



UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Escuela de Pregrado

Carrera de Geografía

ANÁLISIS DE DATOS DENDROCRONOLÓGICOS E INSTRUMENTALES DE
TEMPERATURAS EXTREMAS DE CURICÓ, Y SU RELACIÓN CON LOS ANILLOS
DE CONGELAMIENTO.

Memoria para optar el título profesional de Geógrafa

CATALINA SOFÍA PLAZA ECHEVERRÍA

Profesor guía: Pablo Sarricolea Espinoza

Proyecto Fondecyt N°1221307

SANTIAGO, CHILE
(2024)

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi mamá, mi papá, mi hermano y a la Ale por su apoyo a lo largo de todos estos años.

Asimismo, quiero agradecer a mi profesor guía, Pablo Sarricolea, por su ayuda durante este proceso, y a los investigadores del Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral por resolver mis dudas y proporcionar datos fundamentales para esta investigación.

RESUMEN

Las heladas que ocurren durante la primavera pueden ser muy dañinas para la agricultura. Esto se debe a que las plantas se encuentran en pleno crecimiento durante esa estación, lo cual las hace más vulnerables a los cambios bruscos de temperaturas. A partir de esto, surge la necesidad de investigar los anillos de los árboles, dado que estos almacenan información crucial para entender los efectos de las heladas y pueden ser fundamentales para la reconstrucción del clima en épocas donde no se disponen de registros instrumentales. Para contribuir con ello, la presente investigación, enmarcada en el proyecto Fondecyt N° 1221307, busca encontrar relaciones entre las heladas de primavera registradas por una estación meteorológica, en este caso la estación General Freire de Curicó, y las marcas de congelamiento de *Austrocedrus chilensis* (Ciprés de la cordillera). Como resultado, se concluyó que esta especie es valiosa para la reconstrucción climática, gracias a la correspondencia entre las temperaturas extremas registradas por la estación meteorológica y los datos obtenidos de los anillos del árbol. La utilidad de esta especie se debe a la claridad de sus anillos de crecimiento, su notable longevidad y su capacidad para resistir diversos disturbios y variaciones ambientales (Ravanal, 2021). Sin embargo, la presente investigación sugiere que los árboles situados en la ladera con exposición norte del río Teno podrían tener una mayor probabilidad de registrar heladas de primavera en comparación con los árboles ubicados en la ladera con exposición al sur.

Palabras clave: *Austrocedrus chilensis*, heladas de primavera, dendrocronología, anillos de congelamiento, cambio climático.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN.....	7
1.1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.3 ESTADO DEL ARTE.....	11
1.3.1 Impactos del cambio climático en la agricultura a nivel nacional.....	11
1.3.2 Relación de las heladas con el cambio climático.....	11
1.3.3 Horas de frío.....	12
1.3.4 Estudios dendrocronológicos en el hemisferio sur.....	13
1.3.5 Especies de árboles estudiadas en Chile.....	13
1.3.6 Ciprés de cordillera.....	13
1.3.7 Investigaciones de ciprés de la cordillera en Chile.....	14
1.4 ÁREA DE ESTUDIO.....	16
1.4.1 Geomorfología.....	19
1.4.2 Clima.....	19
1.4.3 Vegetación.....	19
1.5 OBJETIVOS.....	20
1.5.1 Objetivo general.....	20
1.5.2 Objetivos específicos.....	20
CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	21
2.1 COMPILACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS EVENTOS DE HELADAS TARDÍAS REGISTRADOS EN CURICÓ.....	21
2.1.1 Recopilación de datos.....	21
2.1.2 Comparación entre los datos encontrados y los representados en plataformas climáticas.....	21
2.1.3 Identificación del índice de Oscilación Sur (SOI).....	22
2.1.4 Relación del clima con el Anticiclón del Pacífico Sur.....	22
2.1.5 Indagación de fuentes históricas que documenten la presencia de heladas durante la primavera.....	23
2.1.6 Identificación el periodo de retorno de las heladas tardías en Curicó.....	23
2.2 RELACIONAR LOS ANILLOS DE CONGELAMIENTO CON LAS HELADAS TARDÍAS REGISTRADAS EN CURICÓ.....	23
2.2.1 Identificación de anillos de congelamiento.....	23
CAPÍTULO 3: RESULTADOS.....	25
3.1 RESULTADOS GENERALES DE LAS HELADAS TARDÍAS REGISTRADAS EN LA ESTACIÓN GENERAL FREIRE, CURICÓ ENTRE LOS AÑOS 1926- 2022.....	25
3.1.1 Heladas registradas durante el mes de septiembre.....	25
3.1.2 Heladas registradas durante el mes de octubre.....	27
3.1.3 Heladas registradas durante el mes de noviembre.....	28

3.2. PRINCIPALES AÑOS EN LOS QUE SE REGISTRARON ANOMALÍAS CLIMÁTICAS.....	28
3.2.1 1934.....	30
3.2.1.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1934.....	31
3.2.2 1936.....	31
3.2.2.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1936.....	32
3.2.3 1938.....	32
3.2.3.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1938.....	33
3.2.4 1947.....	33
3.2.4.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1947.....	34
3.2.5 1951.....	34
3.2.5.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1951.....	35
3.2.6 1953.....	35
3.2.6.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1953.....	36
3.2.7 1961.....	36
3.2.7.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1961.....	37
3.2.8 1967.....	37
3.2.8.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1967.....	37
3.2.9 1973.....	37
3.2.9.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1973.....	38
3.2.10 2013.....	38
3.2.10.1 Información histórica documentada en periódicos del año 2013.....	39
3.3 ANÁLISIS DE LAS CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LAS HELADAS TARDÍAS.....	39
3.3.1 Causas de las heladas tardías en los años analizados	39
3.3.2 Consecuencias de las heladas tardías en los años analizados.....	40
3.4 PERIODO DE RETORNO DE LAS HELADAS TARDÍAS EN CURICÓ.....	40
3.5 ANILLOS DE CONGELAMIENTO PERTENECIENTES A LOS AÑOS DESTACADOS.....	43
3.5.1 Resultados generales de las muestras.....	43
3.5.2 Análisis de los anillos de congelamiento encontrados en la ladera sur, exposición norte del río Teno.....	43
3.5.2.1 Análisis del Ciprés del cual se obtuvo la muestra CTE 35.....	47
3.5.3 Análisis de los anillos de congelamiento encontrados en la ladera norte, exposición sur del río Teno.....	49
3.5.4 Análisis de las muestras de exposición norte y exposición sur.....	51
CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	52
4.1 DISCUSIÓN.....	52
4.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53

BIBLIOGRAFÍA.....	54
ANEXOS.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Anillos de congelamientos en la estructura de madera de un árbol.....	10
Figura 2: Sección transversal (a) y corte transversal (b) de <i>Austrocedrus chilensis</i>	14
Figura 3: Cartografía del área de estudio: comunas de Curicó y Romeral, Región del Maule.....	16
Figura 4: Mapa de ubicación y altitud de la estación meteorológica General Freire de Curicó.....	17
Figura 5: Ubicación de los <i>Austrocedrus chilensis</i> muestreados	18
Figura 6: Periodo de retorno de las heladas de primavera.....	41
Figura 7: Marca de congelamiento registrada en el año 1934	43
Figura 8: Marca de congelamiento registrada en el año 1951 (Tarugo CTE 035A).....	44
Figura 9: Marca de congelamiento registrada en el año 1953.....	45
Figura 10: Marca de congelamiento registrada en el año 1961.....	46
Figura 11: Marca de congelamiento registrada en el año 1951 (Tarugo CTE 014).....	47
Figura 12: Ubicación del Ciprés al cual pertenece el tarugo CTE 35, en relación con los demás.....	48
Figura 13: Anillo de crecimiento del año 2013 y anillo falso registrado en el año 2012.....	49
Figura 14: Precipitación media durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre en Curicó.....	50
Figura 15: Imagen detallada del cambio en el grosor de los anillos y dirección de las células luego del anillo falso.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Requerimiento de horas-frío de los árboles frutales más cultivados en la Región del Maule.....	12
Tabla 2: Clasificación del índice SOI.....	22
Tabla 3: Heladas durante el mes de septiembre entre los años 1926-1962.....	25
Tabla 4: Heladas durante el mes de septiembre entre los años 1963-1986.....	26
Tabla 5: Heladas durante el mes de septiembre entre los años 1987-2022.....	27
Tabla 6: Heladas durante el mes de octubre entre los años 1926-2022.....	28
Tabla 7: Años que se destacaron por sus anomalías climáticas.....	29
Tabla 8: Resumen de lo descrito en el apartado 3.2.....	40
Tabla 9: Frecuencia de heladas tardías durante el periodo 1929-2022.....	41

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático, desencadenado por el incremento en las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, constituye una preocupación a nivel global (Carrasco, 2016). Este fenómeno repercute a una amplia gama de sectores productivos y económicos, tal como la agricultura, la gestión del agua, la biodiversidad y los bosques, el turismo y la salud pública, entre otros. Estos impactos incluyen riesgos como la reducción en la producción y calidad de los alimentos (Carrasco, 2016).

Chile, por su localización y geografía es poseedor de diversos climas (Bravo y Vidal, 2020), los cuales se encuentran determinados principalmente por la cordillera de los Andes y de la Costa, así como también por el anticiclón del pacífico, la influencia marina y el relieve (Uribe et al., 2012), lo cual permite una gran diversificación de actividades agrícolas y ganaderas (Bravo y Vidal, 2020).

En Chile, existe un ciclo anual en el cual se puede distinguir fácilmente el invierno y el verano, así como también las estaciones de transición (otoño y primavera). La mayoría de las plantas comienzan su crecimiento con el aumento de la temperatura, es decir, a finales de invierno e inicio de primavera, donde generalmente se producen las últimas heladas del año (Bravo y Vidal, 2020).

Las heladas son más frecuentes a medida que nos desplazamos de norte a sur. Esto implica que el período sin heladas se reduce en la misma dirección. En primavera, las heladas tardías son cada vez más comunes, mientras que en otoño se registra la primera helada más temprana. Esta situación representa un desafío para la diversificación de cultivos en el sur del país (Bravo y Vidal, 2020).

Según el censo de 2007, la región del Maule acumula el 17,2% de la superficie nacional dedicada a rubros silvoagropecuarios, los cuales corresponden principalmente a plantaciones forestales seguidas de cereales, frutales, plantas forrajeras y parronales y viñas (ODEPA, 2018). Los cultivos de estas últimas han sido notoriamente afectados por las heladas tardías (Reyes y Salazar-Parra, 2020), lo cual genera un impacto en la agricultura del país debido a que en esta región se cultiva alrededor de un 35% del total nacional de viñas (ODEPA, 2018).

Las heladas primaverales o tardías reciben esta denominación porque se registran una vez terminado el invierno, es decir, desde principios de primavera. En general, su intensidad es moderada, siendo pocos los casos en que alcanzan valores catastróficos. Igualmente, dependiendo de la especie y su estado fenológico, pueden ser muy dañinas, siendo la duración de la temperatura un factor importante (Luchabeche, 2020).

El crecimiento de los árboles es un proceso biológico que implica la formación, diferenciación y expansión de nuevas células, resultando en la creación de tejidos y órganos. Este crecimiento no es continuo, deteniéndose en ciertos momentos debido a limitaciones internas o externas, lo que resulta en la formación de anillos (Gutiérrez, 2009).

Existen varios tipos de anomalías en los anillos de crecimiento anuales de especies leñosas. Entre ellos están los anillos parcialmente ausentes, las bandas intra-anuales y los anillos afectados por congelamiento (Rojas-Badilla, et al., 2017). Estos últimos están asociados a fenómenos extremos de baja temperatura que afectan a las plantas leñosas mientras se encuentran en periodo de crecimiento (Kaennel y Schweingruber, 1995; Rojas-Badilla, et al., 2017).

Los anillos de crecimiento anuales se pueden datar mediante un conjunto de principios, técnicas y métodos provenientes de la dendrocronología. Esta última es una disciplina científica que busca extraer, separar e interpretar la información contenida en los anillos para poder saber los factores que han influido en su crecimiento (Gutiérrez, 2009), siendo un recurso fundamental para poder extender los registros climáticos hasta la época pre-instrumental (Lara et al, 1994).

Dada la importancia de comprender el impacto de los eventos climáticos extremos en las plantas y verificar la precisión de la representación de las heladas de primavera en los anillos de los árboles, esta investigación analizará datos dendrocronológicos e instrumentales extraídos de la región del Maule, abarcando el periodo 1926 - 2022. El objetivo es identificar posibles relaciones entre la fecha de formación de los anillos de congelamiento y la ocurrencia de heladas de primavera según las mediciones instrumentales.

Para llevar a cabo esta investigación, se emplearán datos dendrocronológicos proporcionados por investigadores del Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral, así como datos del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia [CR2], y la plataforma Climate Reanalyzer. Además, se recurrirá a información documentada en periódicos de la época.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático es un fenómeno que provoca la alteración del clima en comparación con el historial climático a una escala global o regional. Estos cambios ocurren en diferentes escalas de tiempo y afectan a todos los parámetros meteorológicos, como temperatura, presión atmosférica, precipitaciones y nubosidad. Pueden atribuirse tanto a causas naturales como antropogénicas, es decir, aquellas derivadas de la actividad humana (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2013a).

En numerosos países, las comunidades rurales más empobrecidas residen en áreas marginales y expuestas, lo que las hace extremadamente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático. Para estas personas, incluso los cambios climáticos más pequeños pueden tener consecuencias devastadoras para sus vidas y medios de subsistencia. En particular, los agricultores de subsistencia que viven en entornos frágiles podrían enfrentar grandes fluctuaciones en su productividad debido a la posible afectación de cultivos esenciales como maíz, frijoles, papas o arroz. Causan preocupación especialmente las regiones donde la agricultura de subsistencia predomina, ya que una disminución mínima en la productividad podría provocar graves desequilibrios en la vida rural (Altieri & Nicholls, 2009).

La influencia del cambio climático en la agricultura se manifiesta principalmente a través de las variaciones en los climas locales, más que en los patrones globales. El incremento de la temperatura promedio en la superficie terrestre ha provocado repercusiones heterogéneas en diversas zonas geográficas (ODEPA, 2013a).

Entre las variaciones climáticas observadas en las últimas décadas, se destacan el aumento promedio de las temperaturas en las regiones interiores y la disminución en las zonas costeras, junto con la presencia cada vez más frecuente de fenómenos como temperaturas extremas, granizo, olas de calor y frío, y heladas polares, reflejando una mayor inestabilidad y un clima menos predecible (Sánchez, s.f.).

Debido esta situación, las heladas se han convertido en uno de los mayores temas de preocupación a nivel mundial, especialmente para el sector agrícola y lo referido a sus impactos. Esta preocupación es mayor cuando las heladas se presentan en temporada de primavera en la zona central de Chile, ya que de esta manera coincide con el desarrollo fenológico de cultivos, plantas y árboles, lo cual provoca daños aún mayores, causando en algunas ocasiones pérdidas millonarias en el sector frutícola (ODEPA, 2013; Quintana, 2020).

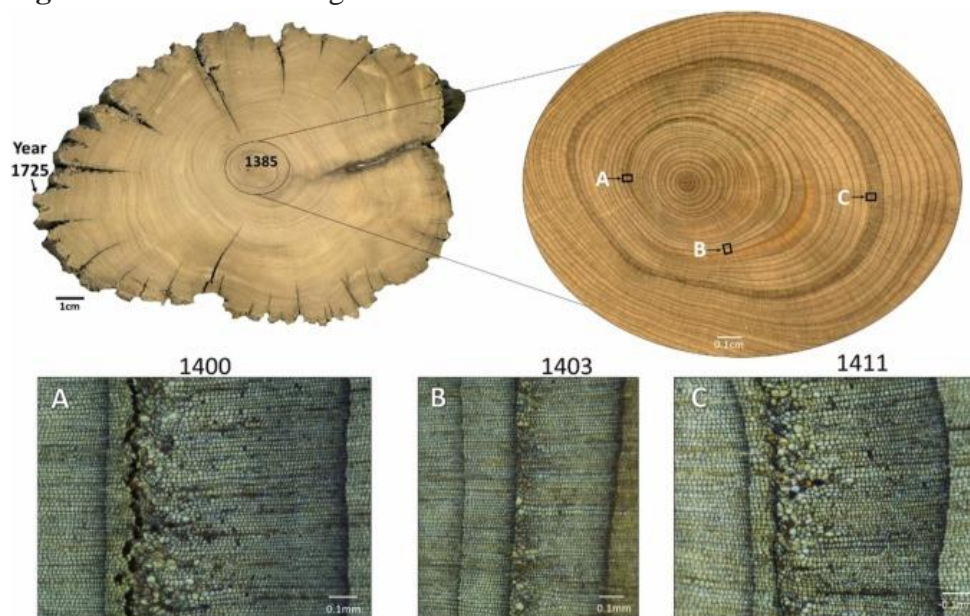
El nivel del daño depende de la vulnerabilidad de la especie o variedad, que tan bajas sean las temperaturas, el estado fenológico, intensidad de la helada, el tiempo de exposición y la ubicación geográfica (Fundación para la Innovación Agraria [FIA], 2016). Al descender la temperatura ambiente por debajo de los 0°C (helada), la conducción ambiental puede ser crítica no solo para el desarrollo fisiológico de las plantas, sino que también, puede afectar la integridad de los tejidos que pueden ser muy dañados por congelación (Martinez, et al., 2007).

