lacustres en el lago Calafquén, a los pies de los Andes, también se reconoció la ocurrencia de un gran terremoto, tipo 1960, que coincidía temporalmente con el rango detectado en las marismas de Chuyáquen y Chucalén (Moernaut *et al*., 2014). Específicamente, el evento D fue datado entre los años 1083 y1170 DC mediante el conteo de varves.

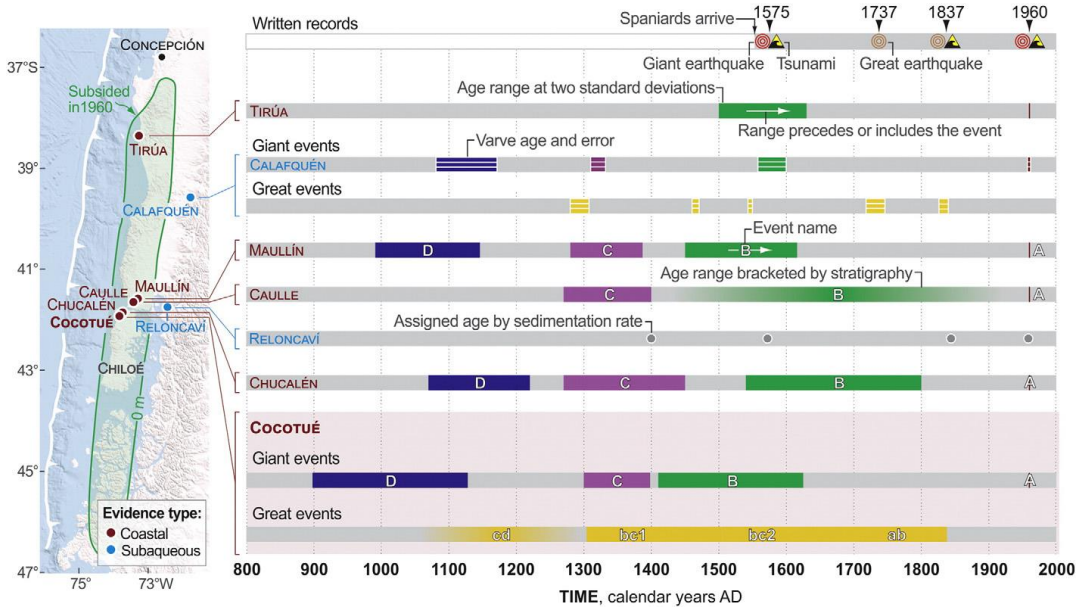



**Figura 1.** Comparación cronológica desde el norte hasta el sur, de la evidencia de terremotos y tsunamis a lo largo de la región del evento de 1960. Sin cobertura de datos al sur de Chiloé. **Fuente:** Cisternas *et al.* (2018).

A pesar de la importancia que tiene el evento D, debido a su probable similitud con 1960, aún no ha sido posible datarlo con mayor precisión a pesar de los esfuerzos realizados hasta la fecha (tabla 1). Dicha falta de precisión, reflejada en un rango de incertidumbre temporal de un siglo aproximadamente, genera un importante traslape con los rangos de otros eventos reconocidos geológicamente (figura 2). Lo anterior se traduce en un grave problema a la hora de determinar estadísticamente las probabilidades de recurrencia de este tipo de eventos. Ello a su vez disminuye la posibilidad de evaluar correctamente la amenaza sísmica futura de la región.

**Tabla 1.** Rangos temporales reportados hasta la fecha para el evento D.

| Lugar de muestreo | Rango temporal | Años | Fuente |
|---|---|---|---|
| Chuyáquen | 1020 DC – 1180DC | 160 años | Cisternas *et al*. (2005) |
| Lago Calafquén | 1083 DC – 1171 DC | 88 años | Moernaut *et al*. (2014) |
| Chucalén | 1070 DC – 1220 DC | 150 años | Garret *et al*. (2015) |
| Cocotué | 898 DC – 1128 DC | 230 años | Cisternas *et al*. (2018) |

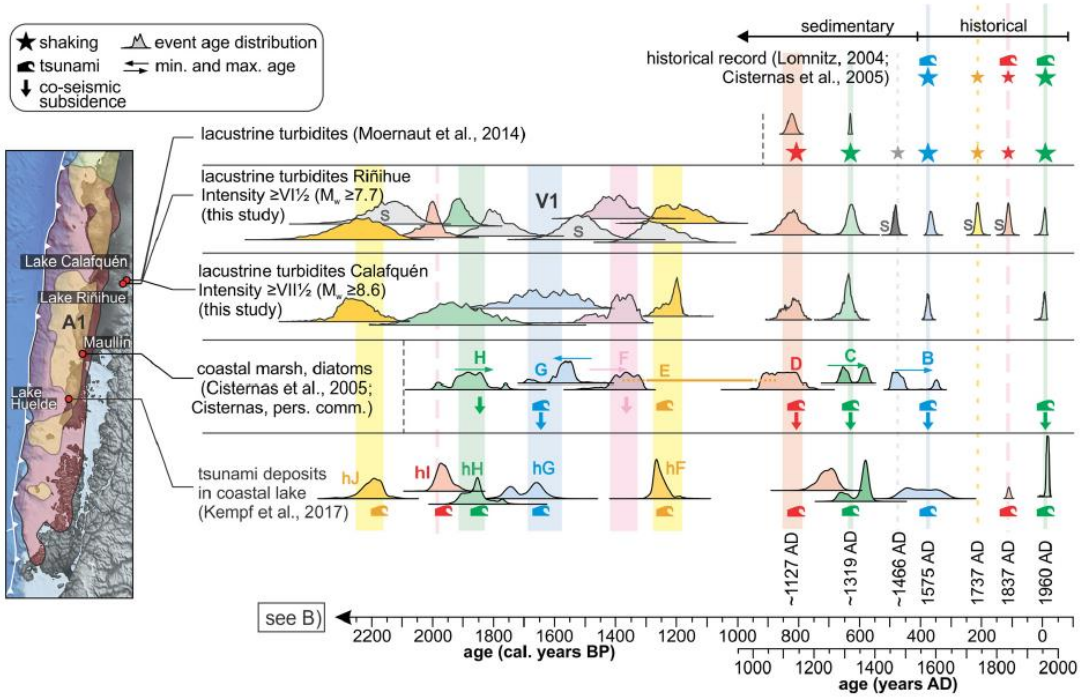



**Figura 2.** Comparación cronológica desde el norte hasta el sur, de distintas evidencias geológicas de terremotos y tsunamis a lo largo de la región del terremoto de 1960. **Fuente:** Moernaut *et al.* (2018).

Considerando que este traslape de edades no permite discernir si se trata de uno o más eventos diferentes (figura 3), la presente investigación desarrolla una nueva aproximación metodológica, mediante el uso de radiocarbono en conjunto con técnicas dendrocronológicas, para disminuir estos rangos de edades y así evitar el traslape entre eventos (figura 4).

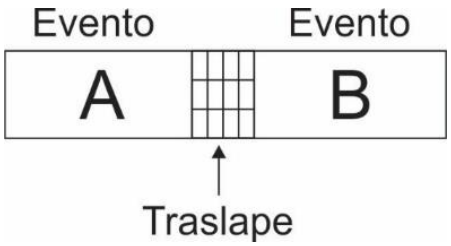



**Figura 3.** Esquema del traslape entre rangos de edades de dos eventos hipotéticos A y B.

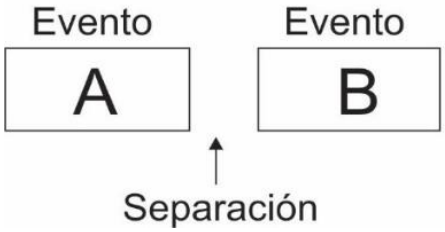



**Figura 4.** Esquema de la separación entre rangos de edades de dos eventos hipotéticos A y B.

Con el objetivo de constreñir la edad del evento D, el presente estudio utiliza raíces de árboles que murieron debido a la subsidencia cosísmica asociada a ese terremoto. Su muerte,

al igual que lo ocurrido en 1960, se debió a la inundación periódica de agua marina por efecto del aumento del prisma de marea. De acuerdo a secuencias de fotografías aéreas antiguas en la planicie de Pangal (Figueroa, 2018), cercana al poblado de Maullín, la subsidencia asociada al terremoto de 1960 generó, a través de erosión, un fuerte retroceso del frente de la planicie (figura 5). Paralelamente, los árboles localizados hacia el interior murieron rápidamente por la intrusión salina y su suelo fue erosionado a medida que la costa retrocedía. Sin embargo, dos décadas después, hacia 1980, la costa comenzó a progradar sostenidamente, sepultando con un cordón litoral al suelo truncado y a las raíces de los árboles muertos. Esta secuencia de eventos generó características morfoestratigráficas claramente distinguibles (Cisternas *et al.*, 2017; Figueroa, 2018).

En este estudio se hallaron similares características morfoestratigráficas, incluyendo un suelo truncado conteniendo raíces, enterradas en la planicie de Pangal, pero a 3,5 km al interior. Se estudió en detalle el suelo y las raíces fósiles con el fin de obtener la edad del evento. Mediante radiocarbono se comprobó que se correspondía con el evento D reportado previamente en Chuyáquen (Cisternas *et al.*, 2005) y en otros sitios.

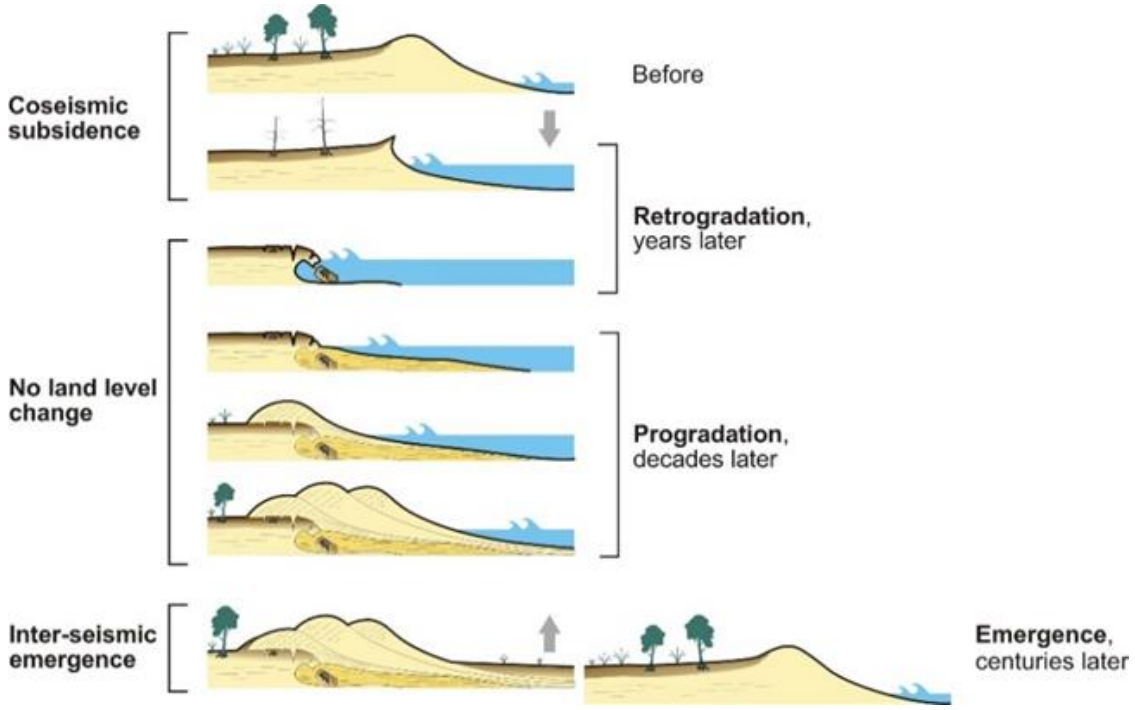



**Figura 5.** Secuencia de la formación de suelos truncados sepultados por cordones litorales en costa afectada por subsidencia cosísmica en 1960, progradación y sedimentación, hasta una posterior emergencia regional. Fuente: Cisternas *et al.* (2017).

Considerando que la evidencia de subsidencia son raíces preservadas en suelos enterrados, y que el radiocarbono entregó un rango de edad demasiado amplio, el presente trabajo utiliza aproximaciones dendrocronológicas, las cuales proponen fechar la muerte de árboles producto de la subsidencia cosísmica, mediante el análisis con radiocarbono en conjunto con el estudio de los anillos de crecimiento de sus raíces. Así el radiocarbono genera un primer rango de tiempo, relativamente amplio, que contiene la fecha de muerte. Por su

parte, el análisis dendrocronológico de los anillos de las raíces, y su comparación con cronologías maestras de largo término de alerce, permiten constreñir el rango temporal entregado por el radiocarbono (figura 6); bajo el supuesto de que árboles de distintas especies pueden tener patrones comunes de crecimiento, los cuales están controlados por las mismas variables climáticas. De esta forma, este trabajo busca fechar con mejor precisión la edad del primer terremoto gigante ocurrido durante el segundo milenio en el centro sur de Chile.

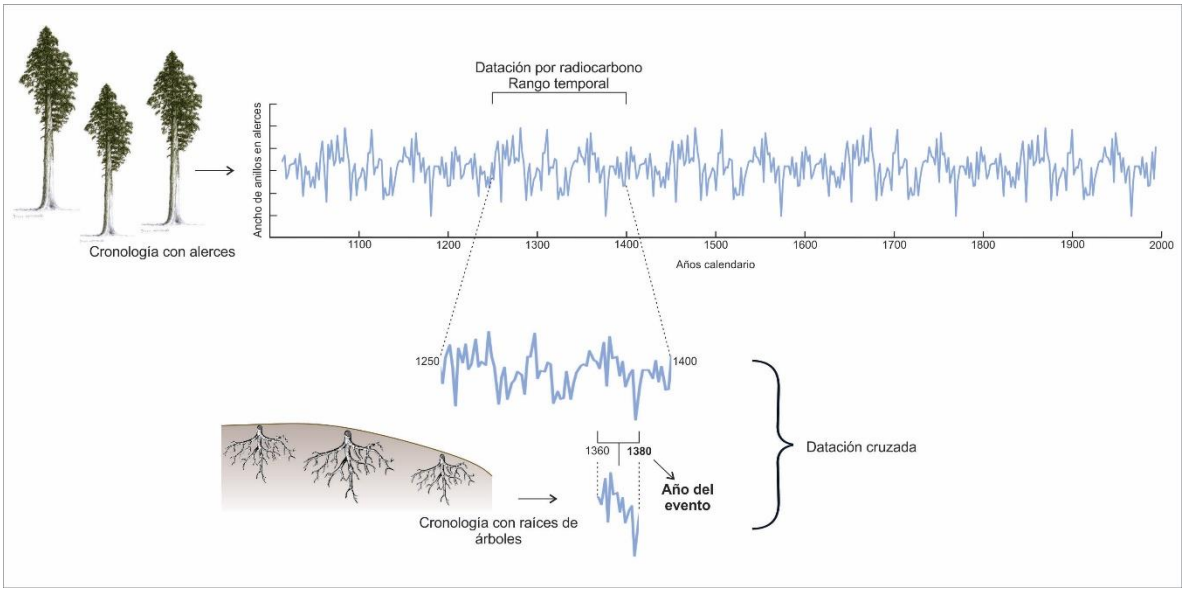



**Figura 6.** Comparación de los patrones de crecimiento entre cronologías de raíces de árboles, muertos por subsidencia cosísmica, con cronologías maestras de alerces para constreñir el amplio rango temporal del radiocarbono.

## 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### 2.1 Objetivo general

Constreñir la edad del primer terremoto gigante del segundo milenio para evaluar de mejor forma la amenaza sísmica del centro sur de Chile.

### 2.2 Objetivos específicos

- Datar mediante análisis de radiocarbono las raíces descubiertas en un suelo enterrado, resultado de la ocurrencia de un evento prehistórico de subsidencia cosísmica.

- Cofechar y analizar estadísticamente las similitudes de los patrones de crecimiento entre las raíces fósiles descubiertas y las largas cronologías maestras de alerce (*Fitzroya cupressoides*), previamente desarrolladas en el centro sur de Chile.

- Validar la aproximación propuesta mediante la datación cruzada entre cronologías de raíces de árboles que murieron por la subsidencia en una fecha conocida, 1960, y cronologías de alerce del último siglo.

- Proponer una edad, con un rango temporal inferior al del radiocarbono, del primer terremoto gigante ocurrido durante el segundo milenio en el centro sur de Chile.

### 2.3 Hipótesis

Es posible, mediante el uso de técnicas dendrocronológicas aplicadas a raíces de árboles (mirtáceas) muertos por subsidencia cosísmica y a cronologías maestras de alerce, constreñir la edad radiocarbónica de terremotos prehistóricos en el centro sur de Chile.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Área de estudio

La planicie costera de Pangal (41,6°S) se localiza en las cercanías del poblado de Maullín y a ~6 km al oeste de la marisma de Chuyáquen, donde previamente se ha reportado un registro geológico de siete predecesores del gran terremoto de 1960 (Mw 9,5). Pangal se ubica en la mitad de la extensión del área de ruptura de este evento.

Se trata de una llanura arenosa de cordones litorales, la cual ha registrado una secuencia de eventos de subsidencia cosísmica y de posible alzamiento inter-sísmico durante el último milenio (Cisternas *et al.*, 2017; Figueroa, 2018). Abarca una superficie de ~25 $km^2$ que está compuesta por un conjunto de pequeños cordones litorales, dunares o *beach ridges*. Los cordones tienen una altitud aproximada de 5 m sobre el nivel medio del mar, y están intercalados por depresiones de ~2 m, que por poseer un nivel freático más somero forman ciénagas estrechas y elongadas.

Registros estratigráficos de esta planicie muestran eventos pasados de subsidencia cosísmica costera. Esta evidencia se encuentra en antiguas líneas de costa (paleocostas), paralelas a la costa actual y sepultadas por cordones litorales abandonados tierra adentro.

En la figura 7 se muestran los puntos de muestreo denominados P-1 ubicado en el cordón litoral al interior de la planicie a 3,5 km desde la costa y el P-2 localizado en la parte distal de la planicie en la costa norte del Río del Rey.

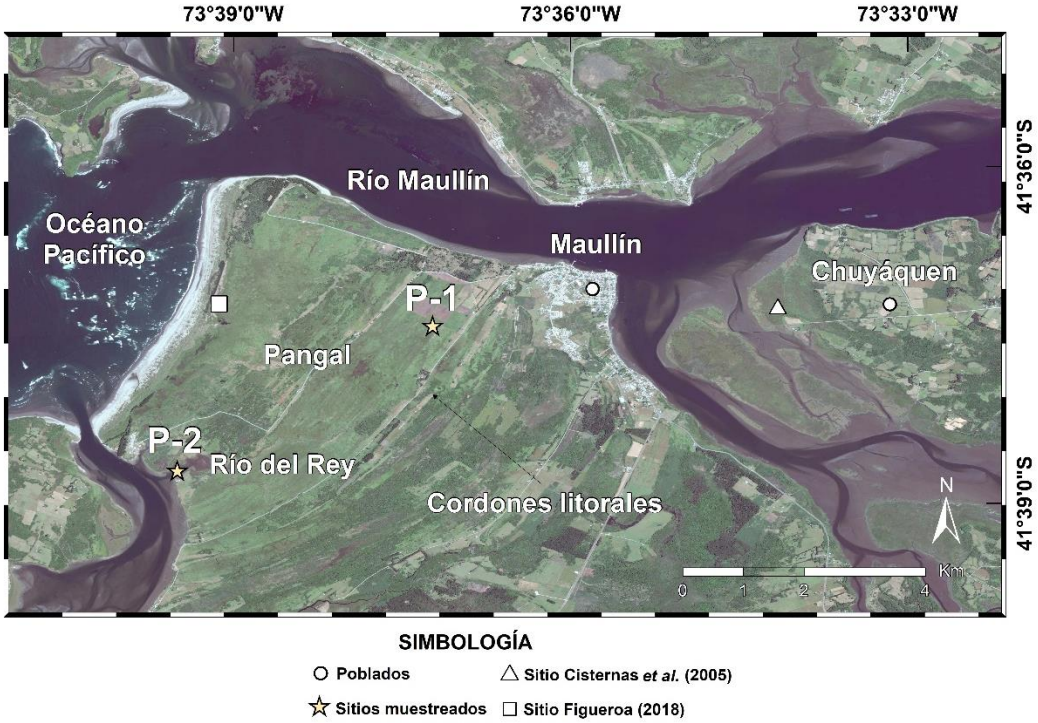



**Figura 7.** Imagen satelital de la planicie costera de Pangal conformada por cordones litorales. Se señalan los sitios previamente estudiados y los sitios de muestreo. Fuente: Google Earth 2016.