A pesar de los impactos nombrados anteriormente, la cantidad de registros instrumentales y aproximados de Chile y Sudamérica son escasos comparados con los de las zonas templadas del hemisferio norte (Lara et al., 1994), siendo esto una limitante para el avance de

investigaciones sobre el comportamiento del clima histórico y, especialmente, el de las heladas. Estas últimas han sido estudiadas ampliamente, sin embargo, aún se continúa solicitando más información al respecto, siendo esencial la actualización de datos estadísticos o nuevos estudios para poder conocer la forma en que estos fenómenos pueden afectar a los cultivos agrícolas y, con ello, a los agricultores y a la economía (Bravo, et al., 2020).

Los anillos de congelamiento se producen debido a alteraciones del proceso de xilogénesis cuando ocurren temperaturas bajo cero en la temporada de crecimiento (Lee et al., 2007; Muñoz-Salazar, et al., 2022). Estas anomalías se presentan como traqueidas deformadas y poco lignificadas, radios de madera curvados y la proliferación de células del parénquima, entre otras (Lee et al., 2007; Barbosa et al., 2019; Hadad et al., 2019; Muñoz-Salazar, et al., 2022) (Figura 1). El análisis de estas formas permite la comprensión de la variabilidad del clima a largo plazo en la ocurrencia de eventos climáticos extremos en regiones en donde los registros instrumentales son escasos (Muñoz-Salazar, et al., 2022).

Figura 1: Anillos de congelamientos en la estructura de madera de un árbol.



Fuente: Muñoz-Salazar, et al. (2022)

Ante esta problemática, surge la necesidad de examinar anillos de crecimiento de árboles, en particular de la especie *Austrocedrus chilensis*. El objetivo es proporcionar información relevante sobre la incidencia de heladas tardías en la región del Maule y evaluar la capacidad de estos cipreses para registrar las heladas primaverales. Los árboles analizados se encuentran en la misma provincia que la estación General Freire de Curicó, de la cual se han obtenido datos instrumentales.

1.2 ESTADO DEL ARTE

1.3.1 Impactos del cambio climático en la agricultura a nivel nacional

Una consecuencia del cambio climático en Chile es el desplazamiento de las zonas de producción vitivinícola. Se proyecta que hacia el año 2050 lugares como Valdivia podrían convertirse en importantes productores de vino. Según un estudio de la Universidad Austral y el Instituto de Ecología y Biodiversidad, se prevé la pérdida de una gran parte de las áreas actuales aptas para el cultivo de viñas, pero también se anticipa la apertura de nuevas áreas en lugares hasta ahora poco comunes, como Talca y Valdivia (ODEPA, 2013a).

Según el jefe de la División de Recursos Naturales del Ministerio del Medio Ambiente, en Chile más cálido se están observando cambios en los límites agrícolas. Por lo tanto, algunos cultivos que solían desarrollarse en la zona central del país ahora necesitarán ser cultivados más al sur. Este fenómeno ya está siendo evidente, como en el caso de los frutales como el kiwi, cuya maduración temprana está dificultando los procesos de exportación al llegar a los países de destino antes de tiempo (ODEPA, 2013a).

1.3.2 Relación de las heladas con el cambio climático.

Según la ODEPA (2013a), el incremento de la temperatura tendrá repercusiones en todo el territorio. Esto sugeriría que los episodios de heladas no estarían vinculados al cambio climático; de hecho, su frecuencia debería disminuir considerando el aumento general de las temperaturas.

Por otra parte, Reyes y Salazar-Parra (2020), indican que el cambio climático ha producido una variación en la frecuencia o intensidad de los fenómenos climáticos extremos, los cuales incluyen las heladas primaverales. Esto se evidencia con los datos de la estación meteorológica de Cauquenes, ubicada en la región del Maule, en la cual se realizó un análisis de los días con temperaturas inferiores o iguales 0°C en septiembre y octubre, el cual tuvo como resultado un incremento de las heladas primaverales a partir del 2010.

En la región centro-sur, se evidencia una tendencia a la disminución anual de los días con heladas, con variaciones notables durante la primavera. Por ejemplo, en Curicó, se observa un descenso de 2 días por década entre 1961 y 2018. Esta reducción es especialmente marcada desde la década de los '70, cuando se pasó de un promedio de más de 35 días de heladas al año a alrededor de 20 días desde 1977 en adelante. Sin embargo, si se analiza únicamente el período entre 1977 y 2018, la tendencia a la disminución de los días con helada desaparece, mostrando incluso una leve tendencia positiva (Bravo y Vidal, 2020)

1.3.3 Horas de frío

Si bien, el frío intenso en primavera puede provocar consecuencias irreversibles en los cultivos, las bajas temperaturas que ocurren durante el invierno son necesarias para su correcto crecimiento, por lo que cada especie necesita un número determinado de horas de frío para que surjan los brotes, crezcan las hojas y frutos (Viñas, 2017).

Las horas de frío son de gran importancia en el proceso de adaptación, aclimatación y la productividad de los frutales (Mendoza, 2020a). Esto se debe a que una gran parte de las plantas templadas perennes tienen un periodo de reposo durante el invierno, lo cual tiene como finalidad evadir las temperaturas congelantes de los días más fríos. Cuando ocurre el periodo de reposo, las plantas se desprenden de sus hojas, quedando las yemas expuestas a temperaturas muy bajas. Para poder enfrentar las temperaturas de congelación, las yemas entran en un estado de reposo inducido por el ácido abscísico, el cual es producido por las hojas del mismo árbol antes de comenzar el otoño. Este reposo culmina cuando se cumplen cierta cantidad de “horas de frío”, bajo 7,2°C, las cuales varían dependiendo de la especie (Tabla1). Es gracias a ello que las plantas pueden contar la duración del invierno y así saber cuándo llega la primavera (Santibáñez, 2017).

Tabla 1: Requerimiento de horas-frío de los árboles frutales más cultivados en la Región del Maule.

Especie	Horas de frío	
Frambueso	750	1700
Manzano	200-800	1700
Kiwi	800	1400
Cerezo	500-800	1500
Arándano	700	1200

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Instituto de Investigaciones Agropecuarias [INIA] (s.f.) & Flores (2007).

Se ha comprobado que la falta de horas-frío en invierno provoca una demora en la salida del estado de receso de los árboles, puesto que las yemas se abren tardíamente, retrasando así la brotación y floración (Razeto 2006; Mendoza, 2020b).

También, es de relevancia mencionar que tanto el fenómeno de El Niño como de La Niña provocan anomalías en las horas-frío, por lo que la actividad frutícola es altamente vulnerable cuando ocurren estos fenómenos (P. González, 2004).

1.3.4. Estudios dendrocronológicos en el hemisferio sur

La dendrocronología ha posibilitado una amplia gama de descubrimientos científicos en campos como la ecología, el clima, la geomorfología, la hidrología y la arquitectura. No obstante, esta disciplina no se expandió a Sudamérica hasta las últimas décadas del siglo XX, específicamente entre 1980 y 1990, cuando comenzó a surgir un considerable número de dendrocronólogos en Chile y Argentina. Como resultado, la investigación en temas dendrocronológicos experimentó un crecimiento notable en la región (Núñez, 2022).

En este sentido, uno de los hallazgos más destacados de esta ciencia en Chile y Sudamérica ha sido la reconstrucción de las precipitaciones históricas en la cordillera de Los Andes durante el último milenio. Estas reconstrucciones han permitido determinar que el clima en la zona central de Chile ha sido históricamente altamente variable, con períodos de sequías intensas seguidos de años de abundantes lluvias, a lo largo de más de mil años (Núñez, 2022).

1.3.5 Especies de árboles estudiadas en Chile

En Chile, las especies de coníferas como las araucarias, los cipreses y el alerce son ampliamente utilizadas debido a las características de su madera. No obstante, en los últimos años se han incorporado nuevas especies, especialmente aquellas provenientes del bosque mediterráneo, el cual ha sido escasamente estudiado en esta disciplina, pero posee un gran potencial para investigar los efectos de la megasequía que afecta a la zona central del país. Las especies con las que se han obtenido mejores resultados son el peumo y el belloto del norte, los cuales se destacan por mostrar claramente sus anillos de crecimiento y ser sensibles ante las precipitaciones (Núñez, 2022).

1.3.6 Ciprés de la cordillera

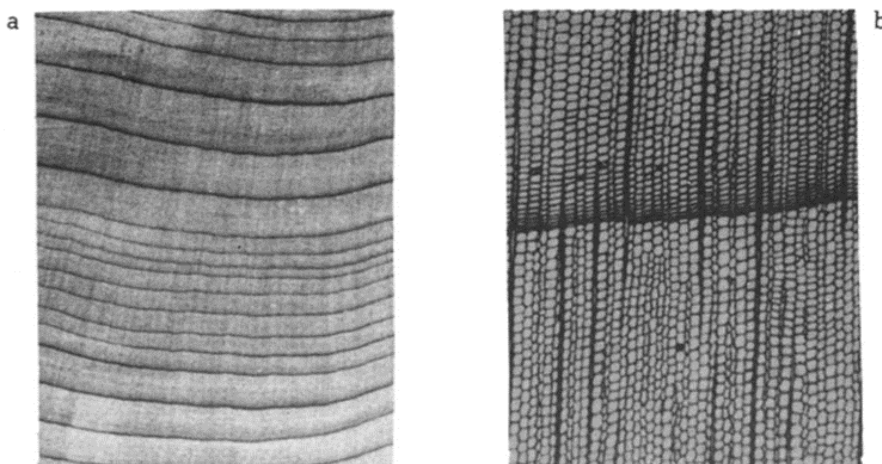
El *Austrocedrus chilensis*, conocido comúnmente como Ciprés de la Cordillera, es una especie de la familia Cupressaceae que puede alcanzar hasta 25 metros de altura (Jorquera, 2012; Ravanal, 2021). Se encuentra principalmente en la Cordillera de Los Andes, entre los paralelos 34°25' y 44° de latitud sur. Se extiende desde los 40° de latitud sur hasta las laderas de la Cordillera de la Costa. En su distribución, se sitúa entre los 1.500 y 2.000 metros sobre el nivel del mar en la región centro-norte, disminuyendo gradualmente su altura hacia el sur (Díaz-Vaz, 1985).

Cada año, el Ciprés de la Cordillera forma un anillo de crecimiento que encapsula toda su historia ambiental. La suma de estos anillos revela la edad del árbol, mientras que el grosor de los mismos proporciona valiosa información climática. Esto ha llevado a una variedad de investigaciones en campos como las ciencias ambientales, la ecología, el clima, la geomorfología e incluso la arqueología (CONICYT, 2019).

1.3.7 Investigaciones de ciprés de la cordillera en Chile

Dentro de las investigaciones llevadas a cabo sobre *Austrocedrus chilensis*, destaca el trabajo de Díaz-Vaz (1985), quien proporcionó una breve descripción anatómica. En ella, señaló que los anillos de crecimiento de esta especie se caracterizan por una banda estrecha y distintiva de madera tardía. Esta banda suele ser más oscura que el resto del anillo y presenta típicamente un patrón sinuoso. El grosor de esta banda varía desde aproximadamente 1 mm hasta cerca de 1 cm, como se ilustra en la Figura 2.

Figura 2: Sección transversal (a) y corte transversal (b) de *Austrocedrus Chilensis*.



Fuente: Díaz-Vaz (1985)

Otro estudio relevante sobre los anillos de crecimiento de *Austrocedrus chilensis* fue realizado por Le Quesne et al. (2014). En esta investigación, se recolectaron 1400 muestras de árboles vivos y 600 de madera antigua, lo que permitió determinar la edad aproximada del árbol más longevo, estimada en alrededor de 1427 años.

Por otra parte, Rojas-Badilla et al. (2017), caracterizaron anomalías anatómicas en los anillos de crecimiento anuales en las poblaciones más septentrionales y longevas de *Austrocedrus chilensis* en Chile central. Como resultado indican que esta especie es adecuada para investigaciones sobre anillos ausentes, especialmente en su población más septentrional. También sugieren que los anillos por congelamiento son más comunes en árboles jóvenes en los tres sitios analizados.

Unos años más tarde, Ravanal (2021) creó una base de datos de anillos de congelamiento, con la cual pudo concluir que el *Austrocedrus chilensis* es una especie óptima para investigaciones dendrocronológicas en el hemisferio sur de América. Esto se debe a la

claridad de sus anillos de crecimiento, su longevidad y su resistencia a diversos disturbios o cambios ambientales.

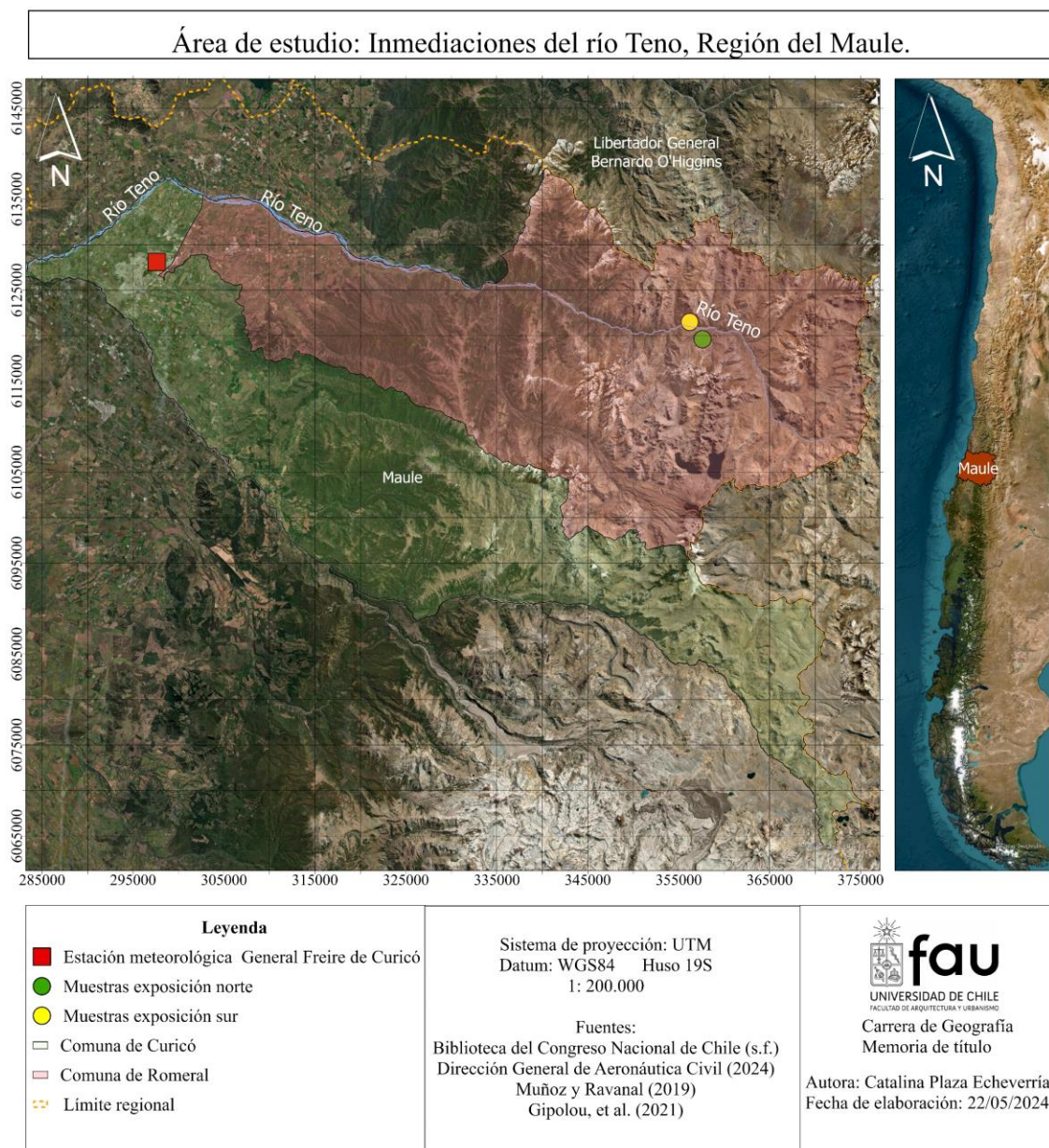
Recientemente, Muñoz-Salazar et al. (2022), investigaron los anillos de congelamiento y evaluaron la capacidad del Ciprés para registrar heladas de primavera. Se estudiaron 5 sitios en donde crecían estos árboles y se relacionaron con los datos de la estación meteorológica de Rengo. Los resultados indicaron que la edad de los árboles influye en su capacidad de registrar heladas y que los anillos de esta especie son un indicador confiable para ello.

En el contexto actual de incremento de temperaturas en el centro de Chile, se está observando un comienzo más temprano de la actividad cambial en las plantas leñosas durante la primavera. Esto implica un incremento en el riesgo de heladas primaverales. Los registros multiseculares de anillos de heladas de *Austrocedrus chilensis*, obtenidos tanto de árboles vivos como de madera muerta relictas, emergen como un indicador valioso. Estos registros tienen un gran potencial para evaluar la ocurrencia y evolución de las heladas al final de la primavera, proporcionando una perspectiva a largo plazo que ayuda a contextualizar la variabilidad climática actual en Chile central (Muñoz-Salazar et al., 2022).

1.4 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio (Figura 3) se ubica en la región del Maule, especialmente en las comunas de Curicó y Romeral, lugares en los cuales se ubica la estación meteorológica General Freire y las muestras de anillos de Ciprés de la cordillera recolectadas por el Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral. Ambos lugares están situados cerca del río Teno.

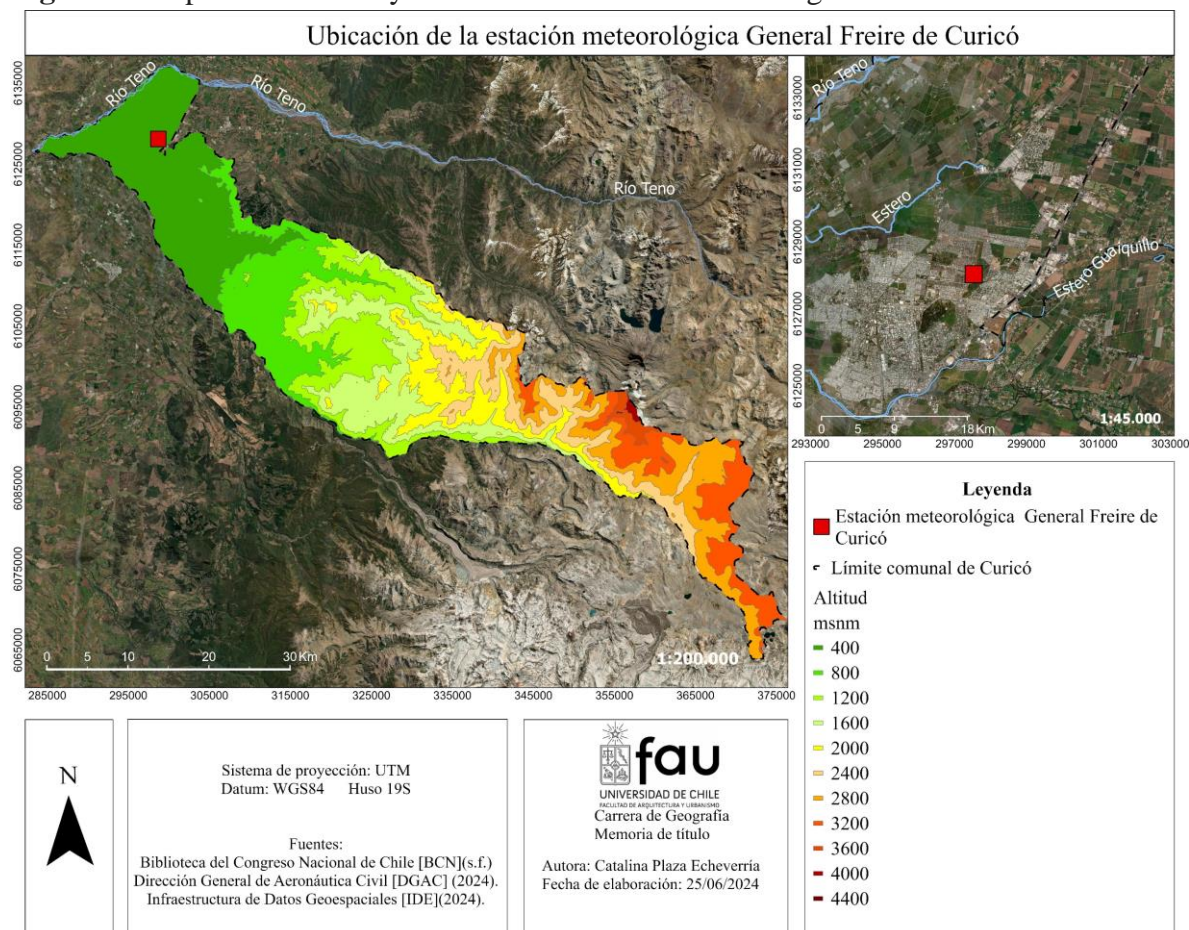
Figura 3: Cartografía del área de estudio: comunas de Curicó y Romeral, Región del Maule.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Muñoz y Ravanal (2019), Gípolou, et al., (2021) y la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN] (s.f.-b).

La estación meteorológica General Freire (Figura 4), cuyo código nacional es 340031, está localizada en el aeródromo del mismo nombre en el valle de la comuna de Curicó, a una altitud de 225 metros sobre el nivel del mar (Dirección General de Aeronáutica Civil [DGAC], 2024).

Figura 4: Mapa de ubicación y altitud de la estación meteorológica General Freire de Curicó.

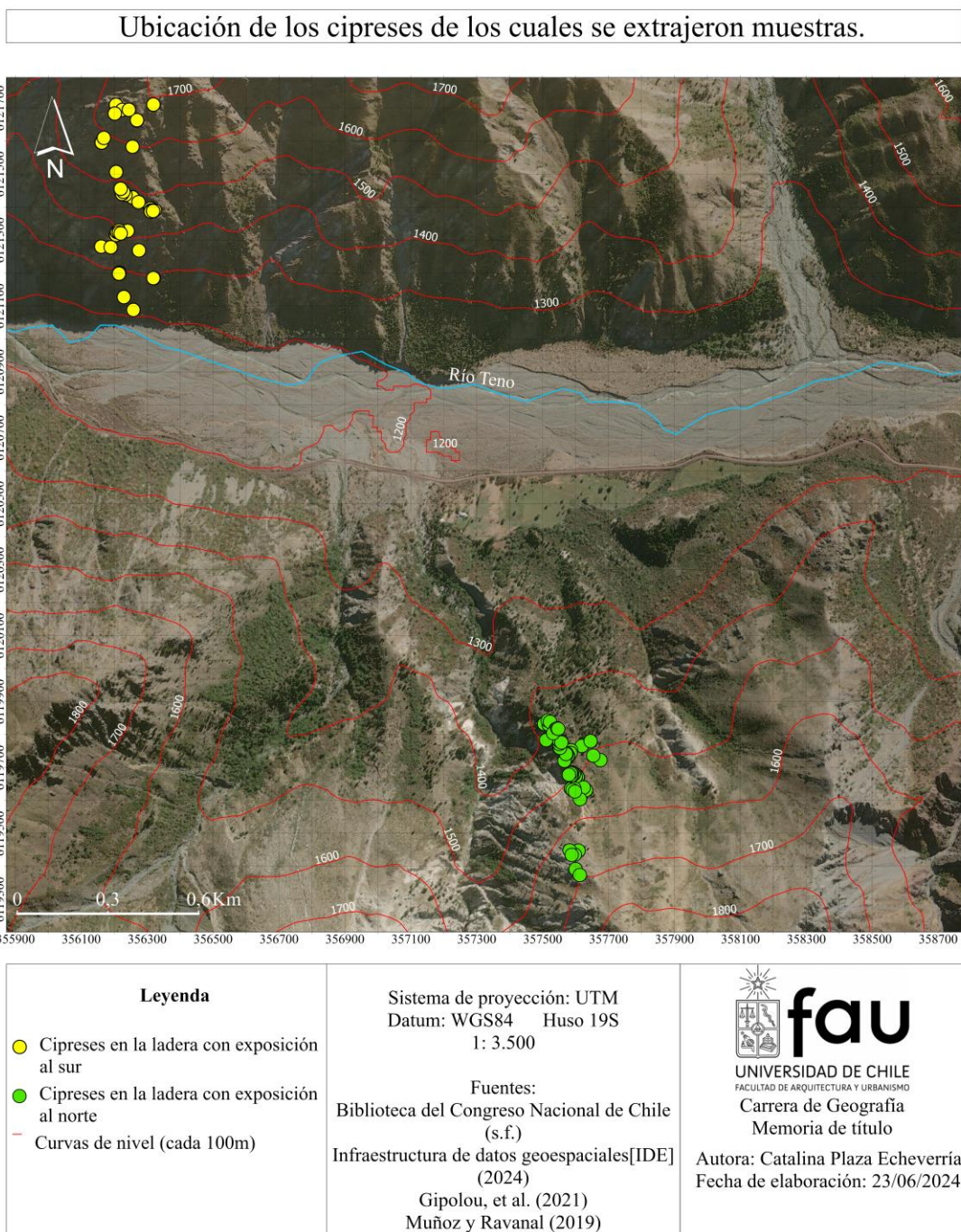


Fuente: Elaboración propia en base a datos de BCN (s.f.-b), la Dirección General de Aeronáutica Civil (2024) e Infraestructura de Datos Geospaciales (2024).

Las muestras que se analizaron se obtuvieron de árboles ubicados en la localidad Los Cipreses, comuna de Romeral (Figura 5). Este lugar se ubica a una distancia de 60,4 kilómetros de la estación meteorológica General Freire.

Los cipreses que se muestrearon crecieron en la ladera norte y sur del río Teno. Este río fluye a través de la cordillera de los Andes y tiene su origen en las lagunas del mismo nombre. Se forma a partir de la unión de los ríos Nacimiento y Malo, abarcando un área de drenaje de 1.590 km² y extendiéndose a lo largo de 102 km (DGA, 2010).

Figura 5: Ubicación de los *Austrocedrus chilensis* muestreados



Fuente: Elaboración propia en base a BCN (s.f.-b), IDE (2024), Muñoz y Ravanal (2019) y Gipolou, et al. (2021).

1.4.1 Geomorfología

En la región del Maule se distinguen unidades características de la zona central: la Cordillera de los Andes, la Precordillera, la Depresión Intermedia, la Cordillera de la Costa y las Planicies Litorales (DGA, 2017).

La cordillera de los Andes se caracteriza por tener una extensa llanura de origen volcánico, desarrollada a 2500 msnm (en promedio), presentando una suave pendiente hacia el oeste, la cual generalmente se encuentra atravesada por cursos de agua de valles profundos y abruptos causados por la erosión glaciaria (DGA, 2017).

Las laderas más expuestas al calor suelen mostrar una mayor diversidad, tanto en ecosistemas de alta montaña templados como en ecosistemas boreales (Winkler et al. 2016; D. González, 2023).

1.4.2 Clima

La región del Maule presenta un clima templado cálido, caracterizado por un período seco de 4 a 5 meses y lluvias intensas concentradas en el invierno, las cuales representan aproximadamente el 75% de todas las precipitaciones anuales (Dirección General de Aguas [DGA], 2017).

Durante la primavera y el verano, las precipitaciones disminuyen considerablemente, registrándose generalmente menos de 40 mm mensuales. Por otra parte, en invierno, la acumulación de precipitación sólida alimenta los ríos durante las estaciones estivales (DGA, 2017).

Hacia el interior de la región, las precipitaciones aumentan, registrando 800 mm en la costa y alcanzando hasta los 1000 mm en Linares (DGA, 2017).

La temperatura promedio durante el verano es de 19°C, con máximas que alcanzan los 30°C, a diferencia del invierno, donde las temperaturas mínimas promedio descienden a 7°C (BCN, s.f.-a).

1.4.3 Vegetación

En esta región la vegetación dominante presenta variaciones, generalmente en sentido oeste-este (BCN, s.f.-a).

Hacia la Cordillera de la Costa, prevalece la estepa de espino y matorral esclerófilo en áreas con mayor humedad. En contraste, en la precordillera de los Andes, se despliega el bosque

esclerófilo, habitado por especies como maitén, quila, quillay, peumo y boldo, con altitudes que oscilan entre los 400 y 600 metros (BCN, s.f.-a).

Los bosques de *nothofagus* se localizan a altitudes superiores a los 600 metros y en áreas húmedas. Denominado "bosque maulino", este hábitat alberga especies como el roble maulino, canelo, lingue, olivillo y coigüe. Por encima de los 800 a 1000 metros, este tipo de bosque se asocia con el canelo, olivillo y mañío (BCN, s.f.-a).

El *nothofagus obliqua*, popularmente conocido como bosque de robles, se encuentra situado por encima de los 1.200 metros en la Cordillera de los Andes. Por lo general, los cipreses de la cordillera y los cedros crecen a altitudes de alrededor de 2.000 metros (BCN, s.f.-a).

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Analizar datos dendrocronológicos e instrumentales de temperaturas extremas de Curicó, y su relación con los anillos de congelamiento.

1.5.2 Objetivos específicos

- 1) Compilar y analizar los eventos de heladas tardías registrados en Curicó
- 2) Relacionar los anillos de congelamiento con las heladas tardías registradas en Curicó

CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

Para realizar esta investigación se analizaron las heladas de primavera desde el año 1926 hasta el 2022. La elección de este intervalo temporal se justifica por el inicio de los registros instrumentales en Curicó en 1926 y la disponibilidad de un registro completo de los meses de primavera hasta el año 2022 al momento de llevar a cabo la investigación.

2.1 COMPILACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS EVENTOS DE HELADAS TARDÍAS REGISTRADOS EN CURICÓ

2.1.1 Recopilación de datos.

Inicialmente, se empleó el software Excel para la digitalización de los datos climáticos del periodo 1926-1950 provenientes de la estación General Freire de Curicó. Esto fue necesario ya que dichos datos se hallaban exclusivamente en fotografías de registros en papel.

Luego, se descargaron los datos climáticos desde el año 1951 hasta el 2022, los cuales se encontraban disponibles en el Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2].

Para efectos de esta investigación se consideró desde principios del mes de septiembre hasta finales del mes de diciembre como meses de primavera. Los datos que se consideraron fueron: la temperatura mínima de los días de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, y la temperatura media.

Posteriormente, se elaboró una tabla en Excel para agrupar los años en los cuales se registraron los eventos más críticos de heladas de primavera. Con base en esta información, se creó un gráfico para cada uno de estos años, representando la temperatura de todos los días del mes (o meses) en los que se observaron estas anomalías.

2.1.2 Comparación entre los datos encontrados y los representados en plataformas climáticas

Se emplearon los reanálisis atmosféricos ECMWF ERA-20C y NOAA-CIRES-DOE 20CR3, disponibles en la plataforma Climate Reanalyzer para comparar la temperatura de primavera de cada uno de los años destacados anteriormente con la de otro período. La selección del reanálisis dependió de la precisión con la que la plataforma representara la temperatura del mes o meses sujetos a análisis.

Además, se comparó la temperatura de los días en que se registraron heladas con la temperatura de los años 1980 y 2010, los cuales también fueron registrados en la misma estación. Estos datos se obtuvieron del Explorador climático del CR2.

2.1.3 Identificación del índice de Oscilación Sur (SOI)

El índice de Oscilación Sur (SOI) registra las diferencias de presión atmosférica entre Tahití y Darwin, siendo un muy buen indicador de las variaciones de los campos de presión en el pacífico tropical. El SOI tiene valores negativos en la fase “El niño”, positivos cuando se presencia “La niña” (Tabla 2) (González-Reyes y Muñoz, 2013) y cercano a cero cuando las condiciones son neutrales (la presión se encuentra normal) (Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño [CIIFEN], 2022).

Tabla 2: Clasificación del índice SOI

Categoría SOI	Valor
El Niño Muy Fuerte (-)	-3,4 a -2,00
El Niño Fuerte (-)	-1,90 a -1,50
El Niño Moderado (-)	-1,40 a -1,00
El Niño Débil (-)	-0,90 a -0,60
Neutro	-0,50 a 0,50
La Niña Débil (+)	0,60 a 0,90
La Niña Moderado (+)	1,00 a 1,40
La Niña Fuerte (+)	1,50 a 1,90
La Niña Muy Fuerte (+)	2,00 a 3,00

Fuente: Calcumil (2017)

En base a lo anterior, se revisó el valor del índice de Oscilación Sur (SOI), disponible en University of East Anglia (s.f.), con el objetivo de saber si estuvo presente El Niño-Oscilación del Sur en la fecha en donde hubo significativas anomalías negativas.

2.1.4 Relación del clima con el Anticiclón del Pacífico Sur.

Una variable destacada que refleja eficazmente la incidencia de heladas en la zona central de Chile es la presión atmosférica al nivel del mar. La región de alta presión vinculada a sistemas anticiclónicos, como el anticiclón Subtropical del Pacífico Sur, guarda una estrecha relación con la disminución de temperatura durante la noche, sobre todo cuando la atmósfera posee escasa humedad o vapor de agua (Quintana, 2020).

Para poder visualizar cómo se encontraba el anticiclón en los días seleccionados en que se registraron heladas, se recurrió a los registros de presión media a nivel del mar de la plataforma Climate Reanalyzer (2023).

2.1.5 Indagación de fuentes históricas que documenten la presencia de heladas durante la primavera.

Para estimar las consecuencias que tuvieron las heladas en primavera en la agricultura del sector analizado, se realizó una búsqueda de información histórica en los archivos de la Biblioteca Nacional de Chile. Con este propósito, se eligió el periódico "La Prensa", conocido por su cobertura de sucesos ocurridos en Curicó. En él, se examinaron todos los meses de primavera de los años seleccionados, incluido diciembre. Aunque este último no registró heladas, resultó relevante revisarlo, ya que algunas consecuencias pueden manifestarse a largo plazo. Esto permitió una comprensión más completa de los posibles problemas derivados de las heladas en los meses anteriores.

2.1.6 Identificación el periodo de retorno de las heladas tardías en Curicó

Para determinar el periodo de retorno, inicialmente se elaboró una tabla en Excel que registraba la frecuencia de heladas de primavera para cada año dentro del período analizado. Posteriormente, utilizando estos datos, se contabilizó el número de eventos que ocurrieron, revisando cuantos de estos eran ≥ 1 , ≥ 2 , ≥ 3 , y así sucesivamente hasta llegar al número 11, el que corresponde a la frecuencia más alta del periodo. Luego con esta información se calculó la distribución de Poisson bajo la siguiente ecuación:

$$P=1-e^{-i/n}$$

en donde i es la cantidad de casos que se calculó anteriormente y n es el número total de datos.

Posteriormente, para calcular el periodo de retorno se utiliza esta ecuación:

$$T=1/p$$

en donde p es el número que se obtuvo al calcular Poisson.