Se realizó un muestreo de detalle en dos sitios de la planicie de Pangal. En el sitio P-1 se analizó y muestreó un afloramiento estratigráfico a lo largo de un canal de drenaje 3,5 km tierra adentro (figura 8). La estratigrafía muestra un suelo orgánico truncado y colgante, sepultado por arena masiva, interpretada como evidencia de subsidencia prehistórica. En el sitio P-2, un estero afectado por el aumento del prisma de marea desde 1960, se hallaron tocones de árboles en posición de crecimiento que, de acuerdo a testigos y a fotografías aéreas, murieron por efecto de la inundación periódica de las mareas (figura 9).

### 3.2.1 Sitio P-1

En el verano del año 2017 se obtuvieron 22 muestras de raíces leñosas desde el suelo enterrado en el sitio P-1. Se recolectaron raíces en posición de crecimiento que contaban con corteza y delicadas raicillas, las que descartan posible transporte. Las muestras fueron inmediatamente almacenadas, rotuladas y secadas por 72 horas a la sombra para evitar agrietamientos.

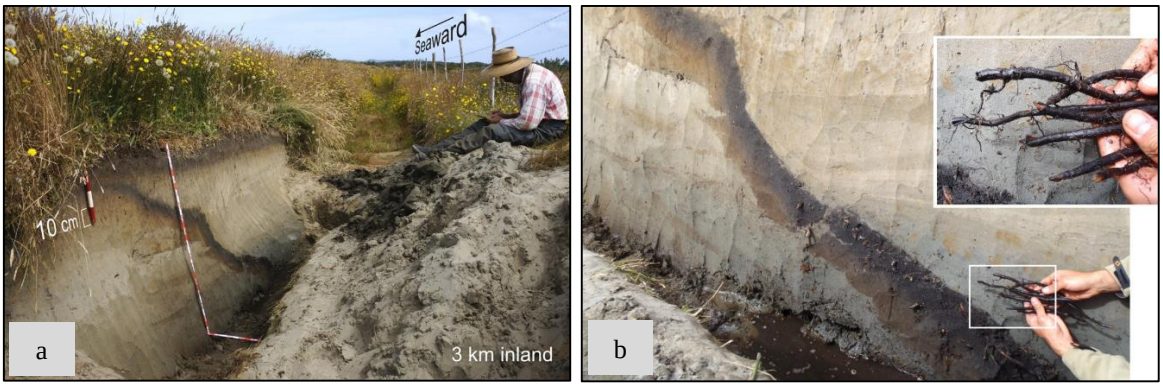



**Figura 8.** a) Suelo truncado sepultado a 3,5 km al interior desde la costa. b) Muestras de raíces recolectadas en un bloque se suelo ubicado en la parte inferior.

### 3.2.2 Sitio P-2

En la primavera del año 2018 en el estero mareal denominado Río del Rey se procedió a obtener 32 raíces desde tocones de árboles en posición de crecimiento que murieron producto de la subsidencia de 1960. Se llegó a esa conclusión considerando el reporte de testigos sobrevivientes del área y comparando fotografías aéreas, incluyendo las tomadas 8 meses después del terremoto. El muestreo se realizó durante la bajamar, desenterrando los tocones desde los restos del suelo de 1960 cubierto por fango intermareal (figura 9). Las muestras así colectadas fueron inmediatamente almacenadas y rotuladas.

**Figura 9.** Obtención de muestras de raíces de árboles muertos por la subsidencia de 1960 en el sitio P-2 (intermareal del estero Río del Rey).

Durante el trabajo en laboratorio se reconoció que las raíces muestreadas pertenecen a árboles del grupo de las mirtáceas, y se identificaron 2 tipos de maderas en ambos muestreos: una más clara y liviana, y otra más oscura y pesada. Trabajo posterior demostró que las maderas oscuras no eran adecuadas para ser utilizadas en el presente estudio, debido principalmente a la falta de anillos de crecimiento visibles.

### 3.2 Datación de las raíces fósiles con radiocarbono

Con la finalidad de conocer la edad de las raíces fósiles encontradas en el sitio P-1, en laboratorio se seleccionaron 2 raíces en buen estado desde las 22 muestras obtenidas en terreno. Fueron lavadas con agua destilada y con la ayuda de una lupa estereoscópica se extrajo el material orgánico moderno asociado y cualquier otro contaminante reconocido visualmente. De una de estas raíces (C1-2-Aa1) se extrajeron raicillas (*rootlets*) y se secaron a temperatura ambiente. La segunda raíz (C1-2-Aa2), de sólo 3 mm de diámetro, fue seccionada transversalmente obteniéndose una sección delgada y posteriormente secada a temperatura ambiente. Las muestras así obtenidas fueron cuidadosamente envueltas en papel de aluminio para ser enviadas al *National Ocean Sciences Accelerator Mass Spectrometry* (NOSAMS) *Facility* del Woods Hole Oceanographic Institution en Wood Hole, Miami, USA, para su análisis radiocarbónico mediante Espectrometría de Aceleración de Masas (AMS).

Una vez obtenidas las dos edades radiocarbónicas, fueron calibradas a “años calendario” con dos desviaciones estándar. Para la calibración se utilizó el set de datos para el Hemisferio Sur propuesto por Hogg *et al*. (2013) y el programa Calib Rev7.0

(http://www.calib.qub.ac.ucalib/). Para reducir al máximo el rango de edad radiocarbónica, se utilizó la herramienta *pooled mean* del mismo programa, calculando un promedio agrupado con las dos edades obtenidas.

### 3.3 Datación de las raíces de los sitios P-1 y P-2 con dendrocronología

En paralelo, para constreñir el rango de edad que resulta del análisis por radiocarbono se realizaron análisis dendrocronológicos. Este proceso involucró 5 etapas fundamentales: i) Preparación de las muestras; ii) Identificación, conteo y medición de los anchos de anillos; iii) Datación cruzada, iv) Validación de la aproximación y v) Obtención de una edad del evento con un rango temporal reducido.

#### 3.4.1 Preparación de las muestras para análisis dendrocronológico

El principal objetivo de la preparación de las muestras es resaltar, de la mejor forma posible, los anillos de crecimiento para su posterior identificación, conteo y medición. En el caso del presente trabajo, que utiliza raíces en vez de troncos de árboles, se debieron enfrentar y solucionar una serie de problemáticas para lograr este objetivo. En primer lugar, el tamaño de las muestras, que es mucho menor del convencional, y por otra parte, los anillos de las raíces de las especies estudiadas (mirtáceas) son difíciles de distinguir. De esta forma, se testearon tres metodologías en la preparación de las mismas para su posterior análisis dendrocronológico: i) la tradicional, ii) la esclerocronológica, y iii) la eliminación de lignina y blanqueamiento.

*i. Metodología tradicional*

Esta aproximación se utilizó sólo con las muestras del sitio P-1, el que contiene las raíces fósiles. La preparación se ejecutó en el Laboratorio de Dendrocronología y Estudios Ambientales del Instituto en Geografía de la PUCV.

En primer lugar, las raíces fósiles se sumergieron en pegamento (cola fría) para estabilizar las muestras debido al frágil estado de su madera, la cual no se podía lijar directamente sin que se desintegrara. Una vez rígidas, se cortaron con una sierra de mano en pequeñas secciones y se lijaron progresivamente con lijas al agua desde el grano 150 hasta llegar a 1500 (figura 10). Posteriormente, se escanearon con alta resolución en un escáner EPSON modelo Expression 11000XL. En la figura 11 se presentan algunas de las muestras escaneadas.

**Figura 10.** Proceso de lijado en el laboratorio de Dendrocronología y Estudios Ambientales, PUCV.

**Figura 11.** Muestras M13 y M14 escaneadas con 2700 dpi de resolución.

### *ii. Aplicación de técnicas esclerocronológicas*

Debido a que la anterior técnica aplicada no mostró resultados evidentes, se procedió a testear la aplicación de técnicas esclerocronológicas a las muestras del sitio P-1. Ellas se realizaron en el Laboratorio de Esclerocronología de la Escuela de Ciencias del Mar, PUCV. En general, la esclerocronología estudia y analiza anillos de crecimiento en algunas estructuras de invertebrados y vertebrados acuáticos.

Se obtuvieron 13 submuestras desde las raíces recolectadas en el sitio P-1. Fueron sumergidas en una mezcla de resina epóxica (100 g de resina y 14 g de endurecedor) al interior de un molde cubetera. Se dejaron secar por 12 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, se rebanaron secciones de 1 mm de cada cubo de resina con una raíz en su interior. Esto se realizó con una cortadora de precisión de baja velocidad, marca Buehler modelo IsoMet™, utilizando dos cuchillas de diamante de 0,3 mm de espesor (figura 12).

Las secciones fueron montadas y pegadas con cera a un portaobjeto, para posteriormente ser pulidas con lijas desde el grano 500 hasta el 1500, con la finalidad de hacerlas transparentes a la luz y así poder reconocer los anillos en una lupa estereoscópica.

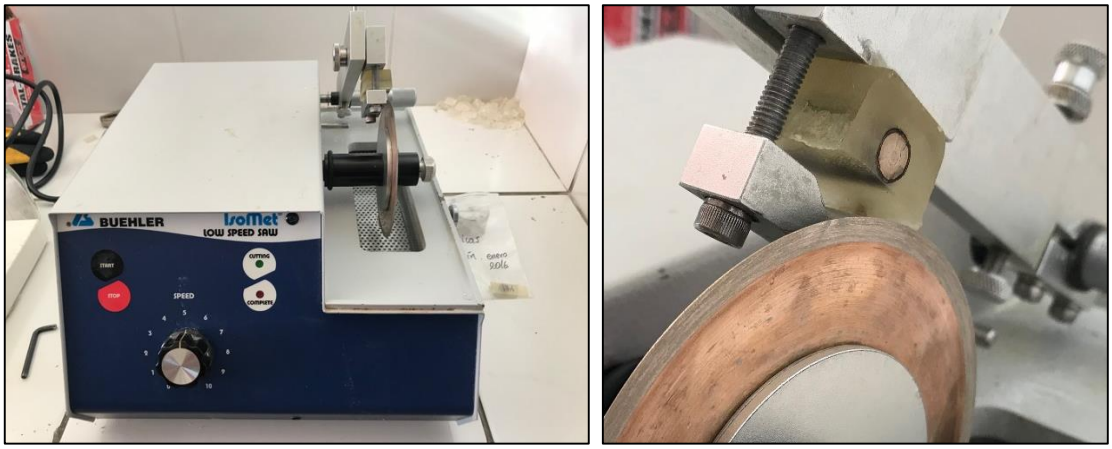



**Figura 12.** Realización de un corte de precisión en una muestra de raíz cubierta por resina.

A pesar de obtener buenos resultados preliminares, esta técnica resultó consumir una enorme cantidad de tiempo y materiales. Del mismo modo, la inmersión en resina implicaba

la pérdida del mismo material muestreal, por no ser posible utilizarlo en análisis posteriores. Por esta razón se continuó la búsqueda de otras metodologías que lograran resultados similares, pero de un modo más rápido. Esto último considerando el gran número de muestras restantes, incluyendo las muestras pendientes del sitio P-2.

### *iii. Metodología eliminación de lignina y blanqueamiento*

Con el objetivo de destacar la matriz estructural de la madera, y de este modo definir de mejor manera los anillos, se realizaron experimentos para degradar la lignina y blanquear las muestras. En el laboratorio de Biogeoquímica Marina de la PUCV se sumergieron pequeñas secciones de las raíces del sitio P-2 en tres diferentes ácidos (clorhídrico, sulfúrico y nítrico) con diferentes concentraciones y tiempos de inmersión (tabla 2 y figura 13).

**Tabla 2.** Concentraciones y tiempos de inmersión de las muestras de raíces en los diferentes ácidos.

| Ácido | Concentración | Tiempo |
|---|---|---|
| Ácido clorhídrico (HCl): | 37% | 7 min |
| | 10 % | 60 min |
| | 10 % | 3 horas |
| | 10 % | 17 horas |
| Ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) | 95% | 7 min |
| | 35% | 60 min |
| Ácido nítrico ($HNO_3$) | 65% | 7 min |
| | 25% | 60 min |
| | 25% | 3 horas |
| | 25% | 17 horas |

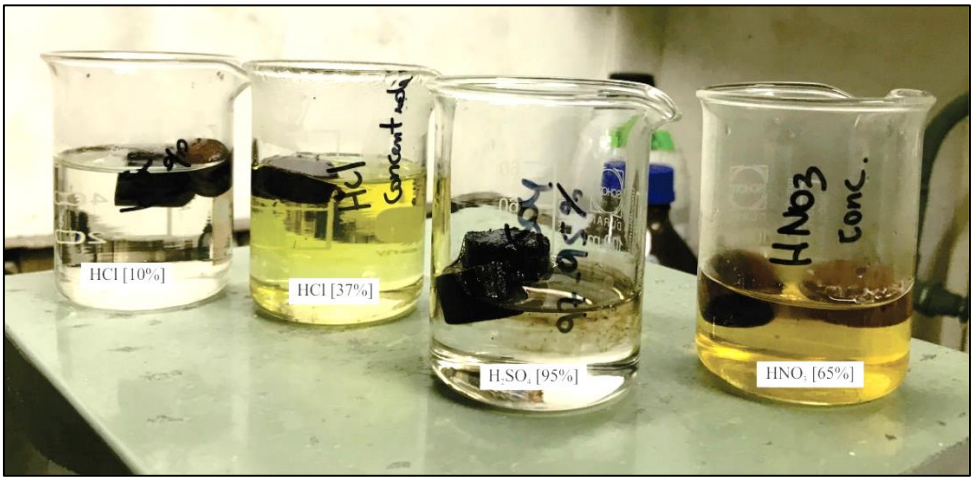



**Figura 13.** Inmersión de las muestras de madera liviana en ácido clorhídrico (HCl) al 10% y 37%, ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) al 95% y ácido nítrico ($HNO_3$) al 65%.

Después de enjuagar profusamente las muestras con agua destilada y dejarlas secar a temperatura ambiente, fueron observadas mediante una lupa estereoscópica. De todos los ácidos el $HNO_3$ presentó los mejores resultados, destacando claramente los anillos mediante una tinción diferencial.

Una alternativa no ácida, aunque cáustica, fue el testeo de un tratamiento de blanqueo de la madera mediante hidróxido de sodio (NaOH) y peróxido de hidrógeno ($H_2O_2$). Se sumergieron secciones submuestreadas de las raíces del sitio P-2 en una solución de NaOH (2,5 mol/L), a temperaturas de 20°C y 70°C por 3 y 7 horas, respectivamente (figura 14). Después de enjuagar las muestras con agua destilada, se sumergieron en $H_2O_2$ de 10 vol a 37°C y 50°C por 3 y 4 horas respectivamente. Finalmente, se volvieron a enjuagar con agua destilada y se dejaron secar al ambiente.

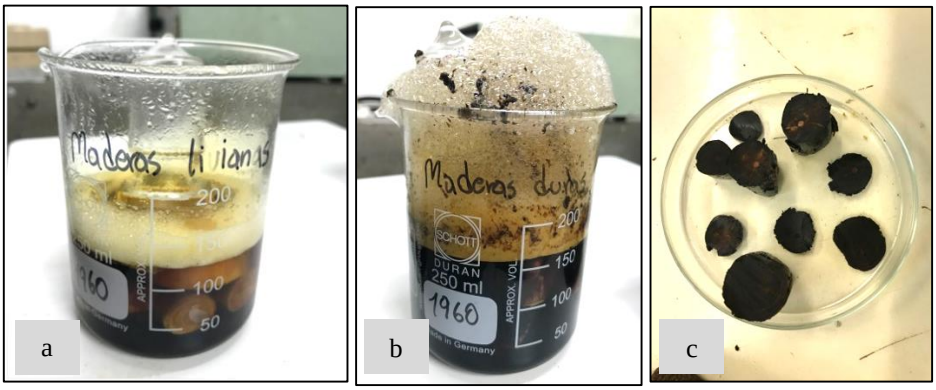



**Figura 14.** a y b) Inmersión de las raíces del sitio P-2 en una solución de hidróxido de sodio (2,5 mol/L). c) Posterior oscurecimiento de las raíces.

Los resultados de esta técnica fueron exitosos. Las muestras se blanquearon dejando claramente expuestos los anillos de crecimiento. En un intento por simplificar el procedimiento se experimentó utilizando sólo $H_2O_2$ a 44°C por 2 minutos (figura 15). Interesantemente, se obtuvieron similares resultados a los logrados con el procedimiento completo. De este modo, se optó por la metodología simplificada, mediante la cual se prepararon todas las muestras del sitio P-2. Finalmente, las muestras secas fueron fotografiadas a 8X, 10X y 12,5X en una lupa estereoscópica con cámara fotográfica integrada.

**Figura 15.** Pequeñas secciones de raíces del sitio P-2 en peróxido de hidrógeno ($H_2O_2$) al 10% y a 44°C.

### 3.4.2 Identificación, conteo y medición de los anillos de crecimiento

Después de los tratamientos aplicados en la preparación de las muestras (Sección 3.4.1), estas fueron fotografiadas mediante cámaras digitales. Dependiendo del tamaño de las

muestras, fueron digitalizadas con distintos aumentos, incluyendo 8X, 10X y 12,5X. Para la identificación, conteo y medición de los anillos de las raíces de los sitios P-1 y P-2 se utilizaron dos programas de procesamiento de imágenes, Dino-Lite e Image Pro Plus. Mediante sus herramientas se realizaron ajustes de color, brillo o saturación siempre con la finalidad de mejorar el contraste de los anillos. Las mediciones, expresadas en milímetros, se realizaron manualmente considerando las distancias entre anillos (figura 16). Como límite de cada anillo se consideró el borde exterior de la madera oscura y la disminución del tamaño de las células, que responden a la disminución del crecimiento del árbol en otoño (figua 17).

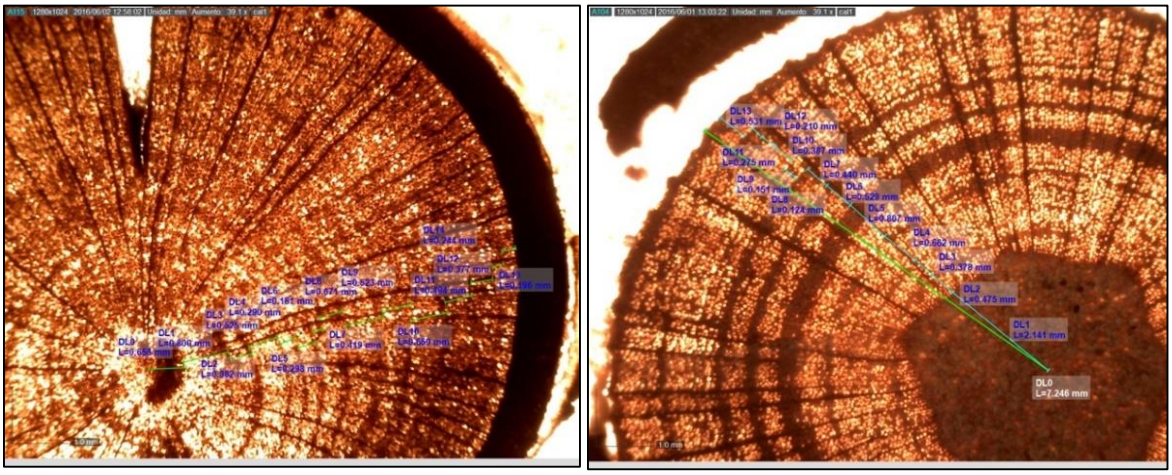


**Figura 16.** Medición de anillos de crecimiento en las muestras M3 y M14 usando programas de procesamiento de imágenes, con 10X de aumento.

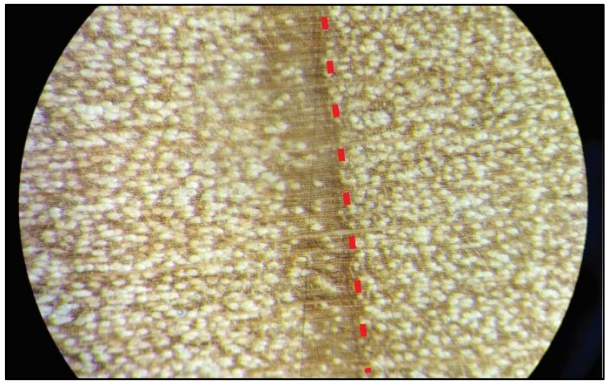


**Figura 17.** La línea entrecortada representa el límite del anillo de crecimiento a considerar en la medición. Fotografía de ejemplo que corresponde a una pitra (*Myrceugenia exsucca*), especie similar a las raíces en estudio. Aumento de 25X.

En paralelo, para el caso de las muestras que resultaron difíciles de analizar digitalmente, los anillos se verificaron mediante la lupa estereoscópica (figura 18). Finalmente, los programas de procesamiento de imágenes generaron planillas Excel conteniendo el número del anillo y su respectivo ancho.

Estos datos posteriormente alimentaron los programas dendrocronológicos utilizados en la datación cruzada, identificados más abajo.

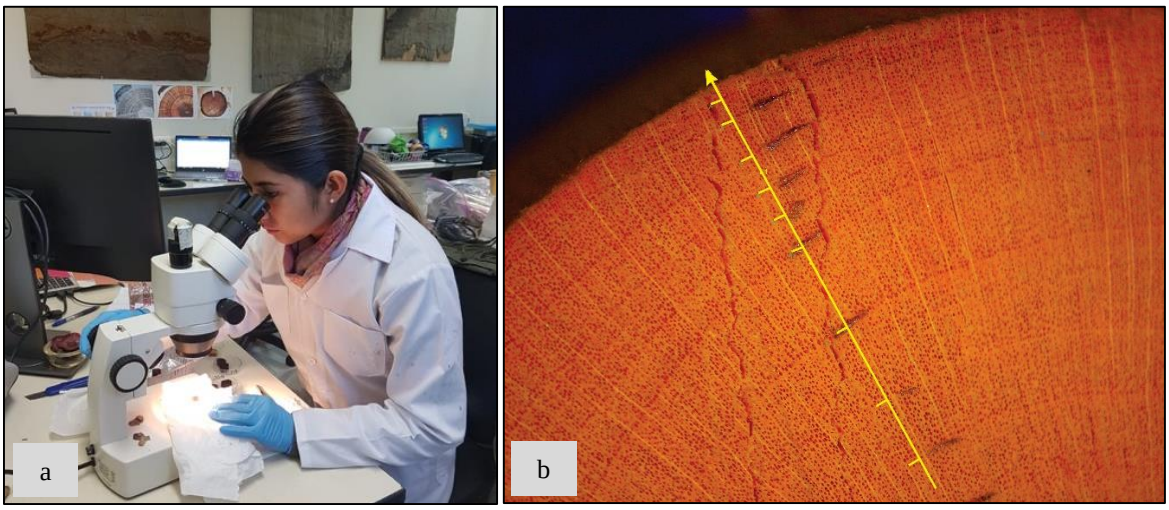



**Figura 18.** a) Verificación de los anillos en una lupa estereoscópica. b) Delimitación manual de los anillos de crecimiento (líneas con lápiz grafito) y posterior medición digital.

### 3.4.3 Datación cruzada

El principio básico de la dendrocronología es la datación cruzada (*crossdating*) o "cofecha". Esta es una técnica que garantiza que a cada anillo de un árbol individual se le asigne un año exacto de formación. Esto se logra combinando patrones de crecimiento (diferentes anchos de anillos) de un árbol con los patrones de otros árboles que crecieron en otros sitios (Speer, 2010). De esta forma, se pueden construir cronologías o series maestras (Schweingruber, 1988). Al replicar el proceso de datación cruzada con series cada vez más antiguas es posible la reconstrucción de la serie hacia el pasado (figura 19).

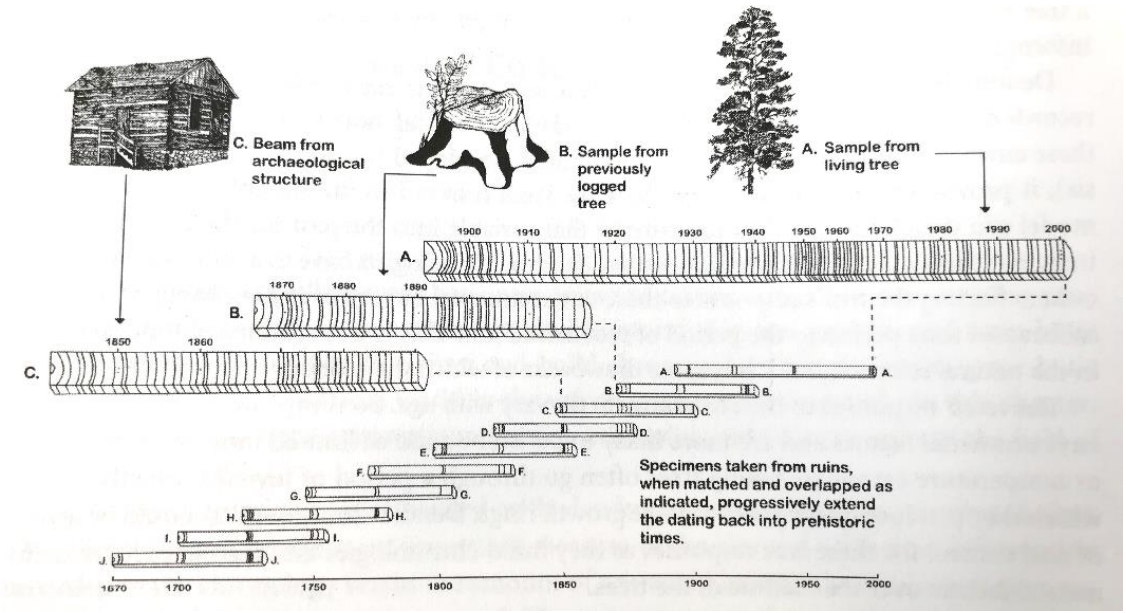



**Figura 19.** La datación cruzada (*crossdating*) es el principio básico de la dendrocronología y proporciona la resolución anual de los anillos fechados. **Fuente**: Speer (2010).

Los programas dendrocronológicos utilizados en la presente investigación para analizar las raíces de los sitios P-1 y P-2 fueron el COFECHA (Holmes, 1983) y el ARSTAN (Cook y Holmes, 1984). Como su nombre lo indica, el COFECHA permite el cofechado entre muestras y valida estadísticamente las dataciones, determinando el grado de sincronía entre las series mediante el coeficiente de correlación con un nivel de significación del 95% y 99% (Gutiérrez, 2008). Por su parte el ARSTAN, mediante estandarización, elimina desde las mediciones el efecto biológico de la edad y geometría del árbol (Cook, 1987). Así, se generan dos índices dendrocronológicos: el Índice Estándar (std), que promedia estadísticamente los grosores de anillos de cada serie, y el Índice Residual (res), que elimina la autocorrelación entre los anillos.

Para la obtención de las cronologías de las raíces de los sitios P-1 y P-2 se utilizó, por cada sitio, el siguiente procedimiento. En el programa COFECHA, los datos de las planillas Excel fueron pasados a formato decadal (figura 20a) y posteriormente cofechados (figura 20b) en ventanas temporales traslapadas entre 4 y 2 años, debido al escaso número de anillos en las raíces.

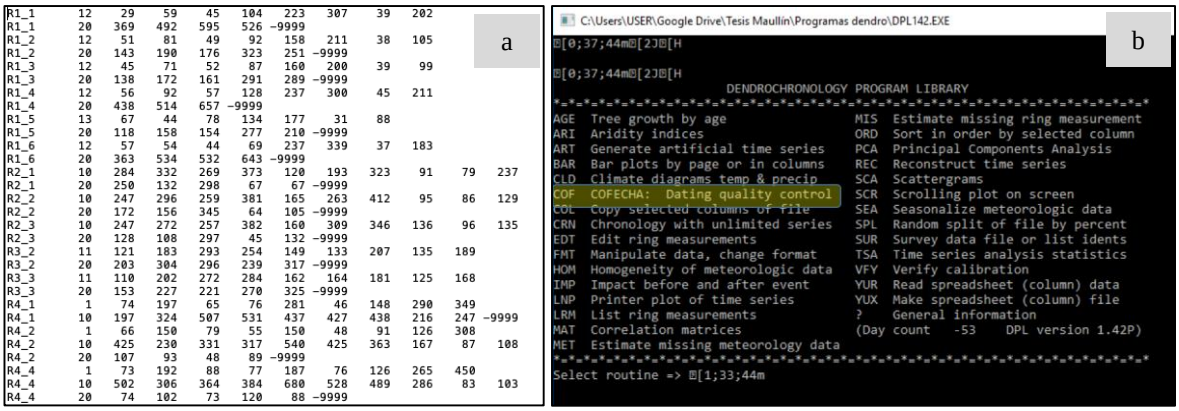



**Figura 20.** a) formato decadal de las mediciones en las raíces del sitio P-1. b) programa COFECHA se destaca la función utilizada para realizar la datación cruzada.

Este procedimiento se utilizó primero para las mediciones de una misma muestra y posteriormente entre muestras. Las mediciones o series que no sincronizaron adecuadamente se descartaron debido a que una mala sincronía disminuye la fiabilidad de la cronología (Gutiérrez, 2008). Este proceso también sirvió para identificar y corregir algunas de las mediciones, sea por presencia de “anillos falsos” o por la no visualización de anillos en las imágenes durante la medición. Este procedimiento se repitió reiterativamente hasta obtener una cronología con una intercorrelación significativa. Finalmente, con el ARSTAN se calcularon los valores estándar (std) y residuales (res) de las cronologías obtenidas para cada sitio.

### 3.4.4 Validación de la aproximación utilizada

Como se explicó anteriormente, este estudio propone fechar la muerte de árboles producto de subsidencia cosísmica mediante el análisis por radiocarbono en conjunto con el estudio de los anillos de crecimiento de sus raíces. Así, el radiocarbono genera un primer rango de tiempo, relativamente amplio, que contiene la fecha de muerte. Posteriormente, el análisis dendrocronológico de los anillos de las raíces, y su comparación con cronologías maestras de alerce, permiten constreñir el rango temporal entregado por el radiocarbono.

Por tratarse de una aproximación novel, se realizó un experimento con raíces de árboles muertos en una fecha conocida, y, de este modo, comprobar si la aproximación utilizada reconoce o no dicha fecha. Para esto, se utilizaron las series de las raíces de los árboles muertos producto de la subsidencia de 1960, recolectadas en el sitio P-2 (figura 9). Estas series fueron cofechadas con cronologías maestras de alerces del último siglo. Se consideraron los últimos 100 años debido a que este rango de tiempo es similar a los rangos de incertidumbre entregados por el radiocarbono. Al obtenerse buenos resultados es posible validar esta aproximación para aplicarla a eventos prehistóricos.

Para llevar a cabo la validación se utilizaron 4 cronologías maestras de alerce del centro sur de Chile previamente publicadas (tabla 3). Desde estas se extrajeron las series entre los años 1900 y 2000, y se correlacionaron con la cronología de las raíces de P-2 mediante el programa COFECHA.

**Tabla 3.** Cronologías maestras de alerces (*Fitzroya cupressoides*) utilizadas en la validación.

| Código Crono | Fuente |
|---|---|
| ACH | Roig (2000) |
| ACL | Roig (2000) |
| Pelada | Lara *et al.* (2008) |
| PUN | Roig (2000) |

Adicionalmente, con el objetivo de aumentar las posibilidades de obtener buenas correlaciones, se construyó una cronología compuesta (CC-1), especialmente adaptada para la validación. Mediante 148 correlaciones se seleccionaron 33 series (árboles), provenientes de las 4 cronologías de alerce (tabla 3), que presentaron las mejores correlaciones con la cronología de las raíces. De este modo, se obtuvo una quinta cronología abarcando desde el año 1900 hasta el 2000.

### 3.4.5 Obtención de una edad con un rango temporal reducido.

Finalmente, y habiendo desarrollado todos los pasos anteriores, se procedió a reducir el rango temporal entregado por el radiocarbono para el evento D, registrado en el sitio P-1.

En primer lugar, se generó una nueva cronología compuesta (CC-2), basada en la cronología CC-1 (1900-2000), pero extendida 1100 años hacia atrás en el tiempo. Para lograr esto, se extrajeron 126 series desde 8 cronologías maestras de alerce del centro sur de Chile (tabla 4), algunas de ellas publicadas y otras en vías de publicación por parte del Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile. De este modo, se logró una cronología maestra, con series correlacionadas entre ellas, desde el 800 DC hasta el 2000.

**Tabla 4.** Cronologías maestras de alerces (*Fitzroya cupressoides*) utilizadas para la obtención de un rango temporal menor para el evento D.

| Código Crono | Fuente |
|---|---|
| ACH | Roig (2000) |
| ACL | Roig (2000) |
| Pelada | Lara *et al.* (2008) |
| PUN | Roig (2000) |
| AAR | Urrutia-Jalabert *et al*. (2015) |
| Alerce R | Antonio Lara y Rocío Urrutia (No publicado) |
| Apagado | Neira y Lara (2000) |
| HUI | Lara *et al*. (en revisión) |

Desde la cronología CC-2 se extrajo el segmento temporal definido por el fechamiento del radiocarbono, es decir, entre el 1000 y el 1200 DC. Dicho segmento fue cofechado con la cronología flotante (sin anclaje a una fecha específica), obtenida desde las raíces fósiles del sitio P-1. Este procedimiento permitió comparar los patrones de crecimiento de los alerces con los patrones de las raíces fósiles, sugiriendo años en que se compartieron patrones de crecimiento similar.

# 4. RESULTADOS

## 4.1 Obtención de las muestras

De acuerdo a lo descrito en la sección 3.2, se recolectaron 22 raíces fósiles desde el sitio P-1, pertenecientes a los árboles que murieron por efecto del evento D. Del total de muestras, sólo 13 fueron finalmente procesadas dendrocronológicamente. Las restantes resultaron poseer un diámetro demasiado pequeño (<0,5 cm), como para poderlas preparar adecuadamente.

Desde el sitio P-2 se obtuvieron 32 raíces de los árboles muertos en 1960. Sin embargo, sólo se pudieron procesar 15, debido a que la madera de las restantes resultó demasiado oscura como para poder distinguir los anillos de crecimiento.

## 4.2 Datación de las raíces fósiles con radiocarbono

En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos desde el análisis de radiocarbono sobre las 2 raíces del sitio P-1. Ambas muestras dieron resultados congruentes entre ellas y con un error radiocarbónico inferior a 20 años. La raíz C1-2-Aa1 murió entre el año 1040 y el 1156 DC mientras que la raíz C1-2-Aa2 lo hizo entre el año 1034 y 1155 después de Cristo. El promedio agrupado indica que las raíces murieron entre el año 1043 y 1153 DC.

**Tabla 5.** Rangos de edad según el análisis de radiocarbono realizado a 2 raíces del sitio P-1.

| Nombre muestra | Código del laboratorio | Edad $C^{14}$ y error ($C^{14}$ años AP) | | Rango de edad (años DC) | |
|---|---|---|---|---|---|
| C1-2-Aa1 | NOSAMS 127580 | 975 | 15 | **1040** | **1156** |
| C1-2-Aa2 | NOSAMS 127581 | 980 | 20 | **1034** | **1155** |

## 4.3 Datación de las raíces de los sitios P-1 y P-2 con dendrocronología

A continuación, se describen los resultados obtenidos en cada una de las 5 etapas metodológicas de la sección 3.4. Estas etapas permitieron finalmente constreñir el rango de edad radiocarbónica y así fechar con mayor precisión la ocurrencia del primer evento de subsidencia cosísmica del segundo milenio.

### 4.3.1 Resultados de la preparación de las muestras

En primer lugar, se testearon 3 técnicas para la preparación de las muestras: i) la tradicional, ii) la esclerocronológica, y iii) la eliminación de lignina y blanqueamiento.

*i. Metodología tradicional*

Después de varios ensayos intentando aplicar esta metodología, no se obtuvieron buenos resultados. En la figura 21 se observa que después del proceso de lijado no se logran visualizar con claridad los anillos de crecimiento. Es probable que el polvo que se desprende

del lijado se introduce en los poros que conforman los anillos y de este modo, se dificulta su visualización.

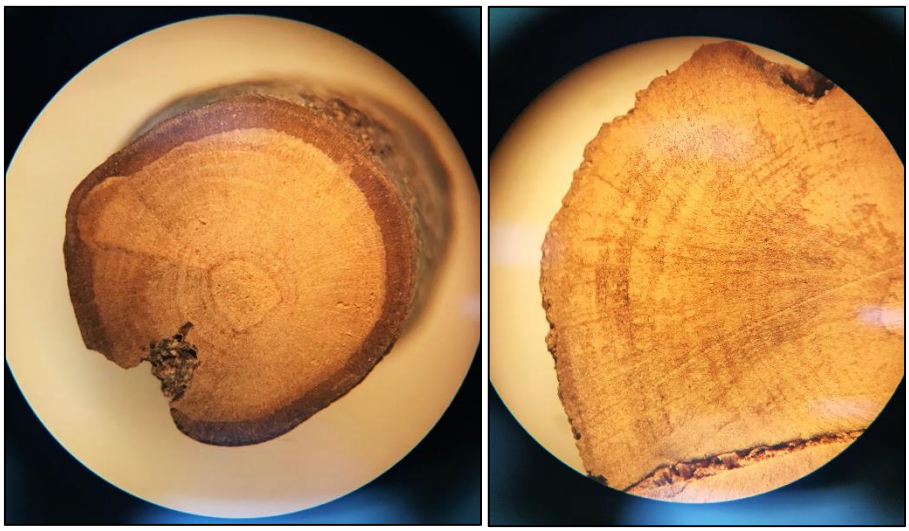


**Figura 21.** Resultados de la metodología tradicional aplicada en raíces fósiles, con 5X de aumento.

### *ii. Aplicación de técnicas esclerocronológicas*

La metodología implementada en base a las técnicas esclerocronológicas entregó mejores resultados; sin embargo, el procedimiento resultó requerir de mucho tiempo y cantidad de muestra. Esto se debe a: i) que el proceso de corte sea lento, al ser de precisión, ii) que se pierda la muestra o parte de ella durante el lijado, y iii) que la resina epóxica se introduzca entre los anillos de crecimiento, lo que podría alterar su ancho original.