2.2 RELACIONAR LOS ANILLOS DE CONGELAMIENTO CON LAS HELADAS TARDÍAS REGISTRADAS EN CURICÓ

2.2.1 Identificación de anillos de congelamiento.

Se utilizaron muestras de anillos de crecimiento de *Austrocedrus chilensis* disponibles en el Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral para identificar

marcas de congelamiento. Además, investigadores del laboratorio facilitaron archivos que muestran la ubicación de los árboles en las laderas norte y sur del río Teno.

Se revisaron un total de 45 tarugos procedentes de árboles expuestos al sur, y 122 tarugos que corresponden a un total de 60 árboles con exposición al norte.

Para examinar las muestras, se empleó un microscopio Nikon SMZ 745, con el cual se identificaron cada uno de los años seleccionados en el objetivo 1. Con ello, se procedió a verificar la presencia de marcas de congelamiento, para así comparar estos resultados con los datos registrados por la estación.

Después de localizar los anillos de congelamiento, se capturaron fotografías de estos con la ayuda de una lupa para obtener una visualización más detallada. Además, se procedió a medir el ancho de los anillos con el fin de establecer una escala precisa.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

3.1. RESULTADOS GENERALES DE LAS HELADAS TARDÍAS REGISTRADAS EN LA ESTACIÓN GENERAL FREIRE, CURICÓ ENTRE LOS AÑOS 1926- 2022.

En Curicó, entre 1926 y 2022, se identificaron 57 años con eventos de heladas tardías. Este número supera a los años en los cuales no se registraron tales eventos. Además, en términos generales, se observa que las heladas primaverales, en su mayoría, se produjeron durante el mes de septiembre.

3.1.1 Heladas registradas durante el mes de septiembre

Durante el periodo 1926-1962 (Tabla 3), se detectaron 18 años en los cuales la temperatura en septiembre fue igual o menor a 0°C. En esos años, se registraron un total de 42 días con estas heladas, siendo la más intensa observada en 1961, con una temperatura mínima de -5,0°C. Además, el año 1951 destacó significativamente por sus anomalías, esto debido a que se caracterizó por haber experimentado un período de cuatro días consecutivos con temperaturas extremadamente bajas.

Tabla 3: Heladas durante el mes de septiembre entre los años 1926-1962

Heladas registradas en septiembre entre 1926 y 1962 en Curicó (°C)																		
Día/Año	1927	1931	1935	1936	1937	1938	1939	1943	1947	1949	1951	1952	1953	1958	1959	1960	1961	1962
1						-2,0						0,0				-0,8		
2															-0,2	-0,2		
3															-1,2		-5,0	
4	-1,5																-0,8	
5														-0,2			0,0	
6						0,0				-1,6								
7										0,0				0,0				
8																	-1,0	-0,6
9	-2,7														0,0			
10															-2,0			
11		0,0													-1,8	0,0		
12				0,0							-2,0	0,0	0,0					
13								-0,8			-1,0						-0,1	
14											-1,0		-1,0					
15							0,0				-2,0							-1,4
16			-1,0															
17					0,0													-1,6
27																		0,0
28									0,0				-1,2					
30									-0,5									

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023) y del CR2 (s.f.).

Entre los años 1963 y 1986 (Tabla 4), al igual que en el periodo anterior, se identificaron 18 años con heladas en septiembre, sin embargo, esta vez se registraron 78 días con temperaturas extremas, es decir, se presentó casi el doble que en el periodo anterior. A pesar de ello, la temperatura más baja no superó los $-3,2^{\circ}\text{C}$, al contrario del periodo antes mencionado, en donde se registró una anomalía negativa más extrema.

Tabla 4: Heladas durante el mes de septiembre entre los años 1963-1986

Heladas registradas en septiembre entre 1963 y 1986 en Curicó ($^{\circ}\text{C}$)																		
Día/Año	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1970	1971	1973	1974	1975	1976	1979	1980	1981	1983	1985	1986
1		-1,6		-2,8						-2,2			-0,2					
2		-2,1		-3,2	-0,2							-0,8	-1,7					
3										-2,4		-1,9			0,0		-0,2	0,0
4			-1,2							-0,4		-1,1						-0,7
5			-1,9															
6			-1,4		-1,8				-2,8	-1,0	0,0	-2,7						
7			-1,9		-0,2				-2,2	-0,5	-2,1	-1,0				-0,2		
8	-2,2								-1,5			-2,2				-1,2		
9	-1,9					-0,6					-0,6	-1,0						
10	-0,7					-1,6					-0,8	-0,3						
11	-0,6		-1,5															
12	-0,3		-1,4			-1,2												
13															-0,1			
14			-2,0			-0,6			-1,0						-0,4			-0,8
15								-0,9	-1,1					-0,4				
16									-1,1									
17																		-1,0
18							-0,4		-0,2	-0,2								
19					-2,6		-0,2		-0,3									
20					-1,6										-0,2			
21					-0,2			-0,5							0,0			
23					-0,9													
25					0,0													
27	-1,2																	
28	-0,8	-0,2					-0,2											
30													-0,2					

Fuente: Elaboración propia en base a datos del CR2 (s.f.)

Por otra parte, en años más recientes, entre 1987 y 2022 (Tabla 5), se registraron en 18 ocasiones heladas en septiembre, las cuales suman un total de 35 días con temperaturas muy bajas. Al comparar esto con períodos anteriores, se observa una disminución tanto en la frecuencia como en la intensidad de las heladas.

Tabla 5: Heladas durante el mes de septiembre entre los años 1987-2022

Heladas registradas en septiembre entre 1987 y 2022 en Curicó (°C)																		
Día/Año	1987	1988	1989	1993	1996	1999	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2010	2013	2015	2016	2019
2		-0,2																
3					-1,6												-0,7	-0,8
4					-0,3		-1,0					-0,8					-0,5	
5							-0,2										-0,2	
6								0,0										
7							-0,4											
8			-0,1		-0,2				-1,0									
9			0,0	-0,8		0,1			0,0									
10	0,0	-1,2								-1,4								
11	0,0																	
12			-0,8								-2,5							
13														0,0				
14													-0,1					
17															-2,1			
18															0,0			
23				-0,4											-1,0			
24																		
25				-0,7													-0,1	
28															-1,4			
29															-1,0			

Fuente: Elaboración propia en base a datos del CR2 (s.f.)

3.1.2 Heladas registradas durante el mes de octubre

Según los registros instrumentales de Curicó, se han registrado heladas en octubre solo en 12 años (Tabla 6). En lo que va del siglo XXI no se han observado tales eventos, y las anomalías registradas en el año 1953, que marcó el mayor número de heladas en octubre registrado hasta la fecha, no se han repetido.

Tabla 6: Heladas durante el mes de octubre entre los años 1926-2022

Heladas registradas en octubre entre 1926 y 2022 en Curicó (°C)												
Día/Año	1934	1936	1937	1947	1953	1958	1963	1968	1969	1971	1980	1991
1					-0,9	-0,6						
3						-1,2						
4		0								-1,2		
5					-1,7							
6					-4,2							
7		0			-1,0							
8			0		0							
14							0		-0,8			
15												-1,0
16												-0,8
17				0	-1,2				0			
23											-0,3	
24	0											
27					0			0				
28					-3,2			-0,4				
29								-0,2				

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023) y el CR2(s.f.)

3.1.3 Heladas registradas durante el mes de noviembre

En noviembre, se registró solamente una helada en los 97 años analizados, lo que indica que es un suceso extraordinario para Curicó y su clima característico. Este evento fue de $-1,2^{\circ}\text{C}$ y sucedió el primer día de este mes del año 1952.

3.2. PRINCIPALES AÑOS EN LOS QUE SE REGISTRARON ANOMALÍAS CLIMÁTICAS

Los años destacados son aquellos que se pueden observar en la tabla 7. Se seleccionaron específicamente debido a características especiales como la intensidad de las temperaturas mínimas, su frecuencia de ocurrencia o el mes en que ocurrieron. También se incluyeron años en los que las temperaturas mínimas fueron mayores que en años anteriores.

Tabla 7: Años que se destacaron por sus anomalías climáticas

Año	Mes	Días	Temperatura (°C)
1934	octubre	24	0,0
1936	septiembre	12	0,0
	octubre	4	0,0
		7	0,0
1938	septiembre	1	-2,0
		6	0,0
1947	septiembre	28	0,0
		30	-0,5
	octubre	17	0,0
1951	septiembre	12	-2,0
		13	-1,0
		14	-1,0
		15	-2,0
1953	septiembre	12	0,0
		14	-1,0
		28	-1,2
	octubre	1	-0,9
		5	-1,7
		6	-4,2
		7	-1,0
		8	0,0
		17	-1,2
		27	0,0
28	-3,2		
1961	septiembre	3	-5,0
		4	-0,8
		5	0,0
		8	-1,0
1967	septiembre	2	-0,2
		6	-1,8
		7	-0,2
		19	-2,6
		20	-1,6
		21	-0,2
		23	-0,9
		25	0,0
1973	septiembre	6	-2,8
		7	-2,2
		8	-1,5
		14	-1,0

		15	-1,1
		16	-1,1
		18	-0,2
		19	-0,3
2013	septiembre	17	-2,1
		18	0,0
		23	-1,0
		28	-1,4
		29	-1,0

Fuente: Elaboración propia con datos a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023) y el CR2(s.f.)

3.2.1 1934

Como se observa en el Anexo 1, se registró una helada de 0°C el 24 de octubre de este año.

El reanálisis de ERA 20-C exhibe las anomalías de temperatura en octubre, tomando como referencia el periodo 1981-2010 (véase Anexo 2). Los resultados revelan que, en Chile, en general, se experimentaron temperaturas inusualmente bajas durante este mes, con mayor intensidad en la zona central y el Norte Chico. Asimismo, se observa una tendencia similar en Argentina, con temperaturas más frías. En la región del Maule, se registraron temperaturas más bajas que el promedio en la cordillera, mientras que en el valle se mantuvieron frescas, aunque con menor intensidad.

Estas anomalías no constituyen eventos aislados, ya que los registros históricos señalan que este año fue notablemente lluvioso y marcado por fenómenos poco comunes, aunque no del todo extraños en la climatología del país. Un ejemplo destacado fue una tromba marina que tuvo lugar el 27 de mayo en Concepción, ocasionando daños significativos, incluso afectando el centro de la ciudad (Servicio Meteorológico de la Armada de Chile, s.f.).

Así también, al contrastar la temperatura de octubre de este año con los registros de 1980 y 2010 de la estación General Freire de Curicó se observa que la temperatura del día 24 fue más baja en 1934 que en los otros años mencionados (CR2, s.f.).

Por otra parte, el Índice de Oscilación del Sur durante este mes registró un valor de 0,38 (University of East Anglia, s.f.), lo que sugiere condiciones neutrales, es decir, la ausencia del Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (CIIFEN, 2022)

Por último, al examinar la presión a nivel del mar durante el mes en que se produjo la helada, se observa la presencia del anticiclón del Pacífico Sur, el cual se desplaza a través del centro y sur de Chile antes de dirigirse hacia Argentina. El área de influencia de este anticiclón es

considerablemente mayor que en algunos años en los que no se registraron heladas de primavera (véase Anexo 3).

3.2.1.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1934

Según el periódico de la época, incluso nevó en el mes de octubre. Sin embargo, el Ministerio de Agricultura informó que no se esperaban consecuencias negativas para la agricultura, ya que se trató de una nevisca, la cual contiene nieve con agua, ayudando eso a mitigar su impacto. No obstante, con el transcurso del tiempo, se evidenciaron los daños ocasionados por la última helada, la cual impactó de manera notable a los viñedos. Muchos de ellos resultaron completamente afectados, mientras que otros sufrieron daños parciales debido a las condiciones climáticas adversas (La Prensa, 1934b). Ante esta situación, la Dirección de la Caja de Crédito Agrario tuvo que proporcionar ayuda a los agricultores afectados (La Prensa, 1934a).

A pesar de que se hicieron notorias las repercusiones de las heladas a corto plazo, se esperaron consecuencias negativas en las futuras cosechas (La Prensa, 1934c).

3.2.2. 1936

Durante este año se registraron heladas tardías en dos meses de primavera. Una de ellas fue de 0°C el 12 de septiembre (Anexo 4).

En octubre se registraron dos heladas, una el día 4 y otra el 7, ambas de 0°C (Anexo 5).

Al contrastar las temperaturas de septiembre y octubre de este año con las registradas entre 1900-2010, se observa que la temperatura en Curicó fue ligeramente más baja respecto a ese periodo (véase Anexo 6).

Ahora bien, al comparar las temperaturas de septiembre y octubre de este año con los datos del mismo lugar en Curicó, correspondientes a 1980 y 2010 (CR2, s.f.), se aprecia que en los días 12 de septiembre y 4 y 7 de octubre, la temperatura fue significativamente más baja en 1936 que en los otros dos años mencionados.

En cuanto al Índice de Oscilación del Sur, este registró un valor de 0,23 en septiembre y -0,11 en octubre (University of East Anglia, s.f.), lo cual corrobora la observación de Santibáñez (2016) sobre la ausencia del Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) durante este año.

Por otra parte, como se puede observar en el Anexo 7, durante estos dos meses se registró una amplia área de alta presión, la cual influyó en Curicó y se desplazó hacia Argentina, lo

cual sugiere la existencia de una posible relación con la manifestación de anomalías de temperatura.

3.2.2.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1936

Los estudios realizados por el observatorio el Salto en ese año, explican que a comienzos de octubre se desprendió del frente polar antártico una gran masa de frío que penetró al continente desde la región de Magallanes. Esto desencadenó una ola de frío que invadió el sur de Chile y ráfagas de aire helado en la zona central. Pronto, todo el país se vio invadido por masas de aire polar y una nubosidad típica del invierno (La prensa, 1936b).

Las heladas que tuvieron lugar en octubre provocaron una notable disminución en las exportaciones, dado que estas bajas temperaturas ocasionaron múltiples perjuicios en el sector agrícola. Estas condiciones climáticas son extremadamente raras en Chile (La Prensa, 1936a).

3.2.3. 1938

En septiembre de 1938, se registraron dos eventos de heladas tardías. La primera tuvo lugar el día 1 con una temperatura de $-2,0^{\circ}\text{C}$, y la segunda ocurrió el día 6 con una temperatura de 0°C (véase Anexo 8).

La temperatura en los días anteriormente nombrados fue promedio en comparación con lo que se registró en esa misma fecha en el periodo 1981-2010 (Anexo 9). Esto puede tener relación con que la helada más fuerte ocurrió el 1 de septiembre, casi en un mes de invierno, lo cual hace que sea más probable que se registren temperaturas bajas en esa fecha y no resulta anormal al compararlo con un periodo largo.

Al comparar los días específicos en los que se registraron heladas con los mismos de 1980 y 2010, se observa que no hubo heladas en ninguno de esos años. Por lo tanto, en 1938 se registraron temperaturas fuera del rango normal para esa fecha (CR2, s.f.)

Por otra parte, el índice de oscilación del sur de septiembre fue de 0,69 (University of East Anglia, s.f.), lo cual indica que este año presentó condiciones neutrales.

El Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur se expandió notablemente en esta fecha, abarcando un área considerable, como se detalla en el Anexo 10. Dadas sus características, se puede considerar que fue un evento intenso, siendo probable que este fenómeno haya sido uno de los factores determinantes en la ocurrencia de las heladas durante la primavera.

3.2.3.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1938

Los registros históricos señalan que, a finales de agosto de 1938, una importante masa de aire polar atravesó el país, sin embargo, comenzó a disminuir su influencia el 2 de septiembre debido al desplazamiento del área principal de altas presiones hacia Argentina y Brasil. Luego, la Acción de Meteorología Agrícola del Observatorio del Salto detectó una tendencia atmosférica propicia para el restablecimiento de las lluvias, mientras que reportes de los Observatorios del Pacífico y del Lejano Oriente han destacado el desplazamiento de nuevas masas de aire ecuatorial hacia las regiones templadas del Pacífico Sur. Este fenómeno dio lugar a la formación de una serie de depresiones atmosféricas, cuyos efectos se comenzaron a sentir en el sur de Chile (La Prensa, 1938c).

A pesar de que las heladas de primavera no afectaron negativamente a la agricultura, surgieron inquietudes debido a la sequía, la cual impactó principalmente en las regiones central y norte del país (La Prensa, 1938b). Esta situación provocó un notable aumento en los precios de los productos agrícolas clave (La Prensa, 1938a).

3.2.4. 1947

En 1947, se documentaron tres días con heladas tardías. Los primeros ocurrieron el 28 y 30 de septiembre, con temperaturas de 0°C y -0,5°C, respectivamente (véase Anexo 11). Estas cifras están considerablemente por debajo de la temperatura promedio del mes, que fue de 10,6°C.

Además, el 17 de octubre del mismo año se produjo una helada con una temperatura de 0°C. Esto contrasta con la temperatura media del mes, que fue de 14,2°C (ver Anexo 12).

En el Anexo 13 se evidencia que durante septiembre y octubre de 1947, la temperatura en la cordillera de Curicó fue más baja en comparación con los registros del periodo 1981-2000. Además, es relevante destacar que las temperaturas estuvieron por debajo de lo habitual en varios sectores de América del Sur.

Por otra parte, al contrastar estos datos con los registrados en la estación General Freire de Curicó para los años 2010 y 1980, se puede concluir que en ambos años la temperatura en esa fecha fue más alta que en 1947, a excepción del 1 de octubre de 2010, que fue más frío. También es importante destacar que, de manera general, la temperatura mínima en el año 2010 fue más baja que en 1980 (CR2, s.f.).