A pesar de lo anterior y debido a que la resina sirvió para estabilizar las muestras fósiles, esta técnica fue aplicada a las muestras del sitio P-1. Se obtuvieron 13 cortes de precisión que sirvieron para la posterior identificación, conteo y medición de los anillos de crecimiento (figura 22). Algunas muestras perdieron la corteza o parte de la madera producto del lijado (figura 23).

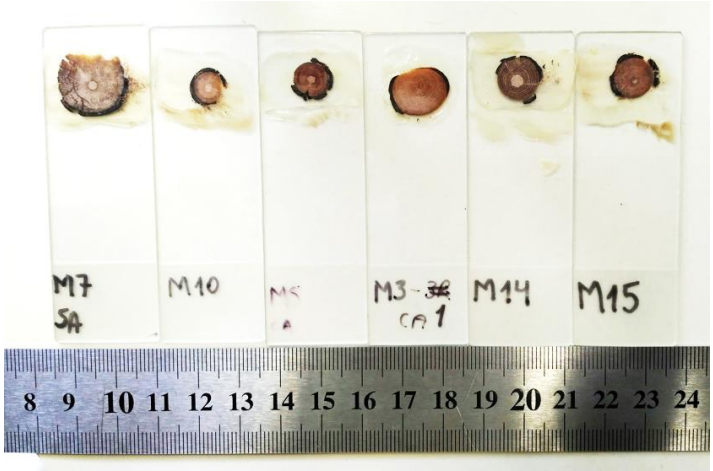



**Figura 22.** Secciones de raíces fósiles cortadas con precisión aplicando técnicas esclerocronológicas.

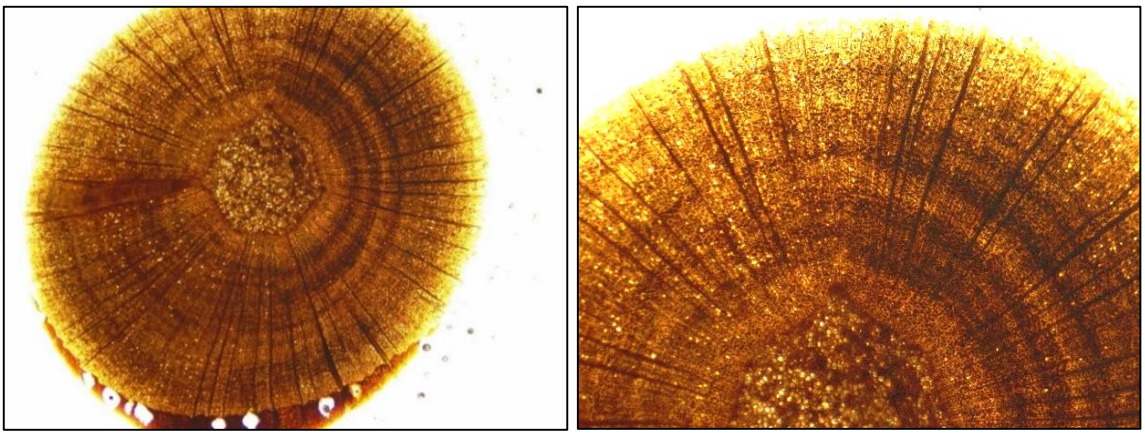


**Figura 23.** Pérdida de la corteza y probablemente del último anillo en secciones de raíces fósiles. Aumento de 8X y 16X.

### *iii. Metodología eliminación lignina y blanqueamiento*

Los resultados observados a partir de la inmersión de las raíces del sitio P-2 en tres diferentes ácidos, concentraciones y tiempos, se detallan en la tabla 6. Es importante destacar que además de los tiempos que las muestras se sumergieron en los ácidos, el secado requirió entre 8 a 12 horas. Un secado controlado y total resultó necesario para visualizar con claridad los anillos en la lupa estereoscópica, evitando la saturación con agua de los poros.

Se observaron mejores resultados con el ácido nítrico ($HNO_3$) al 25% (figura 25c) por 17 horas. Este ácido resaltó adecuadamente los anillos de crecimiento de las raíces.

**Tabla 6.** Resultados de la inmersión de raíces del sitio P-2 en 3 ácidos a diferentes concentraciones y tiempos.

| Ácido | Concentración | Tiempo | Observación |
|---|---|---|---|
| Ácido clorhídrico (HCl): | 37% | 7 min | La madera se oscureció; probablemente la reacción química fue muy violenta al estar a la mayor concentración del ácido (figura 24a). Después del secado al ambiente, no se logró observar los anillos de crecimiento en la lupa estereoscópica. |
| | 10 % | 60 min | Se tornó levemente oscura la madera; se podía visualizar la estructura y algunos anillos bajo la lupa. Sin embargo, no fue suficiente por lo que se sumergió de nuevo en el ácido por más tiempo. |
| | 10 % | 3 horas | El estado de la madera fue muy similar al tiempo anterior (1 hora). Se extendió el tiempo y se sumergió en el ácido hasta el día siguiente. |
| | 10 % | 17 horas | Se enjuagó y se dejó secar al ambiente, el resultado no varió sino que fue muy similar a la primera reacción, la madera se oscureció y no fue posible visualizar en su totalidad los anillos de crecimiento (figura 25a). |
| Ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) | 95% | 7 min | La madera se oscureció al instante y prácticamente se estaba desintegrando (figura 24b); la muestra se ablandó progresivamente. Probablemente la reacción química fue muy violenta al estar a la mayor concentración del ácido. |
| | 35% | 60 min | Se registró nuevamente un oscurecimiento de la muestra y una degradación de la misma, a pesar de disminuir la concentración del ácido. Por lo tanto, se descartó su uso. |
| Ácido nítrico ($HNO_3$) | 65% | 7 min | La madera se tornó un poco más café y se oscureció un poco (figura 24c). Probablemente la reacción química fue un poco violenta al estar a la mayor concentración. Al observar la muestra en la lupa se visualizaron algunos anillos de crecimiento. |
| | 25% | 60 min | Con una hora de inmersión la muestra se tornó levemente naranja, se dejó secar y se observó que el color de algunos anillos de crecimiento se intensificó un poco. Se volvió a sumergir la muestra por más tiempo. |
| | 25% | 3 horas | Después del secado se observó que se resaltaron algunos anillos, haciéndolos más visibles (figura 25b). Sin embargo, aún no era suficiente y se extendió el tiempo hasta el día siguiente. |
| | 25% | 17 horas | Se obtuvieron mejores resultados que los experimentos anteriores. Sin embargo, al replicar el proceso con más muestras se identificó que el ácido reaccionó solo en ciertas muestras que originalmente tenían los anillos un poco visibles, logrando resaltarlos más con un color naranja (figura 25c). |

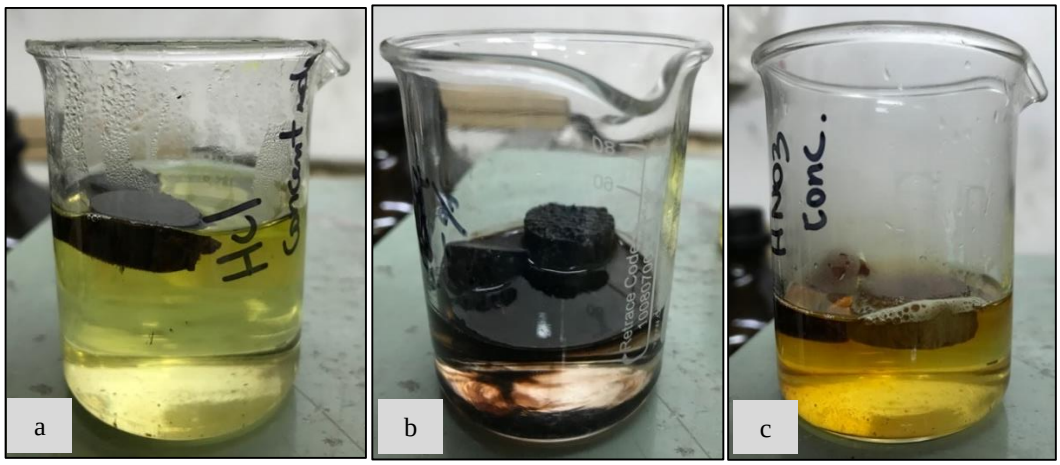



**Figura 24.** Reacción de la madera en los ácidos: a) ácido clorhídrico (HCl) al 37%, b) ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) al 95% y c) ácido nítrico ($HNO_3$) al 65%.

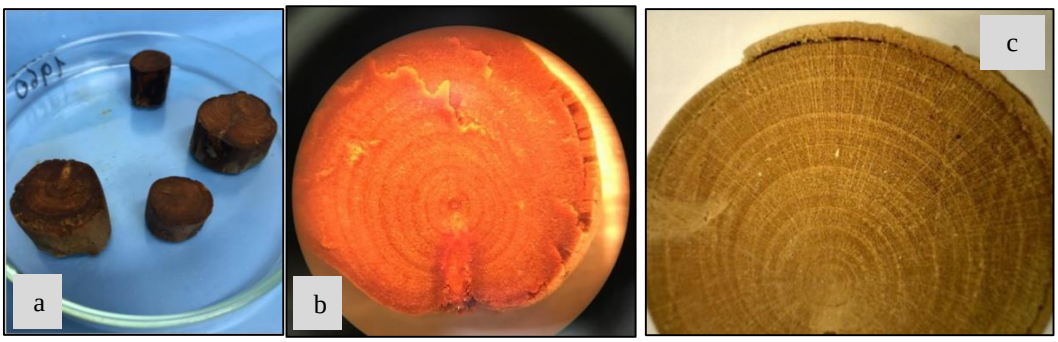



**Figura 25.** Resultados de la madera después de: a) 17 horas en ácido clorhídrico (HCl) al 10% (muestra húmeda), b) 3 horas en ácido nítrico ($HNO_3$) al 25% (muestra húmeda) y c) 17 horas en ácido nítrico ($HNO_3$) al 25% (muestra seca).

Como resultado del experimento cáustico, usando hidróxido de sodio (NaOH), se observó, además de un oscurecimiento intenso de las muestras, el ablandamiento de la madera. Esto permitió realizar cortes delgados y limpios, para posteriormente sumergirlos en peróxido de hidrógeno ($H_2O_2$). Esto resultó en un conveniente blanqueamiento de las muestras (figura 26a) que sirvió, una vez secas, para visualizar claramente los anillos de crecimiento en la mayoría de las muestras (figura 26b).

**Figura 26.** a) Muestras secas después del blanqueamiento con ($H_2O_2$). b) Visualización de los anillos de crecimiento en una muestra del sitio P-2 con 2X de aumento.

Finalmente, utilizando sólo $H_2O_2$ se logró un blanqueamiento que resaltó adecuadamente los anillos de crecimiento. La claridad fue tan evidente que no fue necesario realizar lijados posteriores. De esta forma, las 15 muestras del sitio P-2 fueron preparadas para el análisis dendrocronológico mediante esta técnica.

### 4.3.2 Identificación, conteo y medición de los anillos de crecimiento

Mediante los procedimientos descritos previamente en la sección 3.4.2 se lograron buenos resultados en la mayoría de las muestras. A continuación, se describen los resultados obtenidos por cada sitio de muestreo.

*i. Sitio P-1*

De las 13 raíces del sitio P-1 que fueron preparadas, finalmente se pudieron medir sólo 7 (figura 27). De estas, se lograron obtener 17 series considerando las réplicas (tabla 7). Las restantes raíces no pudieron ser medidas debido a la pérdida de secciones de madera o corteza durante su preparación.

**Tabla 7.** Primera medición de anchos de anillos (mm) en raíces fósiles del sitio P-1.

| Series | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° anillos | Muestra M3 | | | | Muestra M5 | | Muestra M7 | | Muestra M10 | | Muestra M14 | | | | M15 | Muestra M16 | |
| | M3_A | M3_B | M3_C | M3_D | M5_A | M5_B | M7_A | M7_B | M10_A | M10_B | M14_A | M14_B | M14_C | M14_D | M15_A | M16_A | M16_B |
| 1 | | | | | | | 0,993 | 0,839 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | 0,508 | 0,510 | | | | | | | | | |
| 3 | 0,619 | 0,710 | 0,777 | 0,682 | | | 0,463 | 0,578 | | | | | | | | | |
| 4 | 0,506 | 0,288 | 0,360 | 0,197 | | | 0,327 | 0,564 | | | | | | | | | |
| 5 | 0,402 | 0,301 | 0,496 | 0,181 | | | 0,339 | 0,481 | | | | | | | | | |
| 6 | 0,511 | 0,205 | 0,277 | 0,548 | 0,312 | 0,410 | 0,282 | 0,330 | | | | | | | | | |
| 7 | 0,277 | 0,211 | 0,266 | 0,602 | 0,156 | 0,234 | 0,542 | 0,392 | | | 0,357 | 0,331 | 0,286 | 0,364 | 0,639 | 0,526 | 0,535 |
| 8 | 0,197 | 0,461 | 0,183 | 0,572 | 0,220 | 0,234 | 0,308 | 0,425 | | | 0,350 | 0,244 | 0,292 | 0,359 | 0,371 | 0,434 | 0,418 |
| 9 | 0,162 | 0,180 | 0,436 | 0,395 | 0,188 | 0,219 | 0,197 | 0,418 | | | 0,259 | 0,227 | 0,202 | 0,381 | 0,383 | 0,231 | 0,385 |
| 10 | 0,202 | 0,520 | 0,579 | 0,330 | 0,176 | 0,176 | 0,288 | 0,545 | 0,404 | 0,443 | 0,195 | 0,206 | 0,207 | 0,394 | 0,383 | 0,424 | 0,548 |
| 11 | 0,359 | 0,570 | 0,432 | 0,527 | 0,360 | 0,278 | 0,306 | 0,288 | 0,228 | 0,222 | 0,584 | 0,524 | 0,536 | 0,425 | 0,462 | 0,646 | 0,463 |
| 12 | 0,295 | 0,665 | 0,716 | 0,529 | 0,488 | 0,327 | 0,203 | 0,320 | 0,166 | 0,398 | 0,428 | 0,351 | 0,381 | 0,290 | 0,442 | 0,314 | 0,535 |
| 13 | 0,153 | 0,416 | 0,570 | 0,258 | 0,564 | 0,459 | 0,203 | 0,279 | 0,269 | 0,490 | 0,402 | 0,351 | 0,248 | 0,305 | 0,633 | 1,227 | 0,581 |
| 14 | 0,133 | 0,396 | 0,300 | 0,339 | 0,296 | 0,635 | 0,192 | 0,160 | 0,550 | 0,308 | 0,169 | 0,593 | 0,462 | 0,342 | 0,298 | 0,277 | 0,568 |
| 15 | 0,130 | 0,659 | 0,265 | 0,589 | 0,428 | 0,127 | 0,171 | 0,160 | 0,437 | 0,227 | 0,629 | 0,160 | 0,450 | 0,165 | 0,306 | | 0,503 |
| 16 | | 0,365 | | | 0,120 | 0,127 | | 0,168 | 0,488 | 0,286 | 0,162 | 0,356 | | 0,349 | 0,489 | | |
| 17 | | 0,198 | | | | 0,166 | | 0,176 | 0,290 | 0,388 | 0,402 | | | | 0,427 | | |

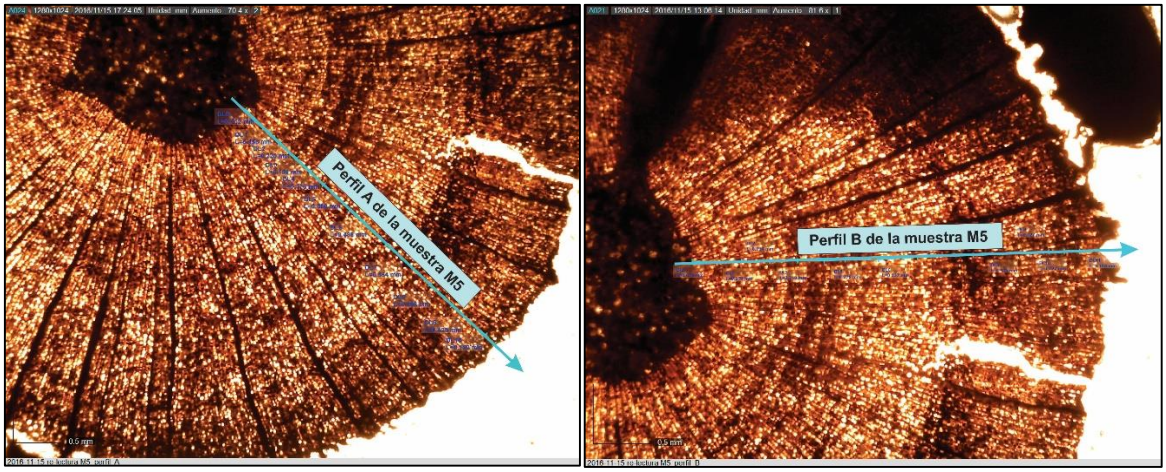



**Figura 27.** Medición de anchos de anillos en dos perfiles de la muestra M5 usando el programa Dinolite, con un aumento de 10X.

### *ii. Sitio P-2*

De las 15 raíces preparadas, las mediciones pudieron realizarse sólo en 13 de ellas (figura 28), generándose un total de 30 series (tabla 8). No fue posible visualizar claramente los anillos en las 2 muestras restantes.

**Tabla 8.** Primera medición de anchos de anillos (mm) en raíces del sitio P-2.

| | Series | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° Anillos | Muestra R1 | | | | | | Muestra R2 | | | Muestra R3 | | Muestra R4 | | | Muestra R5 | | Muestra R8 | | | | Muestra R9 | | | Muestra R10 | | Muestra R11 | | Muestra R13 | | |
| | R1_1 | R1_2 | R1_3 | R1_4 | R1_5 | R1_6 | R2_1 | R2_2 | R2_3 | R3_2 | R3_3 | R4_1 | R4_2 | R4_4 | R5_1 | R5_2 | R8_1 | R8_2 | R8_3 | R8_4 | R9_1 | R9_2 | R9_3 | R10_1 | R10_2 | R11_4 | R11_5 | R13_1 | R13_2 | R13_3 |
| 1 | | | | | | | | | | | | 0,074 | 0,066 | 0,073 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | 0,197 | 0,150 | 0,192 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | 0,065 | 0,079 | 0,088 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | 0,076 | 0,055 | 0,077 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | 0,281 | 0,150 | 0,187 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | 0,121 | 0,110 | 0,046 | 0,048 | 0,076 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | 0,183 | 0,202 | 0,148 | 0,091 | 0,126 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | 0,293 | 0,272 | 0,290 | 0,126 | 0,265 | | | 0,118 | 0,050 | 0,106 | 0,114 | | | | | | 0,080 | 0,099 | | | |
| 9 | | | | | | | 0,284 | 0,247 | 0,247 | 0,254 | 0,284 | 0,349 | 0,308 | 0,450 | | | 0,081 | 0,091 | 0,131 | 0,127 | | | | | | 0,119 | 0,102 | | | |
| 10 | | | | | | | 0,332 | 0,296 | 0,272 | 0,149 | 0,162 | 0,197 | 0,425 | 0,502 | | | 0,063 | 0,214 | 0,165 | 0,154 | | | | | | 0,112 | 0,100 | | | |
| 11 | | | | | | | 0,269 | 0,259 | 0,257 | 0,133 | 0,164 | 0,324 | 0,230 | 0,306 | | | 0,015 | 0,063 | 0,066 | 0,065 | | | | | | 0,107 | 0,099 | | | |
| 12 | 0,029 | 0,051 | 0,045 | 0,056 | | 0,057 | 0,373 | 0,381 | 0,382 | 0,207 | 0,181 | 0,507 | 0,331 | 0,364 | | | 0,060 | 0,135 | 0,184 | 0,188 | | | | 0,097 | 0,119 | 0,133 | 0,127 | 0,248 | 0,224 | 0,241 |
| 13 | 0,059 | 0,081 | 0,071 | 0,092 | 0,067 | 0,054 | 0,120 | 0,165 | 0,160 | 0,135 | 0,125 | 0,531 | 0,317 | 0,384 | | | 0,126 | 0,238 | 0,287 | 0,218 | | | | 0,102 | 0,089 | 0,365 | 0,260 | 0,763 | 0,546 | 0,520 |
| 14 | 0,045 | 0,049 | 0,052 | 0,057 | 0,044 | 0,044 | 0,193 | 0,263 | 0,309 | 0,189 | 0,168 | 0,437 | 0,540 | 0,680 | | | 0,416 | 0,312 | 0,406 | 0,364 | | | | 0,131 | 0,180 | 0,542 | 0,508 | 0,491 | 0,833 | 0,826 |
| 15 | 0,104 | 0,092 | 0,087 | 0,128 | 0,078 | 0,069 | 0,323 | 0,412 | 0,346 | 0,203 | 0,153 | 0,427 | 0,425 | 0,528 | 0,097 | 0,052 | 0,434 | 0,283 | 0,369 | 0,256 | | | | 0,155 | 0,200 | 0,409 | 0,347 | 0,624 | 0,359 | 0,531 |
| 16 | 0,223 | 0,158 | 0,160 | 0,237 | 0,134 | 0,237 | 0,091 | 0,095 | 0,136 | 0,304 | 0,227 | 0,438 | 0,363 | 0,489 | 0,104 | 0,075 | 0,389 | 0,393 | 0,374 | 0,296 | 0,336 | 0,574 | | 0,067 | 0,086 | 0,350 | 0,338 | 0,415 | 0,220 | 0,722 |
| 17 | 0,307 | 0,211 | 0,200 | 0,300 | 0,177 | 0,339 | 0,079 | 0,086 | 0,096 | 0,296 | 0,221 | 0,216 | 0,167 | 0,286 | 0,137 | 0,110 | 0,257 | 0,476 | 0,316 | 0,185 | 0,296 | 0,148 | 0,312 | 0,207 | 0,242 | 0,265 | 0,197 | 0,435 | 0,169 | 0,738 |
| 18 | 0,039 | 0,038 | 0,039 | 0,045 | 0,031 | 0,037 | 0,237 | 0,129 | 0,135 | 0,239 | 0,270 | 0,247 | 0,087 | 0,083 | 0,061 | 0,051 | 0,316 | 0,521 | 0,697 | 0,274 | 0,108 | 0,112 | 0,232 | 0,104 | 0,108 | 0,073 | 0,039 | 0,512 | 0,174 | 0,808 |
| 19 | 0,202 | 0,105 | 0,099 | 0,211 | 0,088 | 0,183 | 0,250 | 0,172 | 0,128 | 0,317 | 0,325 | | 0,108 | 0,103 | 0,193 | 0,122 | 0,413 | 0,561 | 1,172 | 0,560 | 0,182 | 0,220 | 0,226 | 0,130 | 0,154 | 0,051 | 0,071 | 0,463 | 0,085 | 0,130 |
| 20 | 0,369 | 0,143 | 0,138 | 0,438 | 0,118 | 0,363 | 0,132 | 0,156 | 0,108 | 0,406 | 0,297 | | 0,107 | 0,074 | 0,207 | 0,201 | 0,458 | | | 0,879 | 0,235 | 0,227 | 0,170 | 0,181 | 0,229 | 0,074 | 0,033 | 0,342 | 0,050 | 0,184 |
| 21 | 0,492 | 0,190 | 0,172 | 0,514 | 0,158 | 0,534 | 0,298 | 0,345 | 0,297 | 0,102 | 0,151 | | 0,093 | 0,102 | 0,227 | 0,106 | | | | 1,212 | 0,175 | 0,231 | 0,129 | 0,170 | 0,212 | 0,048 | 0,087 | 0,137 | 0,068 | 0,110 |
| 22 | 0,595 | 0,176 | 0,161 | 0,657 | 0,154 | 0,532 | 0,067 | 0,064 | 0,045 | 0,176 | 0,098 | | 0,048 | 0,073 | 0,461 | 0,342 | | | | 1,122 | 0,073 | 0,254 | 0,056 | 0,162 | 0,221 | 0,043 | 0,091 | 0,047 | | 0,138 |
| 23 | 0,526 | 0,323 | 0,291 | | 0,277 | 0,643 | 0,067 | 0,105 | 0,132 | 0,267 | 0,148 | | 0,089 | 0,120 | | 0,136 | | | | 0,531 | | | 0,161 | 0,055 | 0,045 | | 0,141 | 0,203 | | |
| 24 | | 0,251 | 0,289 | | 0,210 | | | 0,161 | 0,161 | 0,165 | 0,160 | | | 0,088 | | 0,092 | | | | 0,530 | | | 0,266 | 0,082 | 0,110 | | 0,068 | 0,294 | | |

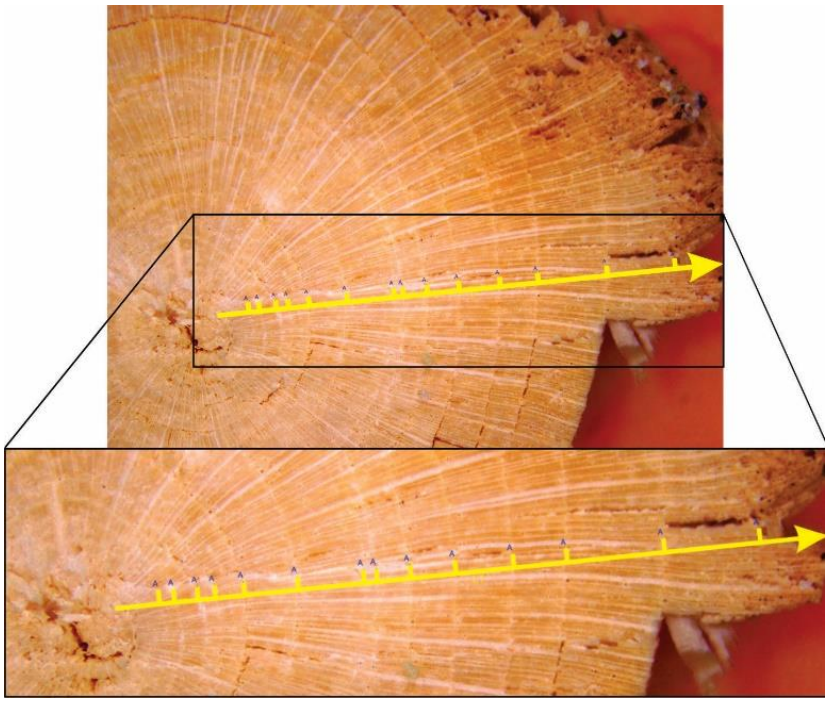


**Figura 28.** Medición de anchos de anillos en la muestra R1 con el programa IPP.

### 4.3.3 Datación cruzada o cofechado

La datación cruzada demostró que algunas de las mediciones iniciales (tablas 7 y 8), tanto del sitio P-1 y P-2, no cofechaban adecuadamente entre ellas. Una vez identificadas, estas series fueron medidas nuevamente y corregidas de acuerdo a las sugerencias del programa COFECHA.

### *i. Datación cruzada muestras del sitio P-1*

De las 17 series previamente obtenidas para el sitio P-1, mediante el programa COFECHA se seleccionaron 11 para construir la cronología final de las raíces fósiles, abarcando un rango temporal flotante de 16 años (tabla 9). La intercorrelación de la cronología resultó buena (0,602), con un valor que en dendrocronología es relevante. Esto significa que las raíces son coetáneas entre ellas y conservan un patrón de crecimiento similar. En la figura 29 se muestran los valores residuales de los anchos de anillos, calculados por el programa ARSTAN, para esta cronología final.

**Tabla 9.** Ancho de anillos de crecimiento (mm) de la cronología de raíces del sitio P-1 con un total de 16 años y una intercorrelación de 0,602.

| Series | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° anillos | M3 | Muestra M5 | | Muestra M7 | | M10 | Muestra M14 | | M15 | Muestra M16 | |
| | M3_D | M5_A | M5_B | M7_A | M7_B | M10_B | M14_B | M14_C | M15_A | M16_A | M16_B |
| 1 | | | | 0,508 | 0,510 | | | | | | |
| 2 | | | | 0,463 | 0,578 | | | | | | |
| 3 | | | | 0,327 | 0,564 | | | | | | |
| 4 | | | | 0,339 | 0,481 | | | | | | |
| 5 | 0,197 | 0,156 | 0,234 | 0,282 | 0,330 | | | | | | |
| 6 | 0,181 | 0,220 | 0,234 | 0,542 | 0,392 | | 0,244 | 0,292 | | | |
| 7 | 0,548 | 0,188 | 0,219 | 0,308 | 0,425 | | 0,227 | 0,202 | 0,371 | 0,434 | 0,418 |
| 8 | 0,602 | 0,176 | 0,176 | 0,197 | 0,418 | | 0,206 | 0,207 | 0,383 | 0,231 | 0,385 |
| 9 | 0,572 | 0,360 | 0,278 | 0,288 | 0,545 | | 0,524 | 0,536 | 0,383 | 0,424 | 0,548 |
| 10 | 0,395 | 0,488 | 0,327 | 0,306 | 0,288 | 0,222 | 0,351 | 0,381 | 0,462 | 0,646 | 0,463 |
| 11 | 0,330 | 0,564 | 0,459 | 0,203 | 0,320 | 0,398 | 0,351 | 0,248 | 0,442 | 0,314 | 0,535 |
| 12 | 0,527 | 0,296 | 0,635 | 0,203 | 0,279 | 0,490 | 0,593 | 0,462 | 0,633 | 1,227 | 0,581 |
| 13 | 0,529 | 0,428 | 0,127 | 0,192 | 0,160 | 0,308 | 0,160 | 0,450 | 0,298 | 0,277 | 0,568 |
| 14 | 0,258 | 0,120 | 0,127 | 0,171 | 0,160 | 0,227 | 0,356 | | 0,306 | | 0,503 |
| 15 | 0,339 | | 0,166 | | 0,168 | 0,286 | | | 0,489 | | |
| 16 | 0,589 | | | | 0,176 | 0,388 | | | 0,427 | | |

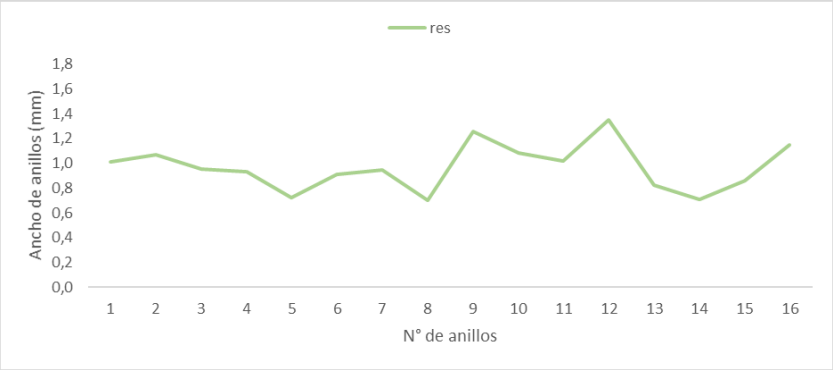



**Figura 29.** Valores residuales de la cronología de raíces fósiles del sitio P-1, con un total de 16 años.

### *ii. Datación cruzada para muestras del sitio P-2*

Como un primer paso en la validación de la aproximación metodológica utilizada, se construyó una cronología de las raíces de los árboles muertos en 1960 en el sitio P-2.

De las 30 series previamente obtenidas para el sitio P-2, el programa COFECHA seleccionó 28 para construir la cronología final de las raíces de 1960, abarcando un rango temporal de 24 años (tabla 10). La intercorrelación de la cronología resultó muy buena (0,728), con un valor dendrocronológicamente relevante. Esto significa que las raíces muertas en 1960 son coetáneas entre ellas y conservan un patrón de crecimiento similar. En la figura 30 se muestran los valores residuales de los anchos de anillos, calculados por el programa ARSTAN, para esta cronología final.

**Tabla 10.** Ancho de anillos de crecimiento (mm) de la cronología de raíces del sitio P-2 con 24 años en total y una intercorrelación de 0,728.

| | Series | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° Anillos | Muestra R1 | | | | | | Muestra R2 | | | Muestra R3 | | Muestra R4 | | | Muestra R5 | | Muestra R8 | | | Muestra R9 | | Muestra R10 | | Muestra R11 | | Muestra R13 | | |
| | R1_1 | R1_2 | R1_3 | R1_4 | R1_5 | R1_6 | R2_1 | R2_2 | R2_3 | R3_2 | R3_3 | R4_1 | R4_2 | R4_4 | R5_1 | R5_2 | R8_2 | R8_3 | R8_4 | R9_1 | R9_2 | R10_1 | R10_2 | R11_4 | R11_5 | R13_1 | R13_2 | R13_3 |
| 1 | | | | | | | | | | | | 0,074 | 0,066 | 0,073 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | 0,197 | 0,150 | 0,192 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | 0,065 | 0,079 | 0,088 | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | 0,076 | 0,055 | 0,077 | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | 0,281 | 0,150 | 0,187 | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | 0,046 | 0,048 | 0,076 | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | 0,148 | 0,091 | 0,126 | | | | | | | | 0,097 | 0,119 | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | 0,290 | 0,126 | 0,265 | | | | | | | | 0,102 | 0,089 | 0,080 | 0,099 | 0,248 | 0,224 | 0,241 |
| 9 | | | | | | | | | | | | 0,349 | 0,308 | 0,450 | | | | | | | | 0,131 | 0,180 | 0,119 | 0,102 | 0,763 | 0,546 | 0,520 |
| 10 | | | | | | | 0,284 | 0,247 | 0,247 | | | 0,197 | 0,425 | 0,502 | | | | | | | | 0,155 | 0,200 | 0,112 | 0,100 | 0,491 | 0,833 | 0,826 |
| 11 | | | | | | | 0,332 | 0,296 | 0,272 | 0,121 | 0,110 | 0,324 | 0,230 | 0,306 | | | | | | | | 0,067 | 0,086 | 0,107 | 0,099 | 0,624 | 0,359 | 0,531 |
| 12 | 0,029 | 0,051 | 0,045 | 0,056 | | 0,057 | 0,269 | 0,259 | 0,257 | 0,183 | 0,202 | 0,507 | 0,331 | 0,364 | | | | | | | | 0,207 | 0,242 | 0,133 | 0,127 | 0,415 | 0,220 | 0,722 |
| 13 | 0,059 | 0,081 | 0,071 | 0,092 | 0,067 | 0,054 | 0,373 | 0,381 | 0,382 | 0,293 | 0,272 | 0,531 | 0,317 | 0,384 | | | | | | | | 0,104 | 0,108 | 0,365 | 0,260 | 0,435 | 0,169 | 0,738 |
| 14 | 0,045 | 0,049 | 0,052 | 0,057 | 0,044 | 0,044 | 0,120 | 0,165 | 0,160 | 0,254 | 0,284 | 0,437 | 0,540 | 0,680 | | | | | | | | 0,130 | 0,154 | 0,542 | 0,508 | 0,512 | 0,174 | 0,808 |
| 15 | 0,104 | 0,092 | 0,087 | 0,128 | 0,078 | 0,069 | 0,193 | 0,263 | 0,309 | 0,149 | 0,162 | 0,427 | 0,425 | 0,528 | 0,097 | 0,052 | 0,050 | 0,106 | 0,114 | | | 0,181 | 0,229 | 0,409 | 0,347 | 0,463 | 0,085 | 0,130 |
| 16 | 0,223 | 0,158 | 0,160 | 0,237 | 0,134 | 0,237 | 0,323 | 0,412 | 0,346 | 0,133 | 0,164 | 0,438 | 0,363 | 0,489 | 0,104 | 0,075 | 0,091 | 0,131 | 0,127 | 0,336 | 0,574 | 0,170 | 0,212 | 0,350 | 0,338 | 0,342 | 0,050 | 0,184 |
| 17 | 0,307 | 0,211 | 0,200 | 0,300 | 0,177 | 0,339 | 0,091 | 0,095 | 0,136 | 0,207 | 0,181 | 0,216 | 0,167 | 0,286 | 0,137 | 0,110 | 0,214 | 0,165 | 0,154 | 0,296 | 0,148 | 0,162 | 0,221 | 0,265 | 0,197 | 0,137 | 0,068 | 0,110 |
| 18 | 0,039 | 0,038 | 0,039 | 0,045 | 0,031 | 0,037 | 0,079 | 0,086 | 0,096 | 0,135 | 0,125 | 0,247 | 0,087 | 0,083 | 0,061 | 0,051 | 0,063 | 0,066 | 0,065 | 0,108 | 0,112 | 0,055 | 0,045 | 0,073 | 0,039 | 0,047 | | |
| 19 | 0,202 | 0,105 | 0,099 | 0,211 | 0,088 | 0,183 | 0,237 | 0,129 | 0,135 | 0,189 | 0,168 | | 0,108 | 0,103 | 0,193 | 0,122 | 0,135 | 0,184 | 0,188 | 0,182 | 0,220 | 0,082 | 0,110 | 0,051 | 0,071 | 0,203 | | |
| 20 | 0,369 | 0,143 | 0,138 | 0,438 | 0,118 | 0,363 | 0,250 | 0,172 | 0,128 | 0,203 | 0,153 | | 0,107 | 0,074 | 0,207 | 0,201 | 0,238 | 0,287 | 0,218 | 0,235 | 0,227 | | | 0,074 | 0,033 | 0,294 | | |
| 21 | 0,492 | 0,190 | 0,172 | 0,514 | 0,158 | 0,534 | 0,132 | 0,156 | 0,108 | 0,304 | 0,227 | | 0,093 | 0,102 | 0,227 | 0,106 | 0,312 | 0,406 | 0,364 | 0,175 | 0,231 | | | 0,048 | 0,087 | | | |
| 22 | 0,595 | 0,176 | 0,161 | 0,657 | 0,154 | 0,532 | 0,298 | 0,345 | 0,297 | 0,296 | 0,221 | | 0,048 | 0,073 | 0,461 | 0,342 | 0,283 | 0,369 | 0,256 | 0,073 | 0,254 | | | 0,043 | 0,091 | | | |
| 23 | 0,526 | 0,323 | 0,291 | | 0,277 | 0,643 | 0,067 | 0,064 | 0,045 | 0,239 | 0,270 | | 0,089 | 0,120 | | 0,136 | 0,393 | 0,374 | 0,296 | | | | | | 0,141 | | | |
| 24 | | 0,251 | 0,289 | | 0,210 | | 0,067 | 0,105 | 0,132 | 0,317 | 0,325 | | | 0,088 | | 0,092 | 0,476 | 0,316 | 0,185 | | | | | | 0,068 | | | |

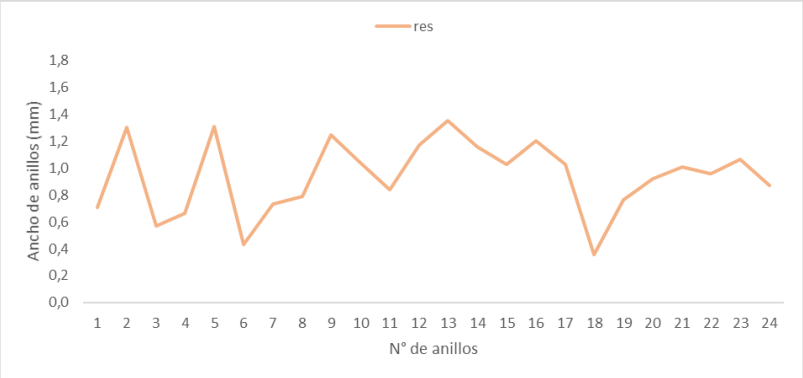



**Figura 30.** Valores residuales de la cronología de raíces del sitio P-2, con un total de 24 años.

### 4.3.4 Resultados de la validación de la metodología

Considerando la buena correlación entre las series de la cronología de las raíces de 1960 (0,728) y las indicaciones del programa COFECHA, se logró verificar la fecha exacta en dos de las raíces estudiadas, coincidiendo en que el último anillo se formó en 1959. Estas dos series fueron el anclaje temporal de toda la cronología (tabla 11). De este modo, se comprueba que el crecimiento de esas raíces se detuvo por efecto de la subsidencia costera asociada al terremoto del 22 de mayo de 1960. Por haber ocurrido este fenómeno durante el otoño de ese año, el último anillo formado corresponde al crecimiento vegetativo de la primavera-verano de 1959.