El Índice de Oscilación del Sur para septiembre y octubre fue de 1,1 y -0,35, respectivamente. Aunque el valor de septiembre sugiere la presencia del fenómeno de La Niña, el promedio del SOI de ese año fue de 0,16 (University of East Anglia, s.f.), lo que indica un año más

bien neutro. Según Santibañez (2016), este año se caracterizó por su sequedad, al menos en la zona central del país.

En el Anexo 14 se observa que, en esta fecha, el anticiclón del Pacífico Sur se expandió sobre una amplia área y parece desplazarse hacia la región argentina, posiblemente causando heladas poco comunes para estos meses.

3.2.4.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1947

Aunque hay algunas lagunas en los registros escritos de este año, se encontraron pruebas que respaldan la existencia de una ola de aire polar que cruzó el país a mediados de septiembre. Este fenómeno resultó en temperaturas cálidas en el interior del centro y norte del país, mientras que en el sur comenzó un nuevo período de mal tiempo (La Prensa, 1947).

3.2.5. 1951

Como se puede observar en el anexo 15, en 1951 se registraron heladas tardías durante cuatro días consecutivos; el 12, 13, 14 y 15 de septiembre, de $-2,0^{\circ}\text{C}$, $-1,0^{\circ}\text{C}$, $-1,0^{\circ}\text{C}$ y $-2,0^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

La temperatura en Curicó durante septiembre de 1951 fue ligeramente más baja, aproximándose al promedio, en comparación con el periodo 1981-2010. En varios lugares de América del Sur, la temperatura fue similar al promedio o considerablemente más baja que la de ese periodo (Anexo 16).

Al comparar la temperatura de los mismos días y lugar en que se presentaron estas heladas, pero de los años 1980 y 2010, se obtuvo que en el año 2010 la temperatura mínima fue mayor que la de 1951, aunque igualmente hubo una helada durante el día 13. En el año 1980 también se registró una helada el día 15, sin embargo, el resto de la temperatura fue considerablemente más alta que en 1951 (CR2, s.f.).

El Índice de Oscilación del sur de septiembre fue de $-1,17$ (University of East Anglia, s.f.), lo que sumando los antecedentes de Santibañez (2016), se puede afirmar que en este año ocurrió el fenómeno del Niño en su fase moderada.

En el anexo 17 se muestran los niveles de presión del mar, en donde se puede observar una alta presión “choca” contra el continente, mientras que una baja presión emerge desde el sur.

3.2.5.1. Información histórica documentada en periódicos del año 1951

Las heladas de primavera surgieron a raíz de la expansión del aire ecuatorial, que desplazó el frente polar hacia latitudes superiores. Durante este proceso, el clima se volvió mayormente seco y la temperatura aumentó. Sin embargo, en un momento determinado, las masas de aire frío atravesaron las líneas de discontinuidad, permitiendo la llegada de un potente anticiclón antártico (La Prensa, 1951a).

El Ministerio de Economía decidió desregular los precios de productos como porotos, lentejas, garbanzos, maíz, papas y curaguilla en respuesta a los impactos causados por fenómenos climáticos y plagas agrícolas. Estas condiciones provocaron una notable disminución en los rendimientos de varios cultivos agrícolas y hortícolas (La Prensa, 1951c). Finalmente, se informó que la producción de vinos del próximo año (1952) será menor que la de este año, debido a las heladas que han afectado a las plantaciones (La Prensa, 1951b).

3.2.6 1953

En este año se registraron heladas tardías en septiembre y octubre. En el primer mes, tal como se puede visualizar en el Anexo 18, ocurrieron específicamente en los días 12 (0°C), 14 (-1,0) y 28 (-1,2°C). En el segundo mes, se registraron 8 días con heladas, siendo esta la mayor cantidad que se ha registrado en octubre (considerando todo el periodo analizado). Esos días fueron el 1, 5,6,7,8,17, 27 y 28, en donde la helada más intensa fue de -4,2°C (Anexo 19).

Si se tiene como referencia el periodo 1981-2010, a modo general, se puede afirmar que la temperatura de septiembre y octubre del año 1953 fue más baja en gran parte de Chile, a excepción del Norte Grande (Anexo 20).

Por otra parte, al comparar la temperatura de cada uno de los días en que hubo heladas con la de los mismos días, pero de los años 1980 y 2010, se puede concluir que, en todos los casos, la temperatura siempre fue más fría en el año 1953 que en los otros (CR2, s.f.).

El Índice de Oscilación del sur del mes de septiembre fue de -1,35, mientras que el de octubre fue de -0,18 (University of East Anglia, s.f.), a partir de esto y, sumado a lo que menciona Vargas (1984), se puede concluir que en este año se experimentó el Fenómeno de El Niño de intensidad moderada.

Durante los dos meses anteriormente mencionados, se visualizó cerca de la costa una zona de alta presión correspondiente al Anticiclón del Pacífico Sur (Anexo 21).

3.2.6.1. Información histórica documentada en periódicos del año 1953

La primavera de 1953 se destacó como una de las mayores alteraciones atmosféricas registradas desde 1918. Este fenómeno se atribuyó a las importantes fluctuaciones en la radiación solar, que comenzaron en agosto y se intensificaron en septiembre. Las fluctuaciones de energía solar pueden provocar alteraciones atmosféricas que no son comunes en ciertas estaciones del año (La Prensa, 1953b).

El mal tiempo tuvo consecuencias devastadoras en la agricultura local. La mayoría de las siembras se retrasaron considerablemente y algunas no se hicieron por el temor de perder incluso las semillas. Especialmente, el área occidental de Curicó sufrió graves pérdidas al perder por completo sus cultivos de trigo. Además, los árboles frutales también se vieron afectados por el frío, lo que resultó en una cosecha muy reducida. Estas repercusiones negativas en la agricultura pueden rastrearse hasta el año 1954 (La Prensa, 1953a).

3.2.7 1961

Este año es bastante relevante en la historia climática de Curicó, ya que en él se produjo la helada de primavera más intensa de la cual se tenga registro. Específicamente, ocurrió el 3 de septiembre y fue de $-5,0^{\circ}\text{C}$, mientras que los días que le prosiguieron (5 y 6) tuvieron heladas de $-0,8^{\circ}\text{C}$ y 0°C , ocurriendo el día 8, del mismo mes, la última helada ($-1,0^{\circ}\text{C}$) (Ver anexo 22).

Al observar el reanálisis de ERA-20C (Anexo 23), en donde se muestra una comparación entre este año y el periodo 1981-2010, se puede apreciar que, en efecto, la temperatura fue mucho más fría en casi todo Chile durante el mes de septiembre del año 1961, destacándose aún más esta anomalía en el Norte Chico.

Por otra parte, la temperatura de dichas fechas, en donde hubo heladas, no se replicó ni se acercó a los valores que se registraron en 1980 y 2010, puesto que en esos mismos días los valores fueron positivos y distintos de cero (CR2, s.f.) lo cual indica que las heladas que se registraron no corresponden a un comportamiento común en el clima de Curicó.

Por otra parte, el Índice de Oscilación del Sur del mes de septiembre fue de 0,11 (University of East Anglia, s.f.), lo cual indica que, a pesar de que existieron anomalías de temperaturas, fue un periodo neutral, en el cual las presiones estuvieron normales (CIIFEN, 2022).

En este mes, tal como se puede observar en el Anexo 24, se encuentra la presencia del Anticiclón del Pacífico Sur. Este fenómeno, posee una intensidad mayor que el del año anterior, el cual avanzó más hacia el interior, pasando por el centro de Chile y sus alrededores, para posteriormente encontrarse con la barrera de la cordillera de Los Andes.

3.2.7.1. Información histórica documentada en periódicos del año 1961

Los registros escritos indican que a principios de septiembre hubo una intensa ola de frío penetrante (La Prensa, 1961a), sin embargo, aquello no causó daños significativos si se le compara con el temporal que comenzó a mediados de mes. Este último evento provocó la completa destrucción de los cultivos (La Prensa, 1961b).

3.2.8 1967

Este fue uno de los años en que se registraron una mayor cantidad de heladas en septiembre, con un total de 8, que van desde los 0°C hasta los -2,6°C (ver Anexo 25).

Al comparar la temperatura de septiembre de este año con la del periodo 1981-2010 (Anexo 26), se puede afirmar que en ese periodo las temperaturas no fueron tan bajas como las del año 1967.

Las temperaturas que se registraron durante los días con heladas fueron una excepción en el clima habitual de la comuna puesto que, al revisar esos mismos días, pero de los años 1980 y 2010, se puede comprobar que los grados distan mucho de ser bajo cero (CR2, s.f.).

El Índice de Oscilación del Sur del mes anteriormente mencionado fue de 0,44 (University of East Anglia, s.f.), lo cual significa que al igual que el año anterior, las condiciones y la presión fueron normales (CIIFEN, 2022).

En el Anexo 27, se puede observar que los vientos del anticiclón pasan por Curicó y cruzan la cordillera de los Andes, desplazándose hacia Argentina.

3.2.8.1. Información histórica documentada en periódicos del año 1967

Aunque no se hallaron registros escritos sobre la presencia de heladas, sí se encontraron registros de lluvia a principios de octubre. Este evento preocupó a los agricultores, ya que tanto los perales como los guindos pueden perder prematuramente sus flores, lo que resulta en una menor producción de fruta (La Prensa, 1967).

3.2.9 1973

En este año, se registraron 8 heladas solo en el mes de septiembre, siendo el día 6 el más frío, con -2,8°C (Anexo 28).

A pesar de ello, al observar el Anexo 29, se puede concluir que la temperatura en septiembre, con respecto al periodo 1981-2010, fue promedio.

Ahora bien, si se compara con la temperatura que se registró en los mismos días con heladas, pero de los años 1980 y 2010, se puede afirmar que hubo un día con temperatura bajo cero, sin embargo, en todos esos días la temperatura fue superior a la de 1973 (CR2, s.f.).

Por otro lado, el SOI del mes en que se registraron heladas fue de 1,27 (University of East Anglia, s.f.), lo cual quiere decir que ocurrió el Fenómeno de la Niña en su fase moderada (CIIFEN, 2022).

Durante un evento de La Niña, el anticiclón subtropical del Pacífico suroriental se refuerza, extendiendo su influencia hacia el sur y bloqueando el avance normal de los sistemas frontales desde el oeste del Pacífico (Anexo 30). Esta situación atmosférica reduce la formación de nubes frontales y, por ende, la precipitación en las zonas central y norte. Los anticiclones subtropicales, con su estabilidad atmosférica y gran extensión vertical y horizontal, impiden la formación de nubes que causan precipitaciones. Esto, a su vez, propicia un enfriamiento nocturno más intenso, aumentando la probabilidad de heladas (Quintana, 2020).

3.2.9.1 Información histórica documentada en periódicos del año 1973

Los eventos políticos de este año obstaculizaron la recopilación de registros de heladas o datos climáticos durante la primavera, ya que las ediciones de los meses de octubre, noviembre y diciembre no fueron archivadas.

La edición de septiembre no aporta ninguna información sobre el clima, lo cual da a entender que posiblemente no hubo ningún impacto de importancia a corto plazo.

3.2.10 2013

Este ha sido el año del siglo XXI en que se han registrado una mayor cantidad de heladas. Estas estuvieron presentes en 5 días, las cuales van desde los $-2,1^{\circ}\text{C}$ hasta los 0°C , en contraste con la temperatura que hubo en otros días, la cual llegó incluso a los $27,7$, por lo que, a pesar de haber varios días con heladas, el promedio de la temperatura media del fue de $10,5^{\circ}\text{C}$ (Anexo 31).

Al revisar el Anexo 32, en donde se compara la temperatura de septiembre de este año con el periodo 1981-2010, se tiene que la temperatura del 2013 fue más baja que la de ese periodo en casi todo el país.

De igual forma, al revisar la temperatura que hubo en los mismos días en que se registraron anomalías, pero de los años 1980 y 2010, se tiene que en ninguno de estos días la temperatura fue más baja que en el año 2013, y tampoco se encontraron heladas (CR2, s.f.).

El SOI del mes de septiembre fue de 0,41(University of East Anglia, s.f.), lo cual significa que las condiciones fueron normales (CIIFEN, 2022).

El anticiclón que se observa en esta ocasión (Anexo 33), es similar al del año anterior, sin embargo, en este la presión no llega a ser tan alta.

3.2.10.1 Información histórica documentada en periódicos del año 2013

Las heladas ocurridas en septiembre tuvieron un impacto severo en la producción hortofrutícola y pusieron en riesgo miles de empleos. Según el Ministerio de Agricultura, en la región del Maule más de 1.400 agricultores se vieron perjudicados. Los cultivos más afectados incluyeron viñedos, nogales, paltos y frutos de carozo, con pérdidas que alcanzaron hasta el 50%, dependiendo de la zona y la especie (La Prensa, 2013b). Tanto fue el daño que se declaró zona de emergencia agrícola (La Prensa, 2013a) y se tuvo que entregar bonos de financiamiento compensatorio a pequeños agricultores para mitigar los efectos de las heladas (La Prensa, 2013c).

3.3 ANÁLISIS DE LAS CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LAS HELADAS TARDÍAS.

3.3.1 Causas de las heladas tardías en los años analizados

Como se puede observar en la tabla 8, que resume el apartado anterior, de los 10 años que se analizaron anteriormente, existió la presencia del fenómeno del Niño en dos ocasiones (1951 y 1953), mientras que el fenómeno de la Niña se manifestó solo una vez (1973). Aunque esto sugiere que el ENSO no tuvo un impacto directo en la incidencia de heladas tardías, es relevante señalar que, en septiembre de 2013, el año más reciente con una mayor cantidad de heladas en primavera, las temperaturas muy bajas fueron atribuibles a la ocurrencia de un fenómeno posterior a "La Niña". En este evento, una masa de aire frío ingresó acompañada de condiciones de escasa nubosidad. Aquello indica que, aunque el ENSO pueda no tener un efecto directo en la ocurrencia de heladas, puede influir indirectamente al propiciar condiciones atmosféricas que favorecen su aparición (ODEPA, 2013b).

Es importante mencionar también que el fenómeno de ENSO podría estar vinculado con un incremento en la frecuencia de días con heladas durante la primavera. Esto se evidencia en el análisis de los años 1953 y 1973, en los cuales se registró un notable aumento en la incidencia de estos eventos.

Tabla 8: Resumen de lo descrito en el apartado 3.2

Años	Heladas en SON	ENSO en SON	Daños en la agricultura
1934	1	No hubo	Sí
1936	3	No hubo	Sí
1938	2	No hubo	No
1947	3	No hubo	Falta información
1951	4	El Niño moderado	Sí
1953	11	El Niño moderado	Sí
1961	4	No hubo	No
1967	8	No hubo	No
1973	8	La Niña moderada	Falta información
2013	5	No hubo	Sí

Fuente: Elaboración propia en base a Calcumil (2017), La Prensa (1934b), La Prensa (1936a), La Prensa (1951c), La Prensa (1953a), La Prensa (2013b) & University of East Anglia (s.f.)

Por otro lado, durante los meses con mayor incidencia de heladas, se observó un patrón similar en el comportamiento del Anticiclón del Pacífico Sur. Por consiguiente, se puede concluir que este sistema atmosférico contribuyó a la creación de las condiciones necesarias para la ocurrencia de tales temperaturas.

Además de lo expuesto previamente, es importante considerar la posible influencia del cambio climático en el comportamiento atmosférico, puesto que se observan cambios en la intensidad y frecuencia de las heladas a lo largo del tiempo.

3.3.2 Consecuencias de las heladas tardías en los años analizados

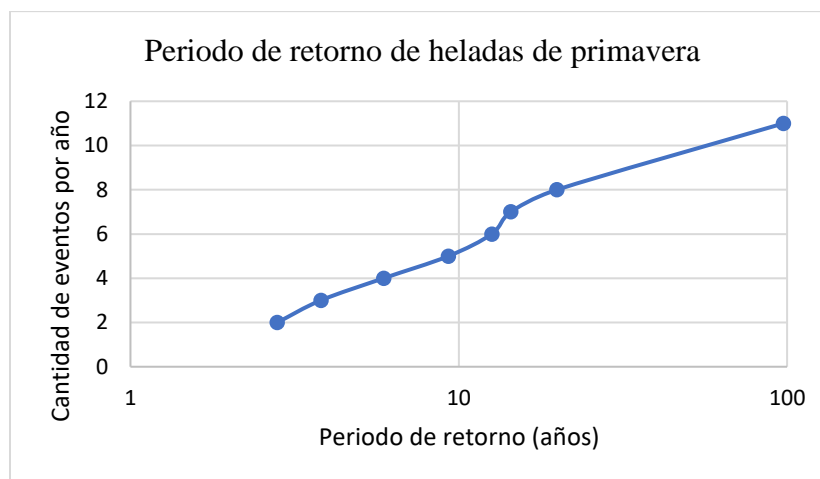
De los 10 años que fueron minuciosamente analizados, se registraron consecuencias negativas por las heladas de primavera en al menos la mitad de ellos, sin considerar aquellos que podrían haber sido afectados, pero para los cuales no se encontró información disponible. De los 5 años en los que hubo consecuencias devastadoras, en 3 se produjeron heladas en octubre y en 2 a mediados o fines de septiembre. Curiosamente, durante los años en los que únicamente se registraron heladas a principios de septiembre, no se observan repercusiones negativas en la agricultura. Esto sugiere que las heladas en primavera pueden tener un impacto más significativo cuando ocurren a partir de mediados de septiembre.