**Tabla 11.** Cronología datada de las raíces del sitio P-2 con un total de 24 años entre el 1936 y el 1959.

| Series | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Años calendario | Muestra R1 | | | | | | Muestra R2 | | | Muestra R3 | | Muestra R4 | | | Muestra R5 | | Muestra R8 | | | Muestra R9 | | Muestra R10 | | Muestra R11 | | Muestra R13 | | |
| | R1_1 | R1_2 | R1_3 | R1_4 | R1_5 | R1_6 | R2_1 | R2_2 | R2_3 | R3_2 | R3_3 | R4_1 | R4_2 | R4_4 | R5_1 | R5_2 | R8_2 | R8_3 | R8_4 | R9_1 | R9_2 | R10_1 | R10_2 | R11_4 | R11_5 | R13_1 | R13_2 | R13_3 |
| 1936 | | | | | | | | | | | | 0,074 | 0,066 | 0,073 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1937 | | | | | | | | | | | | 0,197 | 0,150 | 0,192 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1938 | | | | | | | | | | | | 0,065 | 0,079 | 0,088 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1939 | | | | | | | | | | | | 0,076 | 0,055 | 0,077 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1940 | | | | | | | | | | | | 0,281 | 0,150 | 0,187 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1941 | | | | | | | | | | | | 0,046 | 0,048 | 0,076 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1942 | | | | | | | | | | | | 0,148 | 0,091 | 0,126 | | | | | | | | 0,097 | 0,119 | | | | | |
| 1943 | | | | | | | | | | | | 0,290 | 0,126 | 0,265 | | | | | | | | 0,102 | 0,089 | 0,080 | 0,099 | 0,248 | 0,224 | 0,241 |
| 1944 | | | | | | | | | | | | 0,349 | 0,308 | 0,450 | | | | | | | | 0,131 | 0,180 | 0,119 | 0,102 | 0,763 | 0,546 | 0,520 |
| 1945 | | | | | | | 0,284 | 0,247 | 0,247 | | | 0,197 | 0,425 | 0,502 | | | | | | | | 0,155 | 0,200 | 0,112 | 0,100 | 0,491 | 0,833 | 0,826 |
| 1946 | | | | | | | 0,332 | 0,296 | 0,272 | 0,121 | 0,110 | 0,324 | 0,230 | 0,306 | | | | | | | | 0,067 | 0,086 | 0,107 | 0,099 | 0,624 | 0,359 | 0,531 |
| 1947 | 0,029 | 0,051 | 0,045 | 0,056 | | 0,057 | 0,269 | 0,259 | 0,257 | 0,183 | 0,202 | 0,507 | 0,331 | 0,364 | | | | | | | | 0,207 | 0,242 | 0,133 | 0,127 | 0,415 | 0,220 | 0,722 |
| 1948 | 0,059 | 0,081 | 0,071 | 0,092 | 0,067 | 0,054 | 0,373 | 0,381 | 0,382 | 0,293 | 0,272 | 0,531 | 0,317 | 0,384 | | | | | | | | 0,104 | 0,108 | 0,365 | 0,260 | 0,435 | 0,169 | 0,738 |
| 1949 | 0,045 | 0,049 | 0,052 | 0,057 | 0,044 | 0,044 | 0,120 | 0,165 | 0,160 | 0,254 | 0,284 | 0,437 | 0,540 | 0,680 | | | | | | | | 0,130 | 0,154 | 0,542 | 0,508 | 0,512 | 0,174 | 0,808 |
| 1950 | 0,104 | 0,092 | 0,087 | 0,128 | 0,078 | 0,069 | 0,193 | 0,263 | 0,309 | 0,149 | 0,162 | 0,427 | 0,425 | 0,528 | 0,097 | 0,052 | 0,050 | 0,106 | 0,114 | | | 0,181 | 0,229 | 0,409 | 0,347 | 0,463 | 0,085 | 0,130 |
| 1951 | 0,223 | 0,158 | 0,160 | 0,237 | 0,134 | 0,237 | 0,323 | 0,412 | 0,346 | 0,133 | 0,164 | 0,438 | 0,363 | 0,489 | 0,104 | 0,075 | 0,091 | 0,131 | 0,127 | 0,336 | 0,574 | 0,170 | 0,212 | 0,350 | 0,338 | 0,342 | 0,050 | 0,184 |
| 1952 | 0,307 | 0,211 | 0,200 | 0,300 | 0,177 | 0,339 | 0,091 | 0,095 | 0,136 | 0,207 | 0,181 | 0,216 | 0,167 | 0,286 | 0,137 | 0,110 | 0,214 | 0,165 | 0,154 | 0,296 | 0,148 | 0,162 | 0,221 | 0,265 | 0,197 | 0,137 | 0,068 | 0,110 |
| 1953 | 0,039 | 0,038 | 0,039 | 0,045 | 0,031 | 0,037 | 0,079 | 0,086 | 0,096 | 0,135 | 0,125 | 0,247 | 0,087 | 0,083 | 0,061 | 0,051 | 0,063 | 0,066 | 0,065 | 0,108 | 0,112 | 0,055 | 0,045 | 0,073 | 0,039 | 0,047 | | |
| 1954 | 0,202 | 0,105 | 0,099 | 0,211 | 0,088 | 0,183 | 0,237 | 0,129 | 0,135 | 0,189 | 0,168 | | 0,108 | 0,103 | 0,193 | 0,122 | 0,135 | 0,184 | 0,188 | 0,182 | 0,220 | 0,082 | 0,110 | 0,051 | 0,071 | 0,203 | | |
| 1955 | 0,369 | 0,143 | 0,138 | 0,438 | 0,118 | 0,363 | 0,250 | 0,172 | 0,128 | 0,203 | 0,153 | | 0,107 | 0,074 | 0,207 | 0,201 | 0,238 | 0,287 | 0,218 | 0,235 | 0,227 | | | 0,074 | 0,033 | 0,294 | | |
| 1956 | 0,492 | 0,190 | 0,172 | 0,514 | 0,158 | 0,534 | 0,132 | 0,156 | 0,108 | 0,304 | 0,227 | | 0,093 | 0,102 | 0,227 | 0,106 | 0,312 | 0,406 | 0,364 | 0,175 | 0,231 | | | 0,048 | 0,087 | | | |
| 1957 | 0,595 | 0,176 | 0,161 | 0,657 | 0,154 | 0,532 | 0,298 | 0,345 | 0,297 | 0,296 | 0,221 | | 0,048 | 0,073 | 0,461 | 0,342 | 0,283 | 0,369 | 0,256 | 0,073 | 0,254 | | | 0,043 | 0,091 | | | |
| 1958 | 0,526 | 0,323 | 0,291 | | 0,277 | 0,643 | 0,067 | 0,064 | 0,045 | 0,239 | 0,270 | | 0,089 | 0,120 | | 0,136 | 0,393 | 0,374 | 0,296 | | | | | | 0,141 | | | |
| 1959 | | 0,251 | 0,289 | | 0,210 | | 0,067 | 0,105 | 0,132 | 0,317 | 0,325 | | | 0,088 | | 0,092 | 0,476 | 0,316 | 0,185 | | | | | | 0,068 | | | |

De este modo, la validación de la aproximación metodológica se logró cofechando la cronología compuesta de alerces (CC-1) con la cronología de raíces de 1960. Este cofechado dio una intercorrelación de 0,422 (tabla 12). Con el fin de visualizar esta intercorrelación, la figura 31 compara los valores estándar y residuales de CC-1 con los valores residuales de la cronología 1960 (figura 30).

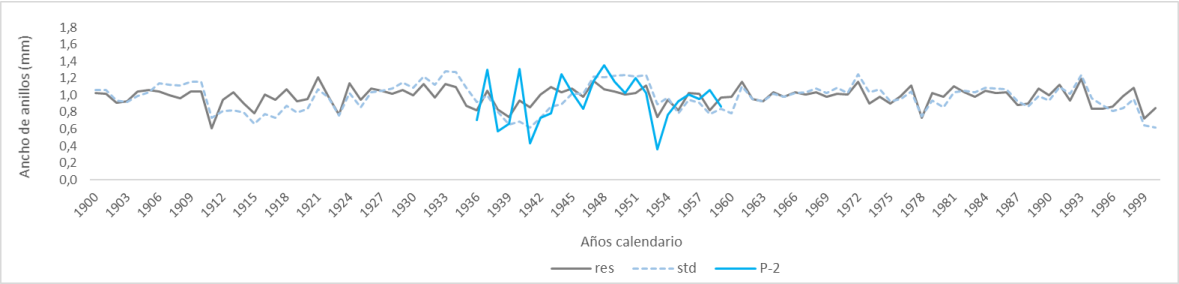



**Figura 30.** Comparación de los patrones de crecimiento entre la cronología de alerces CC-1 (std y res) y la cronología de las raíces del sitio P-2 que murieron en 1959.

**Tabla 12.** Valores de correlación entre la cronología de alerces CC-1 y la cronología de raíces del sitio P-2.

| N° Series | ID | Intervalo | | Correlación |
|---|---|---|---|---|
| 1 | ACH215A | 1900 | 2000 | 0,414 |
| 2 | ACH216B | 1900 | 2000 | 0,510 |
| 3 | ACH013A | 1900 | 2000 | 0,446 |
| 4 | ACH214B | 1900 | 2000 | 0,368 |
| 5 | ACH019A | 1900 | 2000 | 0,264 |
| 6 | ACH015A | 1900 | 2000 | 0,370 |
| 7 | ACH220B | 1900 | 2000 | 0,358 |
| 8 | ACL101A | 1900 | 2000 | 0,530 |
| 9 | ACL109C | 1900 | 2000 | 0,552 |
| 10 | ACL101C | 1900 | 2000 | 0,605 |
| 11 | ACL109B | 1900 | 2000 | 0,464 |
| 12 | ACL001A | 1900 | 2000 | 0,485 |
| 13 | ACL009C | 1900 | 2000 | 0,374 |
| 14 | VPU009A | 1900 | 2000 | 0,416 |
| 15 | PUN009B | 1900 | 2000 | 0,359 |
| 16 | PUN003B | 1900 | 2000 | 0,459 |
| 17 | PUN012B | 1900 | 2000 | 0,395 |
| 18 | PUN008B | 1900 | 2000 | 0,359 |
| 19 | VPU014A | 1900 | 2000 | 0,222 |
| 20 | VPU044B | 1900 | 2000 | 0,315 |
| 21 | VPU001A | 1900 | 2000 | 0,263 |
| 22 | VPU035B | 1900 | 2000 | 0,240 |
| 23 | VPU031B | 1900 | 2000 | 0,496 |
| 24 | VPU031A | 1900 | 2000 | 0,488 |
| 25 | CCP274A | 1900 | 1991 | 0,399 |
| 26 | CCP274B | 1900 | 1991 | 0,429 |
| 27 | CCP275A | 1900 | 1991 | 0,516 |
| 28 | CCP275B | 1900 | 1991 | 0,447 |
| 29 | CCP078C | 1900 | 1991 | 0,309 |
| 30 | CCP010B | 1900 | 1991 | 0,300 |
| 31 | CCP090B | 1900 | 1991 | 0,439 |
| 32 | CCP201A | 1900 | 1991 | 0,416 |
| 33 | CCP939A | 1900 | 1992 | 0,287 |
| 34 | R1_2 | 1950 | 1959 | 0,758 |
| 35 | R1_3 | 1947 | 1959 | 0,710 |
| 36 | R1_5 | 1948 | 1959 | 0,700 |
| 37 | R2_1 | 1945 | 1959 | 0,343 |
| 38 | R2_2 | 1945 | 1959 | 0,570 |
| 39 | R2_3 | 1945 | 1959 | 0,599 |
| 40 | R3_2 | 1946 | 1959 | 0,569 |
| 41 | R3_3 | 1946 | 1959 | 0,538 |
| 42 | R4_1 | 1936 | 1953 | 0,602 |
| 43 | R4_2 | 1936 | 1958 | 0,654 |
| 44 | R4_4 | 1936 | 1959 | 0,705 |
| 45 | R5_1 | 1950 | 1957 | 0,770 |
| 46 | R5_2 | 1950 | 1959 | 0,310 |
| 47 | R8_2 | 1950 | 1959 | 0,564 |
| 48 | R8_3 | 1950 | 1959 | 0,787 |
| 49 | R8_4 | 1950 | 1959 | 0,787 |
| 50 | R9_1 | 1951 | 1957 | 0,703 |
| 51 | R9_2 | 1951 | 1957 | 0,516 |
| 52 | R10_1 | 1942 | 1954 | 0,684 |
| 53 | R10_2 | 1942 | 1954 | 0,719 |
| 54 | R11_4 | 1943 | 1957 | 0,680 |
| 55 | R11_5 | 1943 | 1959 | 0,718 |
| 56 | R13_1 | 1943 | 1955 | 0,500 |
| 57 | R13_2 | 1943 | 1952 | 0,518 |
| 58 | R13_3 | 1943 | 1953 | 0,281 |
| **Intercorrelación promedio** | | | | **0,422** |

### 4.3.5 Reducción del rango de edad del evento D

Utilizando todos los datos obtenidos previamente, se procedió a determinar la edad del evento D con un rango temporal reducido. Para esto, se realizaron dos ejercicios, uno basado en la estadística del programa COFECHA y el otro en el reconocimiento visual de patrones de crecimiento. En ambos casos, la búsqueda de los segmentos temporales coincidentes se basó en el reconocimiento preliminar del radiocarbono.

En el primer ejercicio se extrajo desde la cronología compuesta de alerces CC-2 el segmento comprendido entre los años 1043 y 1153 DC (rango temporal reconocido por el radiocarbono como la fecha de muerte de las raíces fósiles). Este segmento, compuesto por 35 series con una intercorrelación de 0,459, fue cofechado con la cronología flotante de raíces fósiles (figura 31 y 32, tabla 13). En este caso, el programa COFECHA indica que las raíces murieron el año 1058 DC.

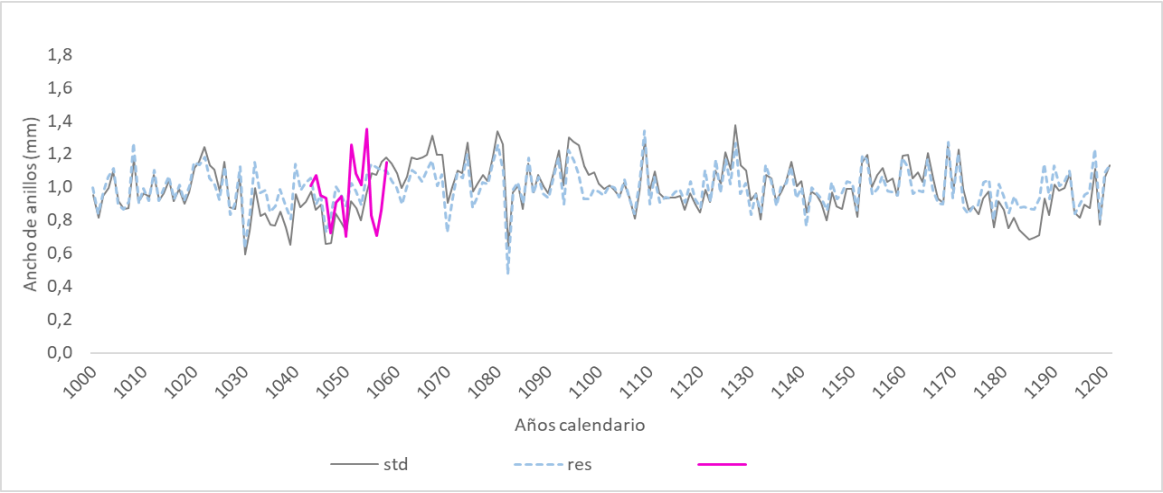



**Figura 31.** Comparación de los patrones de crecimiento entre la cronología de alerces CC-2 (std y res) y la cronología de raíces fósiles (línea magenta).

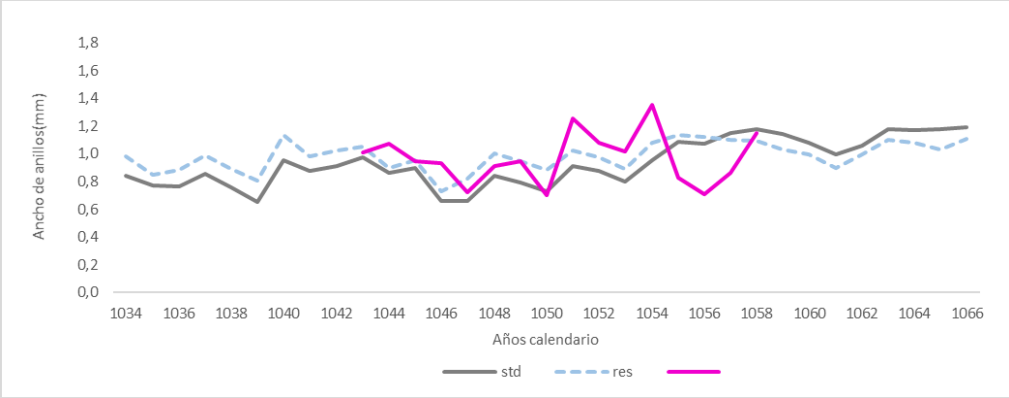



**Figura 32.** Comparación de los patrones de crecimiento entre la cronología de alerces CC-2 (std y res) y la cronología de raíces fósiles (línea magenta), considerando el año 1058 DC como último anillo.