3.4 PERIODO DE RETORNO DE LAS HELADAS TARDÍAS EN CURICÓ

El periodo de retorno de heladas de primavera desde el año 1927 al 2022 incrementa conforme aumenta el número de heladas registradas en cada año, tal como se observa en la

figura 6. La probabilidad de que ocurran 1 o más heladas en primavera es muy similar a la probabilidad de que ocurran 2 o más (2,3 y 2,8 años, respectivamente). En cambio, es muy poco probable que se vuelva a producir un fenómeno como el del año 1953, en el cual se registraron 11 heladas tardías y su periodo de retorno es de 97,5 años.

Figura 6: Periodo de retorno de las heladas de primavera



Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023) y el CR2 (s.f.)

En la tabla 9 se observa el recuento anual de eventos de heladas tardías, revelando una tendencia a la baja desde 1977. Este cambio, de valores negativos a positivos, se observó en todo el país, sugiriendo una respuesta acoplada del sistema climático (Jacques, 2009). Según el estudio de Hartmann y Wendler (2005), es improbable que este fenómeno se deba al cambio climático a largo plazo, ya que, de ser así, el cambio en la temperatura habría sido gradual, sin embargo, fue repentino.

Tabla 9: Frecuencia de heladas tardías durante el periodo 1929-2022.

Año	Eventos	Año	Eventos	Año	Eventos
1926	0	1958	4	1990	0
1927	2	1959	5	1991	2
1928	0	1960	4	1992	0
1929	0	1961	4	1993	3
1930	0	1962	4	1994	0
1931	1	1963	8	1995	0
1932	0	1964	3	1996	3
1933	0	1965	7	1997	0
1934	1	1966	2	1998	0

1935	1	1967	8	1999	1
1936	3	1968	7	2000	0
1937	2	1969	2	2001	3
1938	2	1970	3	2002	1
1939	1	1971	3	2003	2
1940	0	1972	0	2004	1
1941	0	1973	8	2005	1
1942	0	1974	6	2006	1
1943	1	1975	4	2007	1
1944	0	1976	8	2008	0
1945	0	1977	0	2009	0
1946	0	1978	0	2010	1
1947	3	1979	3	2011	0
1948	0	1980	2	2012	0
1949	2	1981	5	2013	5
1950	0	1982	0	2014	0
1951	4	1983	2	2015	1
1952	3	1984	0	2016	3
1953	11	1985	1	2017	0
1954	0	1986	4	2018	0
1955	0	1987	2	2019	1
1956	0	1988	2	2020	0
1957	0	1989	3	2021	0
				2022	0

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023) y el CR2 (s.f.).

Por otra parte, curiosamente se observó que la cantidad de heladas tardías que se registraron en el periodo 2017-2022, son muy similares a las registradas a finales de la década de los 20' s y a principios de los 30' s. No obstante, no hay garantía de que este patrón continúe, ya que el período de retorno para eventos como el ocurrido en 2013 (de aproximadamente 9 años) y el de 2016 (3,8 años), sugiere que es probable que haya más años con heladas en un futuro cercano, a pesar de que se contabilicen 0 heladas en los meses de primavera desde 2020.

Por último, el periodo de retorno sugiere que sería muy importante encontrar marcas de congelamiento pertenecientes al año 1953, ya que, al tener un periodo de retorno muy largo, no se ha presenciado nuevamente este fenómeno, por lo que las marcas de congelamiento son una de las pocas evidencias del daño que puede sufrir el tejido de las plantas ante un evento de tales características.

3.5 ANILLOS DE CONGELAMIENTO PERTENECIENTES A LOS AÑOS DESTACADOS

3.5.1 Resultados generales de las muestras

De los 122 testigos revisados de cuyos árboles se encontraban en exposición al norte (CTE), en solo 2 se encontraron anillos de congelamiento pertenecientes a algunos de los 10 años que se nombraron anteriormente. Por otra parte, de los tarugos de árboles que se encontraban en exposición al sur (TEN) (45 muestras), se identificó solo 1 que, si bien, no presentó un anillo de congelamiento, si se encontró una anomalía que es relevante mencionar

3.5.2 Análisis de los anillos de congelamiento encontrados en la ladera sur, exposición norte del río Teno.

En 1934, se observaron marcas de congelamiento cerca del inicio del anillo de crecimiento en el tarugo CTE 035A (Figura 7), el cuál fue extraído de un Ciprés ubicado a una altitud de 1703 metros sobre el nivel del mar. El hallazgo de estas células anormales significa que la helada que fue registrada en octubre por la estación meteorológica quedó plasmada en la estructura de madera.

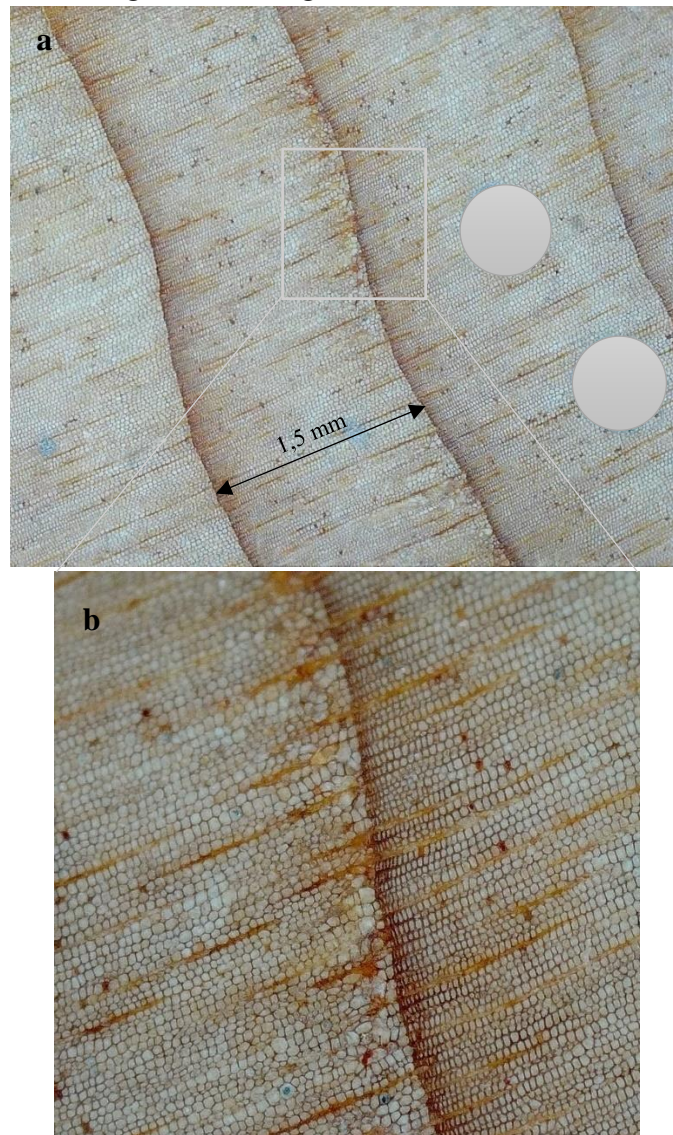
Figura 7: Marca de congelamiento registrada en el año 1934



Fuente: Elaboración propia utilizando muestra de Gipolou, et al. (2021).

En el tarugo CTE 035A también se encontró otra marca de congelamiento, esta vez, perteneciente al año 1951 (Figura 8). En el anillo este último, a diferencia del anterior, se observa una mayor superficie dañada por congelamiento, la cual quedó plasmada al inicio del anillo anual. La ocurrencia de esto último da a entender que fue en la temporada de crecimiento cuando se deformaron las células pues, la posición de la anomalía se encuentra determinada por la estación en que se produjeron las heladas, las cuales fueron, en este caso, en primavera (Stöckli y Schweingruber 1996; Hadad, et al., 2012).

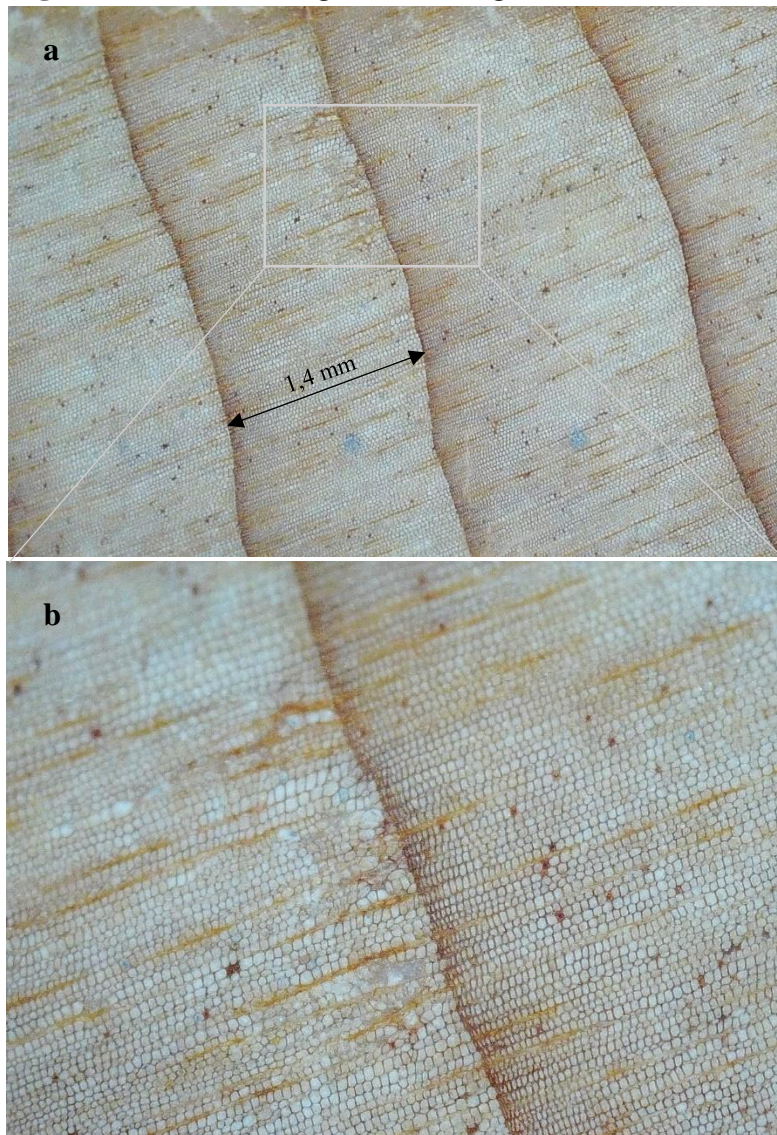
Figura 8: Marca de congelamiento registrada en el año 1951 (Tarugo CTE 035A).



Nota. a) Muestra de anillos de ciprés de la cordillera en donde se puede observar el año 1951. b) Visión ampliada en la cual se pueden apreciar muchas células colapsadas al inicio del crecimiento del año 1951. Fuente: Elaboración propia utilizando muestra de Gípolou, et al. (2021).

En el mismo tarugo anterior, se encontró un anillo de congelamiento perteneciente al año 1953. Tal como se observa en la figura 9, la superficie de tejido dañado es menor a la del año 1951, esto a pesar de que en este año la estación meteorológica registró más del doble de heladas que en el otro. Debido al poco daño que se presentó en esta muestra se podría concluir que solamente se registraron las heladas de septiembre del año 1953, las cuales fueron solo 3 y de baja intensidad, y que, por otra parte, no se vieron reflejadas las de octubre, que fueron un total de 8, siendo una anomalía que por su magnitud debería aparecer en las muestras y que por razones desconocidas no lo hizo.

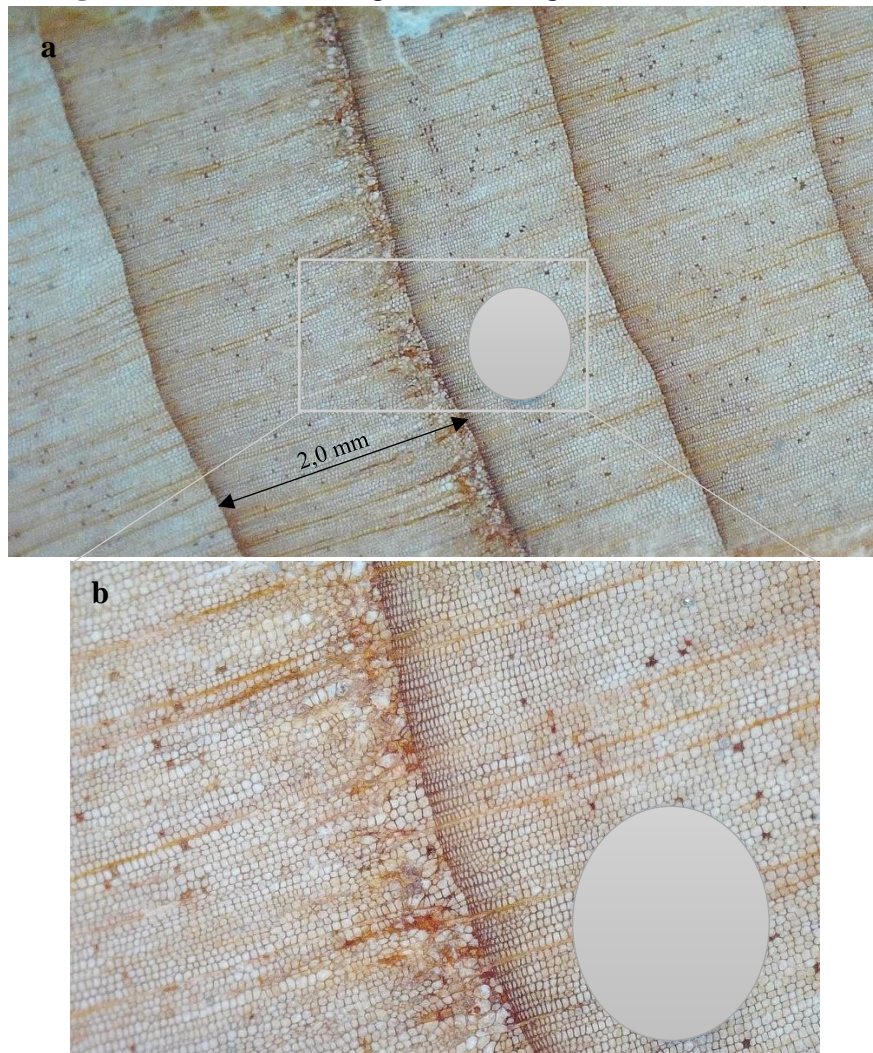
Figura 9: Marca de congelamiento registrada en el año 1953



Nota. a) Muestra de anillos de ciprés de la cordillera en donde se puede observar el año 1953. b) Vista ampliada de la imagen, en la cual se pueden apreciar células colapsadas que no son tan notorias como en el anillo del año anterior. Fuente: Elaboración propia utilizando muestra de Gípolou, et al. (2021).

El año 1961 fue el último en el cual se registró un anillo de congelamiento en el tarugo CTE 035A. En esta ocasión, tal como se puede observar en la figura 10, el tejido dañado comprende un área mucho más extensa que cualquiera de las antes mencionadas. Aquello era esperable puesto que en este año se registró la temperatura más baja del todo el periodo, por lo que en este caso el anillo es un buen indicador del clima del pasado.

Figura 10: Marca de congelamiento registrada en el año 1961

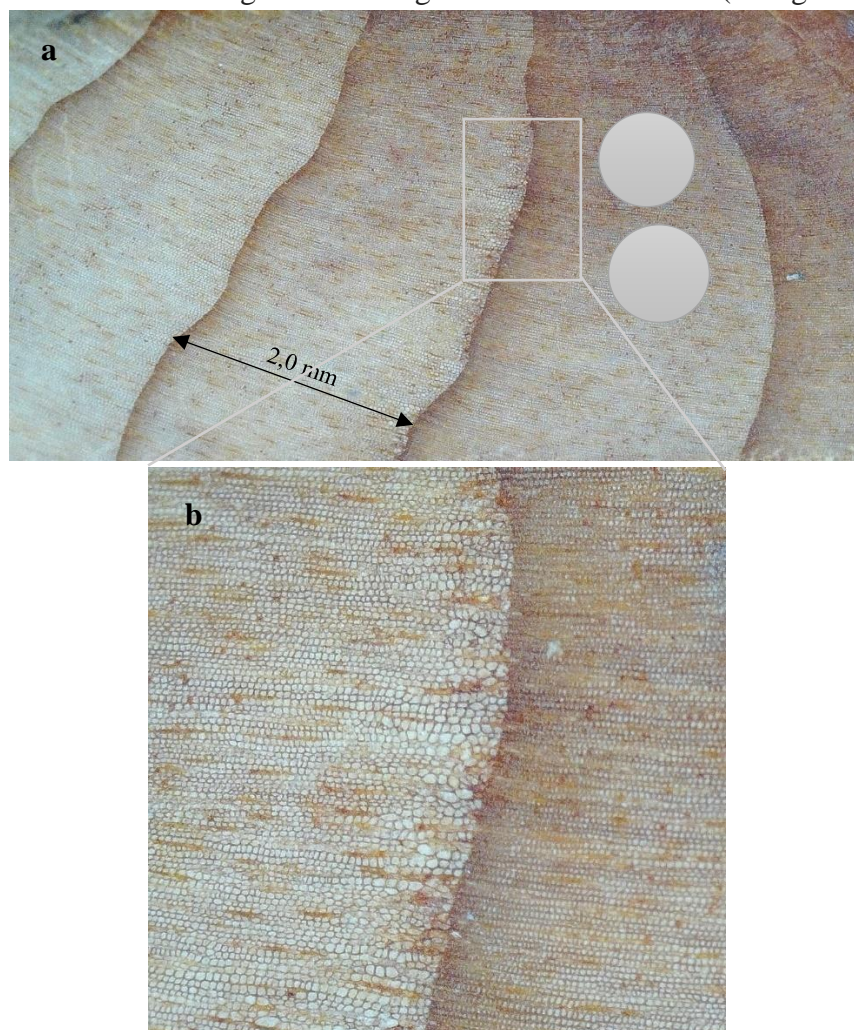


Nota. a) Muestra de ciprés de la cordillera en la que se puede apreciar el crecimiento del árbol durante el año 1961 (el círculo en gris indica el anillo correspondiente al año 1960)

b) Vista ampliada de la imagen, en la cual se aprecia un parte del área afectada por congelamiento. **Fuente:** Elaboración propia utilizando muestra de Gípolou, et al. (2021).

Por otra parte, en el tarugo CTE 014 pertenece a un árbol que creció a una altitud de 1473 metros sobre el nivel del mar. En este se identificó un anillo de congelamiento en el año 1951 (Figura 11), el cual se encuentra al inicio de crecimiento y presenta características similares al tejido dañado que se encontró anteriormente en este mismo año, pero del tarugo CTE 035.

Figura 11: Marca de congelamiento registrada en el año 1951 (Tarugo CTE 014)



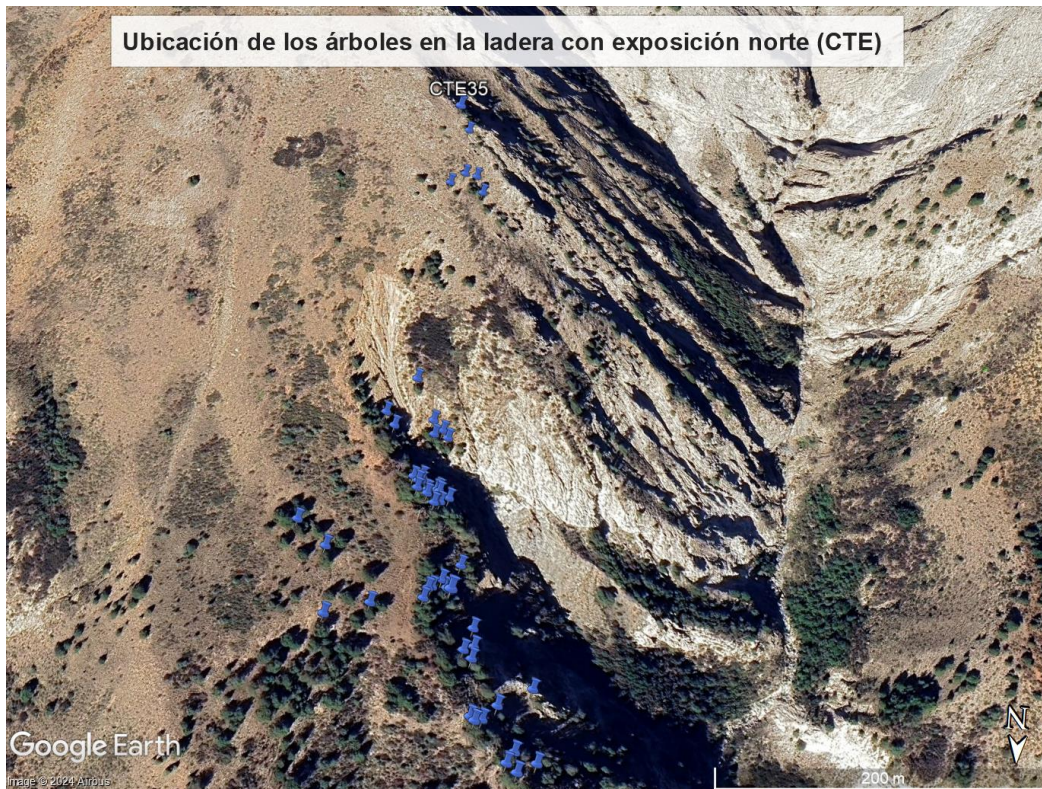
Nota. a) Muestra de ciprés de la cordillera en la que se puede apreciar el crecimiento del árbol durante el año 1951 (los dos círculos grises indican el anillo correspondiente al año 1950). b) Vista ampliada de la imagen, en la cual se aprecia un parte del área afectada por congelamiento. Fuente: Elaboración propia utilizando muestra de Gipolou, et al. (2021).

3.5.2.1 Análisis del Ciprés del cual se obtuvo la muestra CTE 35

La cantidad superior de heladas registradas en el testigo CTE 35, en comparación con los otros, podría atribuirse al hecho de que esta muestra proviene de un árbol ubicado a una altitud considerablemente mayor que los demás, como se muestra en la figura 12. Este detalle adquiere importancia debido a la presencia del gradiente térmico atmosférico, que es la variación de temperatura con la altura. En la troposfera, esta variación se estima en aproximadamente $6,5^{\circ}\text{C}$ por kilómetro (Sendiña y Pérez, 2006). Por lo tanto, se tiene la teoría de que la exposición a heladas más intensas, junto con otros factores singulares que pudo

experimentar el árbol, podría reflejarse en un mayor número de registros en su estructura de madera.

Figura 12: Ubicación del Ciprés al cual pertenece el tarugo CTE 35, en relación con los demás.



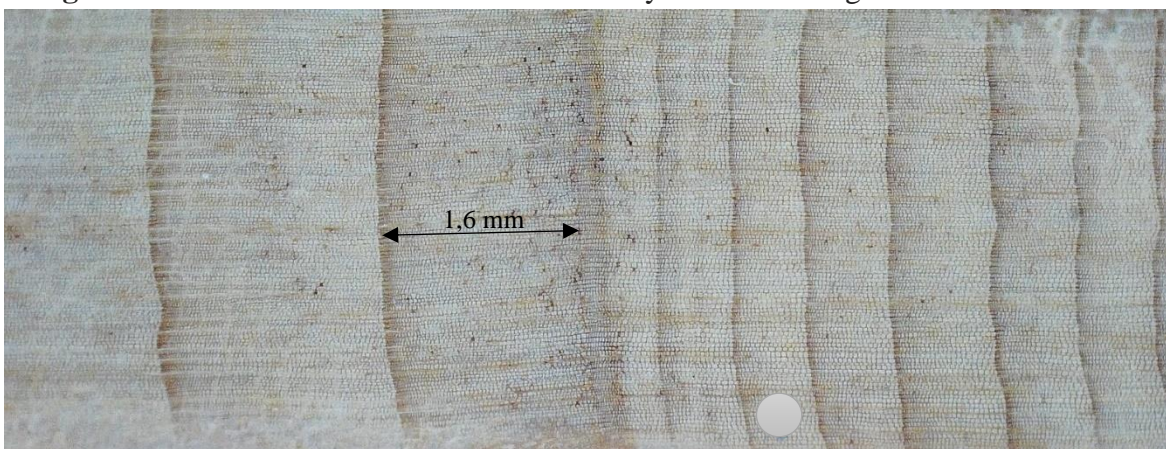
Fuente: Elaboración propia. [Captura de imagen de Google Earth Pro utilizando datos de Gipolou, et al. (2021)].

Otra situación que se evidenció fue que las lesiones por heladas se registraron durante la juventud del árbol. Este fenómeno, aunque es común en las coníferas (Gurskaya y Shiyatov, 2006), solo se registró en esta muestra (considerando solo los años con heladas que se destacaron en el objetivo 1). A pesar de que en el tarugo CTE 014 también presentó una marca de congelamiento cuando era muy joven, no se volvieron a registrar en los siguientes años cuando su tronco aún era delgado. Si bien, los árboles de los cuales se extrajeron CTE 014 y CTE 035 tienen distintas edades (datan de 1950 y 1919, respectivamente), resulta curioso que en CTE 014 no existan registros de las intensas heladas que ocurrieron en 1953 y que en CTE 035 sí, siendo que el primero estaba aún más expuesto por su edad. Es por ello que también resulta posible la idea de que CTE 035 recibió temperaturas bajo cero más intensas o prolongadas que los otros cipreses.

3.5.3. Análisis de los anillos de congelamiento encontrados en la ladera norte, exposición sur del río Teno.

En el tarugo TEN 014 b se encontró una anomalía en el anillo de crecimiento anual que corresponde al año 2012 pero que podría dar indicios del cambio de clima para el año 2013 (Figura 13). Esta anomalía se conoce como banda intra anual o anillo falso, las cuales se caracterizan por un cambio gradual en el tamaño de las células y el grosor de las paredes celulares. Si bien se le podría confundir con anillos de crecimiento normal, existen testigos de *Austrocedrus chilensis* en los que se pueden identificar fácilmente, ya sea por su anatomía o por la invariabilidad del ancho de los anillos que le prosiguen (Rojas-Badilla, et al., 2017).

Figura 13: Anillo de crecimiento del año 2013 y anillo falso registrado en el año 2012.

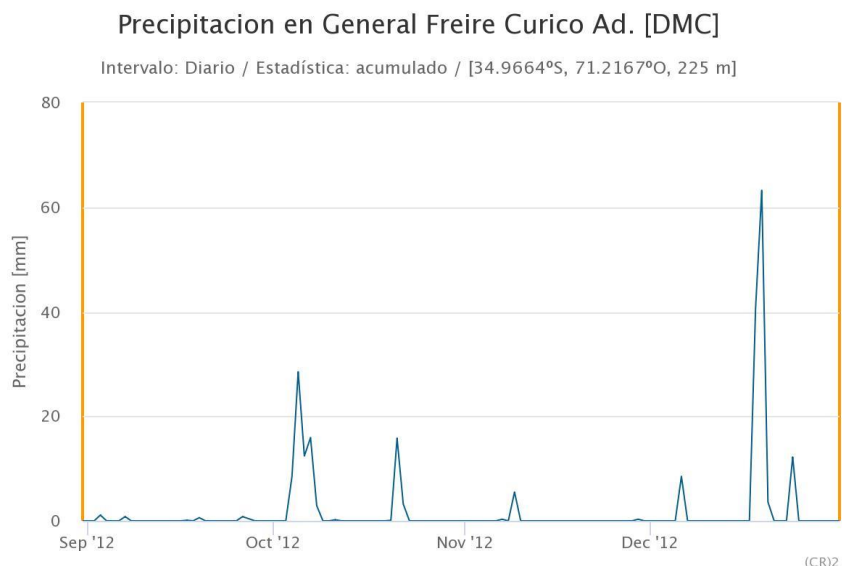


Nota. El círculo gris indica el año 2010. **Fuente:** Elaboración propia utilizando muestra de Muñoz y Ravanal (2019).

El origen de los anillos falsos en el *Austrocedrus chilensis* se asocia a una sequía en primavera seguida de un verano lluvioso, por lo que, al identificarlos correctamente, estas estructuras pueden usarse para desarrollar registros de temporadas de crecimiento caracterizado por una sequía temprana y condiciones húmedas posteriores (Villalba y Veblen, 1996).

En la figura 14 se observa un aumento repentino de la precipitación el 19 de diciembre, seguido por otro evento, aunque de menor magnitud, el 24 de ese mismo mes. Esto sugiere que la anomalía registrada en la estructura de madera probablemente corresponde al evento de precipitación más significativo de diciembre, que ocurrió casi en verano (CR2, s.f.).

Figura 14: Precipitación media durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre en Curicó.



Fuente: CR2 (s.f.)

La aparición de un anillo falso no fue el único efecto de este evento de precipitación a fines de primavera, sino que también cambió la dirección en la cual estaban dispuestas las células (Figura 15), con lo cual se puede afirmar que tuvo un fuerte impacto en el tejido. A pesar de ello, en el límite de este anillo falso y en el inicio del anillo del año 2013, no quedó registro de las heladas en septiembre, lo cual da un indicio de cómo reacciona esta especie a diferentes situaciones de estrés, ya que quizás las heladas no fueron en esa época relevantes para el correcto desarrollo del árbol, pero sí lo fue la falta de humedad en su momento.

Figura 15: Imagen detallada del cambio en el grosor de los anillos y dirección de las células luego del anillo falso.



Fuente: Elaboración propia utilizando muestra de Muñoz y Ravanal (2019).

3.5.4 Análisis de las muestras de exposición norte y exposición sur.

En la ladera de exposición norte se encontraron 5 anillos de congelamiento, mientras que, en la ladera de exposición sur, ninguno. Sin considerar el hecho de que se revisaron una mayor cantidad de muestras de la ladera con exposición norte que la de exposición al sur y, asumiendo que las muestras hubieran seguido teniendo el mismo comportamiento, es que se puede afirmar que en la ladera con exposición norte es más probable que se registren heladas de primavera que en la ladera con exposición al sur.

La diferencia que se presenta entre ambas exposiciones posiblemente se deba a que la nieve se acumula y permanece por un largo tiempo en la ladera de umbría (Madrid et al., 2018). Esto puede ocurrir porque los árboles crecen cuando tienen temperaturas adecuadas y, en el caso de los climas estacionales, se detiene el crecimiento en la época más fría, es decir, en invierno (Martínez y Camarero, 2016). Entonces, se podría deducir que la ladera de exposición sur presenta menos registros de anillos de congelamiento precisamente porque para crecer se necesitan condiciones que en ese lado no se dan, siendo probable que el árbol aún no perciba la llegada de la primavera debido a la acumulación persistente de nieve.

CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 DISCUSIÓN

Se analizaron 10 años en detalle y se identificaron anillos de congelamiento en 4 de esos años, 1934, 1951, 1953, 1961. Esto corresponde al 40% del total. Aunque el número de años analizados es relativamente reducido en comparación con el período 1926-2022, los 10 años se seleccionaron por su capacidad para representar de manera efectiva las temperaturas extremas experimentadas en Curicó. La presencia de anillos de congelamiento en estos años subraya la relevancia y robustez de los resultados obtenidos en la investigación.

La utilidad de esta especie en la investigación dendrocronológica queda confirmada por el registro de anomalías que reflejan la historia climática. La presencia de marcas de congelamiento en los anillos de crecimiento de los años 1951, 1953 y 1961—años caracterizados por heladas tardías particularmente intensas—resalta su valor como indicador climático. Si estos anillos no hubieran mostrado marcas de congelamiento, la validez de la especie como referencia para eventos climáticos extremos sería cuestionable, ya que la ausencia de tales marcas en años de eventos tan intensos sugeriría una menor probabilidad de encontrar marcas asociadas a eventos climáticos de menor magnitud.

Por otro lado, habría sido más apropiado analizar una cantidad equitativa de muestras tanto de la ladera de exposición norte (CTE) como de la ladera de exposición sur (TEN), sin embargo, no se contaba con suficientes muestras de TEN para lograr este equilibrio. A pesar de ello, a nivel general, no se observaron muchos anillos de congelamiento en los anillos de TEN, no así como en CTE, en los que si se pudieron observar varias marcas de congelamiento que pertenecían a otros años distintos a los que eran objeto de estudio.

La investigación de Ravanal (2021), obtuvo un 45% de señales de congelamiento con respecto al total, también en la región del Maule con *Austrocedrus chilensis*. A pesar de que el rodal de cipreses estudiado por el autor se encontraba entre 1.100 y 1.400 m.s.n.m y los árboles de la presente investigación entre 1.201 y 1703 m.s.n.m., el porcentaje de muestras positivas fue ligeramente similar, por lo que, sumado a lo planteado por el autor, se podría afirmar que esta especie responde bien ante cambios extremos de temperatura y es un indicador confiable para la reconstrucción del clima, tal como también mencionan los autores Rojas-Badilla et al. (2017).

Por otra parte, diversas investigaciones han señalado que los anillos de congelamiento aparecen principalmente en especies jóvenes (Glerum, 1975; Nilov, 1979; Gurskaya y Shiyatov, 2006). Esto se pudo comprobar con las dos muestras de la ladera de exposición norte en las cuales se encontraron registros de congelamientos, en las cuales ninguna marca se registró cuando los árboles tenían ya varios años.

La capacidad de registro que poseen los cipreses ubicados en la ladera con exposición norte podría ser mayor que la de la ladera con exposición al sur. Es por ello por lo que se recomienda que las investigaciones de dendrocronología que se realicen en esta zona se enfoquen en recolectar muestras de árboles con exposición al norte para seguir profundizando sobre la capacidad de los cipreses de registrar heladas tardías en esa ubicación.

Por último, aunque los resultados no revelaron una relación directa entre la cantidad de eventos ENSO y la ocurrencia de heladas primaverales, el hallazgo de registros de El Niño durante el año con la mayor cantidad de estos eventos (1953) sugiere que existe una posible influencia de los fenómenos ENSO en la frecuencia de las heladas, respaldando así la sugerencia de Ravanal (2021) sobre la conexión entre la actividad del ENSO y las variaciones climáticas extremas.

4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La especie *Austrocedrus chilensis* es un buen indicador de las heladas que han ocurrido en el pasado. La relación entre las temperaturas mínimas registradas por la estación meteorológica General Freire de Curicó y las evidencias encontradas en la estructura de madera de esta especie es positiva. En particular, durante los 10 años seleccionados del período 1926-2022, se identificaron marcas de congelamiento en los años con las heladas más intensas y las secuencias de heladas más prolongadas.