**Tabla 13.** Valores de correlación entre la cronología de alerces CC-2 y la cronología de raíces fósiles, según el COFECHA para el año 1058 DC.

| N° Series | ID | Intervalo | | Correlación |
|---|---|---|---|---|
| 1 | VPU027A | 1060 | 1168 | 0,307 |
| 2 | AAR019B | 1048 | 1168 | 0,445 |
| 3 | AA2778A | 1030 | 1168 | 0,378 |
| 4 | AA2206C | 1030 | 1168 | 0,454 |
| 5 | AA0019B | 1048 | 1168 | 0,445 |
| 6 | LE0612A | 1030 | 1168 | 0,376 |
| 7 | LE1100A | 1030 | 1168 | 0,409 |
| 8 | LE3101A | 1030 | 1168 | 0,492 |
| 9 | LE3101B | 1030 | 1168 | 0,508 |
| 10 | LE9026A | 1031 | 1168 | 0,630 |
| 11 | CP0114A | 1030 | 1168 | 0,358 |
| 12 | CP0127A | 1030 | 1168 | 0,342 |
| 13 | PA0006B | 1030 | 1168 | 0,318 |
| 14 | PA0008A | 1030 | 1168 | 0,440 |
| 15 | PA0008B | 1030 | 1168 | 0,397 |
| 16 | PA0059A | 1030 | 1168 | 0,446 |
| 17 | PA0063B | 1030 | 1168 | 0,572 |
| 18 | PA0063C | 1030 | 1168 | 0,462 |
| 19 | PA0065B | 1030 | 1168 | 0,451 |
| 20 | PA0069B | 1030 | 1168 | 0,455 |
| 21 | LE0001B | 1030 | 1168 | 0,425 |
| 22 | LE0003A | 1030 | 1168 | 0,470 |
| 23 | LE0005A | 1030 | 1168 | 0,493 |
| 24 | LE0009A | 1030 | 1168 | 0,420 |
| 25 | LE0010B | 1030 | 1168 | 0,415 |
| 26 | HLC053A | 1030 | 1168 | 0,479 |
| 27 | HLC010A | 1030 | 1150 | 0,388 |
| 28 | HLC089B | 1030 | 1168 | 0,494 |
| 29 | HLC076B | 1030 | 1168 | 0,506 |
| 30 | HLC073C | 1030 | 1168 | 0,639 |
| 31 | HLC084B | 1030 | 1168 | 0,538 |
| 32 | HLC048D | 1030 | 1168 | 0,578 |
| 33 | HLC029B | 1030 | 1168 | 0,469 |
| 34 | HLC016B | 1030 | 1168 | 0,428 |
| 35 | HLC068B | 1030 | 1168 | 0,515 |
| 36 | M3_D | 1047 | 1058 | 0,132 |
| 37 | M5_A | 1047 | 1056 | 0,170 |
| 38 | M5_B | 1047 | 1057 | 0,134 |
| 39 | M7_A | 1043 | 1056 | 0,550 |
| 40 | M7_B | 1043 | 1058 | 0,220 |
| 41 | M10_B | 1052 | 1058 | 0,058 |
| 42 | M14_B | 1048 | 1056 | 0,523 |
| 43 | M14_C | 1048 | 1055 | 0,376 |
| 44 | M15_A | 1049 | 1058 | 0,072 |
| 45 | M16_A | 1049 | 1055 | 0,565 |
| 46 | M16_B | 1049 | 1056 | 0,538 |
| **Intercorrelación promedio** | | | | **0,453** |

En el segundo ejercicio se extrajo desde la cronología compuesta de alerces CC-2 el segmento comprendido entre los años 1000 y 1200 DC (rango redondeado y conservador de las fechas radiocarbónicas). Este segmento, compuesto por 35 series con una intercorrelación de 0,448, fue graficado junto a la cronología flotante de raíces fósiles (figura 33 y 34). En este caso, el análisis visual indicó que las raíces murieron el año 1030 DC. Adicionalmente, asignándole este año preciso a la cronología flotante de raíces, se procedió a cofecharla con la cronología de alerces CC-2, logrando mejorar ostensiblemente la correlación entre las series (tabla 14).

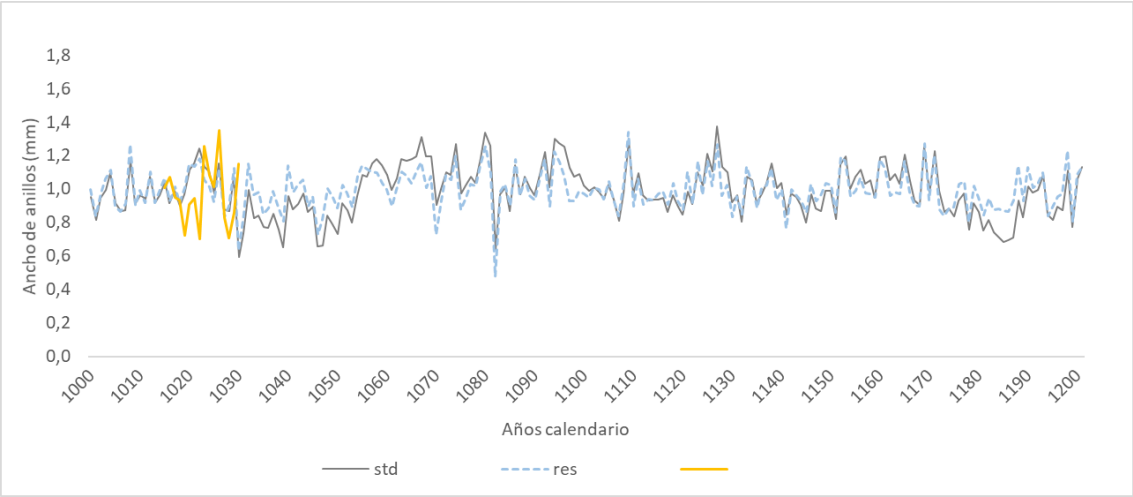



**Figura 33.** Comparación de los patrones de crecimiento entre la cronología de alerces CC-2 (std y res) y la cronología de raíces fósiles (línea amarilla).

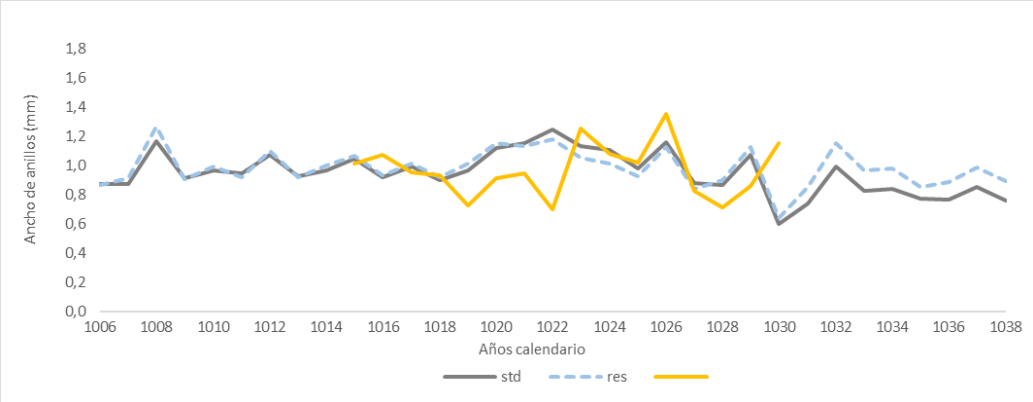



**Figura 34.** Comparación de los patrones de crecimiento entre la cronología de alerces CC-2 (std y res) y la cronología de raíces fósiles (línea amarilla), considerando el año 1030 DC como último anillo.

**Tabla 14.** Valores de correlación entre la cronología de alerces CC-2 y la cronología de raíces fósiles, según el COFECHA para el año 1030 DC.

| N° Series | ID | Intervalo | | Correlación |
|---|---|---|---|---|
| 1 | VPU027A | 1060 | 1201 | 0,283 |
| 2 | AAR019B | 1048 | 1201 | 0,522 |
| 3 | AA2778A | 1000 | 1201 | 0,342 |
| 4 | AA2206C | 1000 | 1201 | 0,442 |
| 5 | AA0019B | 1048 | 1201 | 0,522 |
| 6 | LE0612A | 1000 | 1168 | 0,394 |
| 7 | LE1100A | 1030 | 1101 | 0,059 |
| 8 | LE3101A | 1000 | 1201 | 0,481 |
| 9 | LE3101B | 1000 | 1201 | 0,509 |
| 10 | LE9026A | 1031 | 1201 | 0,567 |
| 11 | CP0114A | 1000 | 1201 | 0,391 |
| 12 | CP0127A | 1000 | 1201 | 0,351 |
| 13 | PA0006B | 1000 | 1211 | 0,012 |
| 14 | PA0008A | 1000 | 1168 | 0,420 |
| 15 | PA0008B | 1030 | 1201 | 0,429 |
| 16 | PA0059A | 1000 | 1201 | 0,523 |
| 17 | PA0063B | 1000 | 1201 | 0,583 |
| 18 | PA0063C | 1000 | 1201 | 0,529 |
| 19 | PA0065B | 1000 | 1201 | 0,487 |
| 20 | PA0069B | 1000 | 1201 | 0,404 |
| 21 | LE0001B | 1000 | 1201 | 0,350 |
| 22 | LE0003A | 1000 | 1201 | 0,441 |
| 23 | LE0005A | 1000 | 1201 | 0,443 |
| 24 | LE0009A | 1000 | 1168 | 0,377 |
| 25 | LE0010B | 1030 | 1201 | 0,431 |
| 26 | HLC053A | 1000 | 1201 | 0,426 |
| 27 | HLC010A | 1000 | 1150 | 0,462 |
| 28 | HLC089B | 1000 | 1201 | 0,474 |
| 29 | HLC076B | 1000 | 1201 | 0,523 |
| 30 | HLC073C | 1000 | 1201 | 0,582 |
| 31 | HLC084B | 1000 | 1201 | 0,552 |
| 32 | HLC048D | 1000 | 1201 | 0,592 |
| 33 | HLC029B | 1000 | 1200 | 0,424 |
| 34 | HLC016B | 1000 | 1201 | 0,452 |
| 35 | HLC068B | 1000 | 1201 | 0,547 |
| 36 | M3_D | 1019 | 1030 | 0,220 |
| 37 | M5_A | 1019 | 1028 | 0,307 |
| 38 | M5_B | 1019 | 1029 | 0,650 |
| 39 | M7_A | 1015 | 1028 | 0,358 |
| 40 | M7_B | 1015 | 1030 | 0,149 |
| 41 | M10_B | 1024 | 1030 | -0,117 |
| 42 | M14_B | 1020 | 1028 | 0,438 |
| 43 | M14_C | 1020 | 1027 | 0,453 |
| 44 | M15_A | 1021 | 1030 | 0,326 |
| 45 | M16_A | 1021 | 1027 | 0,311 |
| 46 | M16_B | 1021 | 1028 | 0,172 |
| **Intercorrelación promedio** | | | | **0,443** |

De este modo, utilizando las dataciones radiocarbónicas en conjunto con los análisis dendrocronológicos es posible proponer dos fechas para la ocurrencia del evento D (figura 35). La primera, el año 1030 DC, obtenida del análisis visual de los patrones de crecimiento, y la segunda, 1058 DC, lograda mediante la estadística de correlación del COFECHA. Considerando que ambas edades son muy cercanas y aplicando un enfoque conservador, el presente estudio concluye que el primer evento de subsidencia co-sísmica del segundo milenio en centro sur de Chile ocurrió entre los años 1030 y 1058 DC, con un rango temporal de sólo 28 años. De esta forma, se reduce el rango temporal más amplio previamente reportado, desde 230 a 28 años, superando en parte el problema del traslape de edades entre los terremotos del segundo milenio (figura 36).

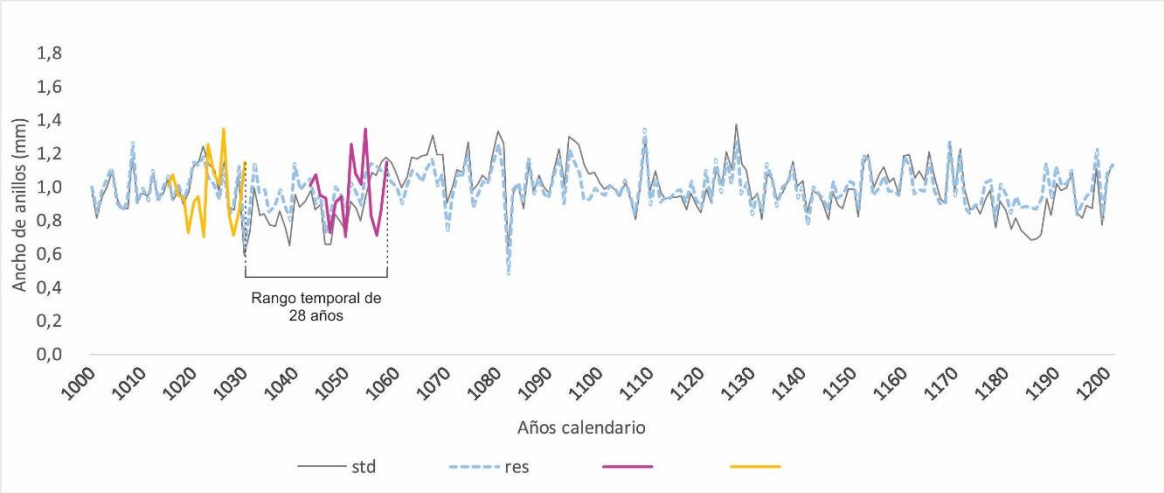



**Figura 35.** Rango temporal de 28 años propuesto para el evento D entre los años 1030 (línea amarilla) y 1058 DC (línea magenta). Ambos casos correlacionan significativamente con la cronología de alerces CC-2.

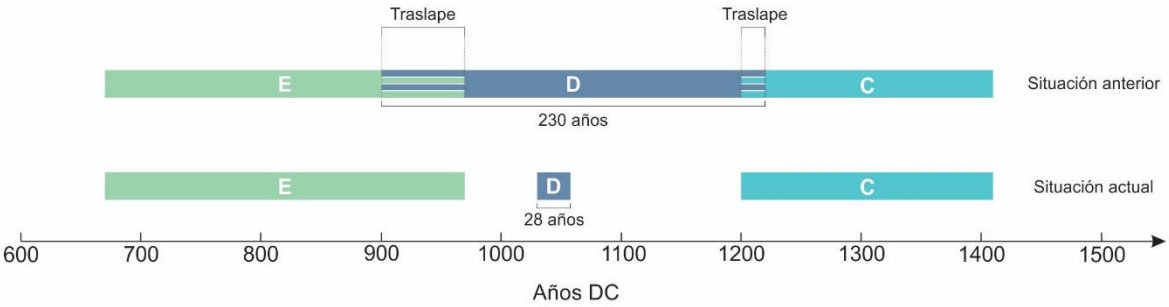



**Figura 36.** Comparación entre la situación anterior y los resultados del presente estudio. Arriba se muestran los traslapes entre los rangos temporales más amplios reportados por los eventos C, D y E en el centro sur de Chile. Abajo la reducción del rango del evento D, separándolo de los eventos contiguos.

## 5. DISCUSIÓN

El primer gran terremoto, tipo 1960, ocurrido a inicios del segundo milenio en el centro sur de Chile (evento D), había sido reconocido previamente utilizando diferentes aproximaciones (Cisternas *et al.*, 2005; Moernaut *et al.* 2014; Garret *et al.*, 2015; Cisternas *et al.*, 2018). Estos trabajos se basaron en evidencia de sacudimiento (turbiditas lacustres y deslizamientos en acantilados costeros) y evidencia de inundación por el tsunami resultante (capas de arena).

Sin embargo, su datación precisa ha sido hasta ahora difícil de obtener, debido a las limitaciones propias de las técnicas utilizadas. Los rangos temporales previamente reportados para este evento oscilan entre 88 años (Moernaut *et al.*, 2014) y 230 años (Cisternas *et al.*, 2018). Para abordar este problema, la presente investigación propuso el uso de técnicas dendrocronológicas para constreñir ese enorme rango temporal. Los resultados obtenidos fueron capaces de reducir el rango a sólo 28 años. Este importante avance permite diferenciar entre terremotos, y de esta forma contribuir al mejor entendimiento de la recurrencia de este tipo de eventos y por ende del ciclo sísmico de la región.

Para lograr estos resultados fue necesario experimentar con una serie de metodologías, tanto para la preparación de las muestras como para su análisis dendrocronológico. Respecto a la preparación, las técnicas esclerocronológica y de blanqueamiento presentaron el mejor desempeño. En cuanto a la medición de los anchos de anillos los mejores resultados se lograron mediante fotografías aumentadas y verificación visual directa. Para el tratamiento de los datos fue suficiente aplicar metodologías dendrocronológicas estándar, incluyendo la datación cruzada y estandarización de los resultados.

Quizás uno de los resultados más interesantes del estudio fue reconocer patrones de crecimiento de anillos similares tanto entre diferentes especies, de la misma familia, como entre plantas con divisiones taxonómicas diferentes. Primero, se reconoció que tanto las raíces de 1960 como las del evento D, todas de la familia de las mirtáceas (división taxonómica Magnoliophyta), cofechan de manera significativa entre ellas, con intercorrelaciones de 0,728 y 0,602, respectivamente. Aún más interesante, es que las raíces de estas mirtáceas cofechan con las cronologías maestras de alerces (~0,440), los que pertenecen a una división taxonómica completamente diferente (Pinophyta), específicamente de la familia Cupresácea.

Estos resultados son relevantes por dos razones. Primero, en Chile se han realizado muy pocos trabajos con mirtáceas (Peña *et al.*, 2014), por lo que existe un desconocimiento de su potencialidad para estudios dendrocronológicos. En este sentido, el presente trabajo es un aporte que, a través de las buenas correlaciones halladas, demostraría que se trata de árboles de una familia con buen potencial. En segundo lugar, y quizás aún más trascendente, son las correlaciones halladas entre dos divisiones taxonómicas completamente diferentes. En el caso de Chile, sólo se ha reportado que especies de familias diferentes presentan algunas señales comunes (Villalba *et al.*, 2012). Por lo anterior, los resultados de este trabajo indican que sí existen patrones de crecimiento de anillos similares.

Respecto a la datación del evento D, Moernaut *et al*. (2014) habían logrado obtener el menor rango de edad, con 88 años, entre 1083 y 1171 DC. Los autores pudieron llegar a ese rango mediante el conteo de varves anuales en los sedimentos de los lagos estudiados. Se trata de una de las técnicas geológicas de datación con mayor precisión (cuasi anual). Por el contrario, Cisternas *et al.* (2018), datando con radiocarbono plantas que fueron muertas por derrumbes cosísmicos obtuvo el rango más amplio, con 230 años, entre 898 y 1128 DC. Otros trabajos lograron rangos intermedios entre estos dos extremos.

A través de la novedosa aproximación utilizada en esta investigación se pudo reducir el rango a sólo 28 años. Esto se logró, primero, definiendo un rango radiocarbónico de 110 años, entre 1043 y 1153 DC. Posteriormente, sobre este rango se aplicaron metodologías dendrocronológicas con la que se obtuvieron dos fechas posibles, 1030 DC y 1058 DC. Con el fin de generar resultados conservadores, se considera que el evento D probablemente ocurrió en el rango temporal delimitado por ambas fechas. A pesar de esto, este rango es el menor que se ha propuesto hasta la fecha.

Independientemente de los buenos resultados descritos arriba, es importante también destacar las debilidades de la aproximación utilizada. El principal problema reconocido se relaciona a que las raíces halladas, fueron pocas y tenían en general escasos anillos (7-16). Aunque no se entiende bien la razón por la cual sólo se encontraron raíces con pequeño diámetro (jóvenes), se sospecha que se debe a que las más grandes no se preservaron adecuadamente en el registro sedimentario.

Contar con pocas muestras generó una cronología con un bajo EPS (<0,85). El índice EPS (Señal de la Población Expresada), cuantifica qué tan bien una cronología, basada en unas cuantas muestras, representa una cronología hipotéticamente perfecta (Wigley *et al.*, 1984). En el caso de esta investigación, después del proceso de preparación de las muestras, se contó sólo con 7 raíces para el sitio P-1 y 10 para P-2. Se trata de un número bajo y que se traduce en una cronología con poca robustez.

Que esas pocas muestras contengan escasos anillos genera cronologías muy cortas, que, por un lado, hacen más complejo el reconocimiento de los patrones de crecimiento y, por otro, dificulta su posterior comparación con los patrones de cronologías más largas. Por esta razón, la corta cronología obtenida para las raíces fósiles (16 años) cofechó con la cronología de alerce, seleccionada por el radiocarbono, en dos segmentos distintos. Esto último generó que se obtuviesen dos fechas posibles para el evento D, en vez de sólo una.

Finalmente, a pesar de estas limitantes, los resultados obtenidos en la presente investigación son valiosos en dos aspectos. Por una parte, proponen un nuevo y más constreñido rango de edad para el primer gran terremoto, tipo 1960, del segundo milenio en el centro sur de Chile. Esto, además de superar el problema del traslape de fechas, sirve para caracterizar la recurrencia de este tipo de eventos y así evaluar adecuadamente la futura amenaza que plantean. Por otra parte, esta investigación aporta una propuesta metodológica para realizar este tipo de dataciones en lugares donde se puedan hallar un mayor número de raíces y que contengan un mayor número de anillos. De este modo, este trabajo aporta con un método de datación promisorio y con un alto potencial para futuros estudios paleosismológicos en el centro sur de Chile.

## 6. CONCLUSIONES

El presente trabajo cumplió con el objetivo general de constreñir el rango de edad del primer terremoto gigante ocurrido a inicios del segundo milenio en el centro-sur de Chile.

Primero, se definió un rango de 110 años mediante radiocarbono (entre 1043 y 1153 DC). Para lograr esto, se dataron raíces fósiles de árboles que murieron por efecto de la subsidencia cosísmica.

Esas mismas raíces fueron analizadas dendrocronológicamente y cofechadas con cronologías maestras de alerce, en su mayoría previamente publicadas, para reducir el rango temporal. Se experimentaron diversas metodologías, tanto de preparación de las muestras como para su posterior análisis. En cuanto a la preparación, se obtuvieron los mejores resultados mediante técnicas esclerocronológicas y de blanqueamiento. Respecto al conteo y medición, las fotografías con aumento y la verificación visual directa tuvieron el mejor desempeño. Finalmente, aplicando metodologías dendrocronológicas estándar, que incluyeron la datación cruzada y estandarización de datos, se lograron los resultados validados.

Para esta validación se cofecharon raíces de árboles que murieron en 1960 con cronologías maestras de alerces del último siglo. De esta forma, se logró identificar patrones de crecimiento similares entre raíces de árboles, taxonómicamente diferentes, con cronologías de alerces. Estos resultados demuestran el potencial de la aproximación para ser utilizada en trabajos futuros.

Se concluye que el primer terremoto gigante del centro-sur de Chile en el segundo milenio, ocurrió entre los años 1030 y 1058 DC. De esta forma, se reduce el rango temporal previamente reportado, desde 88 a 28 años. Este resultado es un importante avance al conocimiento científico sobre la recurrencia sísmica en la región. También supera en parte el problema del traslape de edades entre los terremotos del segundo milenio. Esta edad constreñida para el evento D será útil para posteriores estudios estadísticos sobre la probabilidad que un gran terremoto pueda afectar a esta región del país en el futuro.

Finalmente, se comprueba la hipótesis planteada concluyendo que sí es posible, mediante el uso de técnicas dendrocronológicas aplicadas a raíces de árboles (mirtáceas) muertos por subsidencia cosísmica y a cronologías maestras de alerce, constreñir la edad radiocarbónica de terremotos prehistóricos en el centro sur de Chile.

Independientemente de lo anterior, es necesario reconocer las limitaciones de este estudio, las que dicen relación con el bajo número de muestras y de anillos de crecimiento. Contando en el futuro cercano con un universo muestreal mayor será posible construir cronologías más robustas estadísticamente y así verificar los resultados aquí logrados.

## 7. REFERENCIAS


Atwater, B. 1992. Geologic Evidence for Earthquakes During the Past 2000 Years Along the Copalis River, Southern Coastal Washington. Journal of Geophysical Research, 97: 1901-1919.

Atwater, B., Jiménez, N., Vita-Finzi, C. 1992. Net late Holocene emergence despite earthquake-induced submergence, south-central Chile. Quaternary International, 15(16): 77–85.

Atwater, B., Hemphill-Haley, E. 1997. Recurrence Intervals for Great Earthquakes of the Past 3,500 Years at Northeastern Willapa Bay, Washington. U.S. Geological Survey Professional Paper 1576. 108 pp.

Atwater, B., Cisternas, M., Yulianto, E., Prendergast, A., Jankaew, K., Eipert, A., Fernando, S., Tejakusuma, I., Schiappacasse, L., Sawai, Y. 2013. The 1960 tsunami on beach-ridge plains near Maullín, Chile: landward descent, renewed breaches, aggraded fans, multiple predecessors. Andean Geology, 40: 393–418.

Bartsch-Winkler, S., Schmoll, H. 1993. Evidence for late Holocene relative sea-level fall from reconnaissance stratigraphical studies in an area of earthquake subsided intertidal deposits, Isla Chiloé, southern Chile. En: Frostwick, L.E., Steel, R.J. (Eds.), Tectonic Controls and Signatures in Sedimentary Successions. International Association of Seismologists, 91–108 pp.

Bernhardt, A., Melnick, D., Hebbeln, D., Lückge, A., Strecker, M. 2015. Turbidite paleoseismology along the active continental margin of Chile e Feasible or not?. Quaternary Science Reviews, 120: 71-92.

Blumberg, S., Lamy, F., Arz, H., Echtler, H., Wiedicke, M., Haug, G., Oncken, O. 2008. Turbiditic trench deposits at the South-Chilean activemargin: a Pleistocene-Holocene record of climate and tectonics. Earth and Planetary Science Letters, 268: 526–539.

Cisternas, M, Atwater, B.F., Torrejon, F., Sawai, Y., Machuca, G., *et al.* 2005. Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. Nature, 437: 404–7.

Cisternas, M., Mizobe, C.E., Wesson, R., Ely, L., Muñoz, A., Dura, T., Valdebenito, G., Melnick, D. 2017. Beach ridges, buried erosional scarps and overhanging soils evidence recurring past coseismic subsidence midway along the area of the giant 1960 Chile Earthquake. The Geological Society of America 129th Annual Meeting, Seatle, Washington, USA.

Cisternas, M., Garrett, E., Wesson, R., Dura, T., Ely, LL. 2018. Unusual geologic evidence of coeval seismic shaking and tsunamis shows variability in earthquake size and recurrence in the area of the giant 1960 Chile earthquake. Marine Geology, 385: 101-113.

Cook, E.R., Holmes, R.L. 1984. Program ARSTAN users manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, AZ. USA.

Cook, E.R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. Tree-Ring Bulletin, 47: 37-59.

Ely, L., Cisternas, M., Wesson, R., Dura, T. 2014. Five centuries of tsunamis and land-level changes in the overlapping rupture area of the 1960 and 2010 Chilean earthquakes. Geology, 42(11): 995–998.

Figueroa, G. 2018. Evolución espacio-temporal reciente de la morfoestratigrafía en una planicie de cordones litorales afectada por subsidencia cosismica durante el terremoto de 1960 Mw 9.5, Chile. Tesis para la obtención del título profesional de Geología. Universidad Andrés Bello, 118 pp.

Garrett, E., Shennan, I., Woodroff, S., Cisternas, M., Hocking, P., Gulliverd, P. 2015. Reconstructing paleoseismic deformation, 2: 1000 years of great earthquakes at Chucalén, south central Chile. Quaternary Science Reviews, 113: 112–122.

Gutiérrez, E. 2008. La dendrocronología: métodos y aplicaciones. "Arqueología nautica mediterrània" X. Nieto i M.A. Cau (eds.). 303-315. pp.

Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Treering bulletin, 43(1), 69-78.

Hong, I., Dura, T., Ely, L., Horton, B., Nelson, A., Cisternas, M., Nikitina, D.,Wesson, R. 2016. A 600-year-long stratigraphic record of tsunamis in south-central Chile. The Holocene, 27(1): 39–51. doi: http://dx.doi.org/10.1177/0959683616646191.

Hogg, A., Hua, Q., Blackwell, P., Niu, M., Buck, C., Guilderson, T., Heaton, T., Palmer, J., Reimer, P., Reimer, R., Turney, C., Zimmerman, S. 2013. SHCal13 southern hemisphere calibration, 0–50,000 Years cal BP. Radiocarbon, 55: 1889–1903.

Kanamori, H. 1977. The energy release in great earthquakes. Journal of Geophysical Research, 2981. doi: 10.1029/JB082i020p02981.

Lara, A.; Fraver, S.; Aravena, J.; Wolodarsky-Franke, A. 2008. Lara fire data from Cordillera Pelada-IMPD CHCOR001. Disponible en https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/2248

Lara, A., Villalba, R., Urrutia-Jalabert, R., González-Reyes, A., Aravena, J.C., Luckman, B.H., Cuq, E., Rodríguez, C., Wolodarsky-Franke, A. En revisión. Solar forcing of multi-millennial temperature variations from tree-ring records in southern South America.

Malik, J.N., Shishikura, M., Echigo, T., Ikeda, Y., Satake, K., Kayanne, H., Sawai, Y., Murty, C.V.R., Dikshit, O. 2011. Geologic evidence for two pre-2004 earthquakes during recent centuries near Port Blair, South Andaman Island, India. Geology, 39(6): 559–562. doi: https://doi.org/10.1130/G31707.1

Moernaut, J., De, Batist, M., Charlet, F., Heirman, K., Chapron, E., Pino M., Brummer, R., Urrutia, R. 2007. Giant earthquakes in south-central Chile revealed by Holocene mass-wasting events in Lake Puyehue. Sedimentary Geology, 195: 239–256. doi: 10.1016/j.sedgeo.2006.08.005

Moernaut, J., Van Daele, M., Heirman, K., Fontijn, K., Strasser, M., Pino, M., Urrutia, R., de Batist, M. 2014. Lacustrine turbidites as a tool for quantitative earthquake reconstruction: new evidence for a variable rupture mode in south central Chile. Journal of Geophysical Research, 119: 1607–1633.

Moernaut, J., Van Daele, M., Fontijn, K., Heirman, K., Kemp, P., Pino, M., Valdebenito, G., Urrutia, R., Strasser, M., De Batist, M. 2018. Larger earthquakes recur more periodically: New insights in the megathrust earthquake cycle from lacustrine turbidite records in south-central Chile. Earth and Planetary Science Letters, 481: 9-19. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.016

Monecke, K., Finger, W., Klarer, D., Kongko, W., McAdoo, B.G., Moore, A.L., Sudrajat, S.U. 2008. A 1,000-year sediment record of tsunami recurrence in northern Sumatra. Nature, 455: 1232-1234. doi: 10.1038/nature07374

Nanayama, F., Furukawa, R., Shigeno, K., Makino, A., Soeda, Y., Igarashi, Y. 2007. Nine unusually large tsunami deposits from the past 4000 years at Kiritappu marsh along the southern Kuril Trench. Sedimentary Geology, 200: 275-294.

Neira, E., Lara, A. 2000. Desarrollo de cronologías de ancho de anillos para alerce (*Fitzroya cupressoides*) en Contao y Mirador, Chile. Revista Chilena de Historia Natural, 73(4): 693-703.

Nelson, A., Kashima, K., Bradley, L. 2009. Fragmentary evidence of great earthquake subsidence during Holocene Emergence, Valdivia Estuary, South Central Chile. Bull. Seismological Society of America, 99: 71–86.

Nentwig, V., Tsukamoto, S., Frechen, M., Bahlburg, H. 2015. Reconstructing the tsunami record in Tirúa, Central Chile beyond the historical record with quartz-based SAROSL. Quaternary Geochronology, 30(B): 299–305.

Peña, M.P, Barichivich, J., Maldonado, A. 2014. Climatic drivers of tree growth in a swamp forest island in the semiarid coast of Chile. Journal of Arid Environments, 109: 15-22.

Peters, R., Jaffe, B., Gelfenbaum, G. 2007. Distribution and sedimentary characteristics of tsunami deposits along the Cascadia margin of western North America. Sedimentary Geology, 200: 372–386.

Plafker, G., Savage, J.C. 1970. Mechanism of the Chilean Earthquakes of May 21 and 22, 1960. *GSA* Bulletin, 81(4): 1001–1030.

Rajendran, C.P., Rajendran, K., Andrade, V., Srinivasalu, S. 2013. Ages and relative sizes of pre-2004 tsunamis in the Bay of Bengal inferred from geologic evidence in the Andaman and Nicobar Islands. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118: 1345–1362. doi: 10.1002/jgrb.50122, 2013

Reed, D., Muir-Wood, R., Best, J. 1988. Earthquakes, rivers and ice: scientific research at the Laguna San Rafael, Southern Chile, 1986. The Geographical Journal, 154(3): 392–405.

Roig, F.A. (ed.) 2000. Dendrocronología en América Latina. Editorial de la Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza.

Satake, K., Atwater, B.F. 2007. Long-term perspectives on giant earthquakes and tsunamis at subduction zones. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 35: 349–274. doi: 10.1146/annurev.earth.35.031306.140302

Shennan, I., Long, A.J., Rutherford, M.M., Green, F.M., Innes, J.B., Lloyd, J.M., Zong, Y., Walker, K.J. 1996. Tidal marsh stratigraphy, sea-level change and large earthquakes, I: A 5000 year record in Washington, U.S.A. Quaternary Science Rewiews, 15: 1023-1059.

Speer, J.H. 2010. Fundamentals of tree-ring research. The University of Arizona Press, Tucson, 363 pp.

Schweingruber, F.H. 1988. Tree Rings, Springer, New York, 276 pp.

Tanigawa, K., Sawai, Y., Shishikura, M., Namegaya, Y., Matsumoto, D. 2014. Geological evidence for an unusually large tsunami on the Pacific coast of Aomori, Northern Japan. Journal Of Quaternary Science, 29(2): 200–208.

Urrutia-Jalabert, R., Malhi, Y., Lara, A. 2015. The oldest, slowest rainforests in the world? Massive biomass and slow carbon dynamics of *Fitzroya cupressoides* temperate forests in southern Chile. PLoS One, 10(9): e0137569. doi:10.1371/journal.pone.0137569

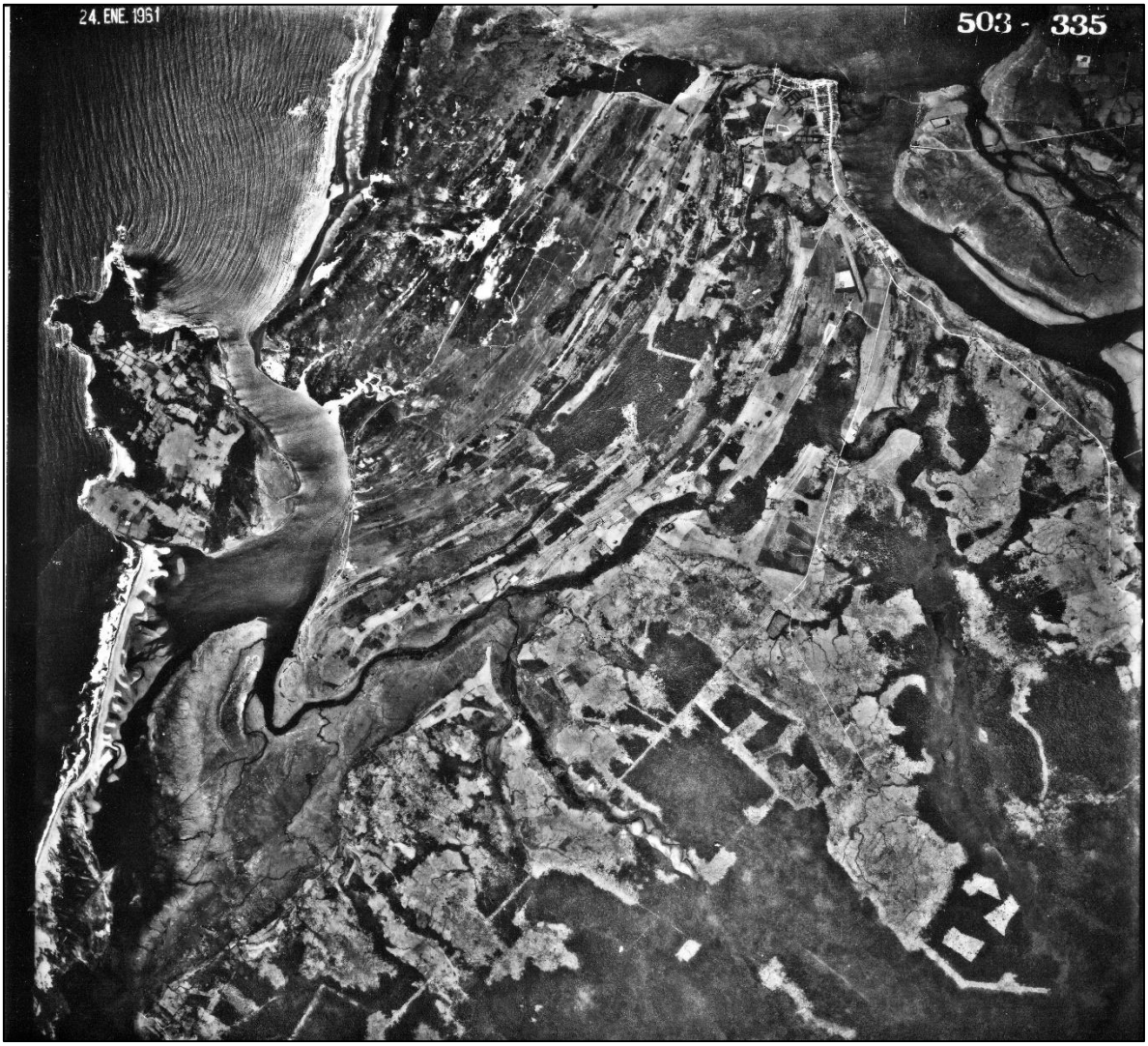
Villalba, R., Lara, A., Masiokas, M.H., Urrutia, R., Luckman, B.H., Marshall, G.J., *et al.* 2012. Unusual Southern Hemisphere tree growth patterns induced by changes in the Southern Annular Mode. Nature Geoscience, 5: 793-798.

Wigley, T.M.L., Jones, P.D., Briffa, K.R. 1984. On the average value of correlated time series, withapplications in dendroclimatology and hydrometeorology. Journal of Climate and Applied Meteorology, 23: 201-213.

# 8. ANEXOS

**Anexo 1**. Fotografías aéreas de la planicie de Pangal tomadas 8 meses después del terremoto del 22 de mayo de 1960.

Vuelo OEA 1961



Vuelo OEA 1961