En el hemisferio sur, la primavera inicia a finales de septiembre. No obstante, en este estudio se consideró ese mes completo desde su inicio, lo que implicó incluir años en los que se habían registrado heladas a principios de septiembre, cuando aún era invierno. Este enfoque permitió descubrir la presencia de anillos de congelamiento en dicho período, destacando así la importancia de considerar todo el mes de septiembre en las investigaciones. Esto se debe a que el crecimiento de las plantas puede comenzar antes de lo esperado, dejando marcas relevantes que pueden proporcionar información valiosa.

Debido al cambio climático, el clima se ha vuelto más impredecible, lo que podría llevar a la ausencia de heladas primaverales en los próximos años, así como a la ocurrencia de varios eventos. Es muy relevante investigar sobre cómo las plantas responden a estas anomalías. De esta manera, cuando se pronostiquen días con heladas de cierta intensidad, se conocerá el daño potencial y los pequeños agricultores, que son los más vulnerables, podrían tomar medidas de mitigación adecuadas según las expectativas de daño.

Se espera que los datos proporcionados en este estudio sean útiles para llevar a cabo una reconstrucción climática del área estudiada o para cualquier investigación futura, dado que aún queda mucho por explorar en el campo de los estudios dendrocronológicos en Chile.

BIBLIOGRAFÍA

- Altieri M. y Nicholls, C. (2009). Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. *LEISA revista de agroecología*, 14, 5-8. <https://archive.foodfirst.org/wp-content/uploads/2016/01/leisa-cambioclimatico.pdf>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN] (s.f.-a). *Clima y vegetación Región del Maule. Chile Nuestro País*. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region7/clima.htm>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN] (s.f.-b). *Mapas vectoriales*. https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales
- Bravo, R y Vidal, M.C (2020). Climatología de las heladas. En R. Bravo, J. Quintana y M. Reyes (Eds.). *Heladas, Factores, tendencias y efectos en frutales y vides*. (pp. 36-54) <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6847/Bolet%c3%adn%20INIA%20N%c2%b0%20417?sequence=1&isAllowed=y>
- Bravo, R., Quintana, J., y Reyes, M. (2020). *Heladas, Factores, tendencias y efectos en frutales y vides*. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6847/Bolet%c3%adn%20INIA%20N%c2%b0%20417?sequence=1&isAllowed=y>
- Calcumil, B. (2017). Análisis de la precipitación en Chile central y su relación con las teleconexiones climáticas entre los años 1965 y 2015. [Memoria de título no publicada]. Universidad de Chile.
- Carrasco, F. (2016). *Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de la quinua en el distrito de Juli, periodo 1997-2014*. <http://www.scielo.org.pe/pdf/comunica/v7n2/a04v7n2.pdf>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2] (s.f.). *Explorador Climático*. <https://explorador.cr2.cl/>
- Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño [CIIFEN] (2022). *El Niño Oscilación del Sur*. <https://ciifen.org/el-nino-oscilacion-del-sur/#:~:text=Si%20el%20valor%20es%20cerca,por%20las%20presiones%20est%C3%A1n%20normales>.
- Climate Reanalyzer (10 de diciembre de 2023). *Monthly Reanalysis Maps*. https://climatereanalyzer.org/research_tools/monthly_maps/
- CONICYT (2019). *La historia oculta de los árboles milenarios de la región de O'Higgins*. <https://www.conicyt.cl/explora/la-historia-oculta-en-los-arboles-milenarios-de-la-region-de-ohiggins/>
- Díaz-Vaz, J.E. (1985). *Austrocedrus chilensis. Descripción anatómica*. <http://revistas.uach.cl/pdf/bosque/v6n1/art06.pdf>
- Dirección General de Aguas [DGA] (2017). *Plan maestro de los recursos hídricos Región del Maule*. <https://snia.mop.gob.cl/sad/ADM5859v1.pdf>
- Dirección General de Aeronáutica Civil [DGAC] (2024). *Ficha de la Estación*. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/informacion/fichaDeEstacion/340031>

- Dirección General de Aguas [DGA] (2010). *Ampliación red fluviométrica cuenca hidrográfica río Mataquito*. <https://snia.mop.gob.cl/sad/FLU5238.pdf>
- Flores, P. (2007). *Requerimiento de frío en frutales efectos negativos sobre la producción de fruta (primera parte)*. http://biblioteca.puntoedu.edu.ar/bitstream/handle/2133/981/Requerimiento_de_frio_en_frutales.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Fundación para la Innovación Agraria [FIA] (2016). *Heladas: tipos, medidas de prevención y manejos posteriores al daño. Guía y uso del sitio*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/26668/FIA-0057.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Gipoulou, T., Muñoz, T., Rojas, M. y Le Quesne, C. (2021). [Muestras de *Austrocedrus chilensis* en la ladera de exposición norte del río Teno]. Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral.
- González-Reyes, Á., y Muñoz, A. (2013). *Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años*. Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años (scielo.cl)
- González, P. (2004). *Comportamiento de las horas-frío, grados-día, heladas y precipitaciones en los agroecosistemas de la Región del Maule durante los eventos El Niño 1997 y La Niña 1998-1999*. http://www.cona.cl/pub/libro_elnino/13gonzalez.pdf
- González, D. (2023). *Diversidad florística y funcional en nevados de Chillán: importancia del microclima en explicar contrastes entre laderas*. [Tesis para optar al título profesional de Biólogo, Universidad de Concepción]. http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/11263/1/Gonz%c3%a1lez%20Concha_Diego%20Tesis.pdf
- Gurskaya, M. A. y Shiyatov, S. G. (2006). Distribution of Frost Injuries in the Wood of Conifers. *Russian Journal of Ecology*, 37, 7-12. https://www.researchgate.net/publication/227314713_Distribution_of_frost_injuries_in_the_wood_of_conifers
- Gutiérrez, E. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. En X. Nieto y M. A. Cau (Eds.), *Arqueología náutica mediterránea*, (pp. 309-322). http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102034/Gutierrez_2009_La_dendrocronologia_metodos_y_aplicaciones-libre.pdf (d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net)
- Jacques, M. (2009). *Caracterización del salto climático de mediados de los 1970s en Sudamérica* [Tesis de Magister en Ciencias, mención Geofísica]. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102034>

- Hadad, M., Amoroso, M., y Roig, F. (2012). *Frost ring distribution in Araucaria araucana trees from the xeric forests of Patagonia, Argentina*. *Bosque (Valdivia)*, 33(3), 309-312. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002012000300014>
- Hartmann, B., y Wendler, G. (2005). *The significance of the 1976 Pacific climate shift in the climatology of Alaska*. *Journal of climate*, 18(22), 4824-4839. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/18/22/jcli3532.1.xml>
- Infraestructura de Datos Geoespaciales [IDE] (2024). *DEM Alos Palsar Región del Maule*. Geoportal de Chile. <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/35437/DEM%20Alos%20Palsar%20Regi%C3%B3n%20del%20Maule>
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias [INIA] (s.f.). Producción de Frambuesa. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/32731/NR30888.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=La%20frambuesa%20seg%C3%BAn%20la%20variedad,una%20estaci%C3%B3n%20calurosa%20muy%20corta>
- La Prensa (1934a). Caja agraria irá en auxilio de los agricultores realmente afectados por las heladas [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1934b). En la agricultura no se han sentido efectos de la nevazón de ayer. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1934c). Las cosechas de las viñas se resentirán hasta el año 1936. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1936a). Cien mil cajas de uva chilena exportaremos a Europa y Estados Unidos. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1936b). Los cambios atmosféricos de octubre. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1938a). Alza en los principales productos agrícolas. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1938b). Estudios sobre la causa de la sequía. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1938c). Una reacción atmosférica favorable a las lluvias se está produciendo en el país. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1947). No sería suficiente la reserva de nieves en la cordillera, lo que tendrá honda repercusión al escasear agua en los ríos. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1951a). Es probable que las grandes heladas de septiembre se repitan en Octubre según estudio Observatorio del Salto. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1951b). Las viñas serán menos prodigas el año 1952 que el presente. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1951c). Porotos, garbanzos, lentejas, maíz y papas han quedado a libre precio por reciente resolución de M. de Economía. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1953a). Desastre para la agricultura de la provincia. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].

- La Prensa (1953b). Intensas reacciones atmosféricas anuncia el observatorio el salto para este nuevo mes. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1961a). Intensa onda de frío se hizo sentir ayer en la tarde en toda la región. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1961b). Mal tiempo está causando aquí daños irreparables. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (1967). Lluvia favorece a los rulos pero inquieta a la fruticultura. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (2013a). Decretan emergencia agrícola para la región del Maule. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (2013b). Diputados piden declarar zona de catástrofe en regiones afectadas por heladas. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- La Prensa (2013c). Indap continúa entregando ayuda para mitigar daños de agricultores maulinos. [Disponible en Biblioteca Nacional de Chile].
- Lara, A., Aravena y J. C., Villalba, R. (1994). *Alerces, testigos milenarios del clima planetario*. Ambiente y Desarrollo, 10(4), 71-78. <https://www.divulgameteo.es/uploads/Alerces-testigos-clima.pdf>
- Le Quesne, C., Rojas, M. y Christie, D. (2014). *Anillos de crecimiento de Austrocedrus chilensis: un archivo natural del cambio climático*. https://www.researchgate.net/profile/Duncan-Christie/publication/308764852_Anillos_de_crecimiento_de_Austrocedrus_chilensis_un_archivo_natural_del_cambio_climatico/links/57eead0b08ae8da3ce49ac11/Anillos-de-crecimiento-de-Austrocedrus-chilensis-un-archivo-natural-del-cambio-climatico.pdf
- Luchabeche (2020). Definiciones. En R. Bravo, J. Quintana y M. Reyes (Eds.), *Heladas. Factores, tendencias y efectos en frutales y vides* (pp. 9-19). <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6847/Bolet%3%adn%20I NIA%20N%c2%b0%20417?sequence=1&isAllowed=y>
- Madrid, A., Larraín, J., Macaya, J. y Teillier, S. (2018). *Contribución al conocimiento de la flora del Santuario de la Naturaleza Serranía El Ciprés, Región de Valparaíso, Chile*. *Gayana. Botánica*, 75(2), 589-624. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432018000200589>
- Martinez, L., Ibachaque, A., y Rojas, L. (2007). *Efectos de las heladas en la Agricultura*. https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/32041/Boletin_INI A_165.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martínez, M., y Camarero, J. (2016). *La Memoria de los Árboles. La información del territorio contenida en los anillos de crecimiento de la madera*.

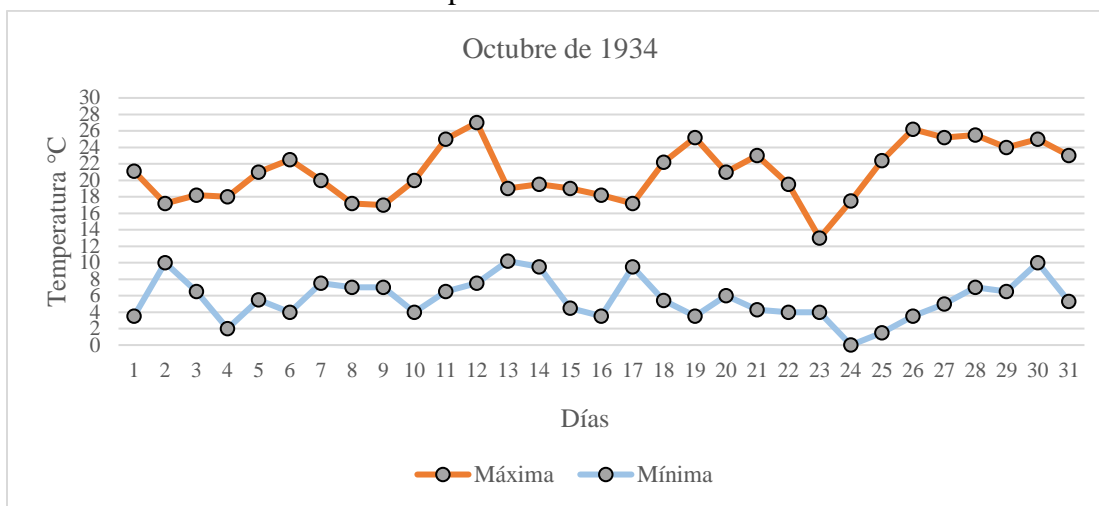
- <http://arboreo.org/wp-content/uploads/2018/12/arboreo-publicacion-la-memoria-de-los-arboles-de-Miguel-Ortega.pdf>
- Mendoza, E. (2020a). Cuantificación y acumulación de horas-frío y días-grado en el valle Alto de Cochabamba. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 7(2), 144-150. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182020000200017&lng=es&tlng=es.
- Mendoza, E. (2020b). Efecto de la acumulación de horas frío en el porcentaje de floración de cultivares de ciruelo, manzano y duraznero en zonas de valle alto. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 7(2), 73-79. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182020000200010&lng=es&tlng=es.
- Muñoz, T y Ravanal, R. (2019). [Muestras de *Austrocedrus chilensis* en la ladera de exposición sur del río Teno]. Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral.
- Muñoz-Salazar, T., LeQuesne, C., Rozas, V., Christie, D. A., y Rojas-Badilla, M. (2022). *Examining the potential of Austrocedrus chilensis tree rings as indicators of past late-spring frost events in central Chile. Dendrochronologia*, 74, 125962. <https://capehorncenter.com/wp-content/uploads/2023/03/Munoz-Salazar-et-al-2022.pdf>
- Núñez, T. (2022). *Dendrocronología, descubriendo la historia secreta que guardan los árboles*. Ladera Sur. <https://laderasur.com/articulo/dendrocronologia-descubriendo-la-historia-secreta-que-guardan-los-arboles/>
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA] (2013a). *Cambio Climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía. Informe Final*. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2013/12/cambioClimatico2013.pdf>
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA] (2013b). *Efecto heladas de septiembre en frutales y hortalizas entre la Región de Coquimbo y la del Maule*. <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/documentos-e-informes/estudio-efecto-heladas-de-septiembre-en-frutales-y-hortalizas-entre-la-region-de-coquimbo-y-la-del-maule>
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA] (2018). *Región del Maule. Información regional 2018*. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/Maule.pdf>
- Quintana, J (2020). Factores atmosféricos asociados a la ocurrencia de heladas en Chile. En R. Bravo, J. Quintana y M. Reyes (Eds.), *Heladas. Factores, tendencias y efectos en frutales y vides* (pp. 20-35). <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6847/Bolet%20INIA%20N%20b%20417?sequence=1&isAllowed=y>

- Ravanal, R. (2021). *Eventos extremos de bajas temperaturas registrados en los anillos de crecimiento de Austrocedrus chilensis en la cuenca del río Maule*. [Memoria de título no publicada, Universidad Austral de Chile].
- Reyes, M y Salazar-Parra, C. (2020). Heladas en vides. En R. Bravo, J. Quintana y M. Reyes (Eds.), *Heladas. Factores, tendencias y efectos en frutales y vides*. (pp. 55-70). <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6847/NR41984.pdf?sequence=9>
- Rojas-Badilla, M., Álvarez, C., Velásquez-Álvarez, G., Hadad, M., Le Quesne, C., y Christie, D. A.. (2017). *Anomalías anatómicas en anillos de crecimiento anuales de Austrocedrus chilensis (D. Don) Pic.-Serm. et Bizzarri en el norte de su rango de distribución*. *Gayana. Botánica*, 74(2), 269-281. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432017000200269>
- Sánchez, L. (s.f.). Cambio climático y sus efectos en la agricultura. En F. Sepúlveda y L. Sánchez (Eds.), *Adaptación al cambio climático: Prácticas alternativas al uso del fuego en el sector agropecuario de la región metropolitana* (pp. 11-35). <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/68502/NR42833.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Santibáñez, F. (2016). *El cambio climático y los recursos hídricos de Chile*. Santiago, ODEPA. <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/9160/RecursosHidricosCambioClimatico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Santibáñez, F. (2017). Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas: FIA.
- Sendiña, I. y Pérez V. (2006). *Fundamentos de Meteorología*. Universidad de Santiago de Compostela. <https://books.google.co.cr/books?id=HE3xtRmNg4kC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Servicio Meteorológico de la Armada de Chile (s.f.). *Evidencias de fenómenos del tipo Tornado en las costas de la VIII Región del Biobío y el Sur de Chile*. https://meteoarmada.directemar.cl/prontus_meteo/site/artic/20101214/pags/20101214135557.html
- Snyder, R. L., de Melo-Abreu, J. P., y Matulich, S. (2014). *Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/3/y7223s/y7223s05.pdf>
- University of East Anglia (s.f.). *Southern Oscillation Index (SOI) data*. <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data//soi/soi.dat>
- Uribe, J., Cabrera, R., De la fuente, A. y Paneque, M. (2012). *Atlas bioclimático de Chile*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/178567>
- Vargas, G. (1984). *El Fenómeno de "El Niño"*. *Revista de Marina*. <https://revistamarina.cl/revistas/1984/1/gvargasc.pdf>

- Villalba, R., y Veblen, T. (1996). *A tree-ring record of dry spring-wet summer events in the forest-steppe ecotone, northern Patagonia, Argentina. Tree rings, environment and humanity*, 107, 116. https://www.researchgate.net/profile/Ricardo-Villalba-2/publication/307122771_A_TREE-RING_RECORD_OF_DRY_SPRING-WET_SUMMER_EVENTS_IN_THE_FOREST-STEPPE_ECOTONE_NORTHERN_PATAGONIA_ARGENTINA/links/
- Viñas, J. (2017). *Hay heladas que matan*. Meteored. <https://www.tiempo.com/noticias/actualidad/hay-heladas-que-matan.html>

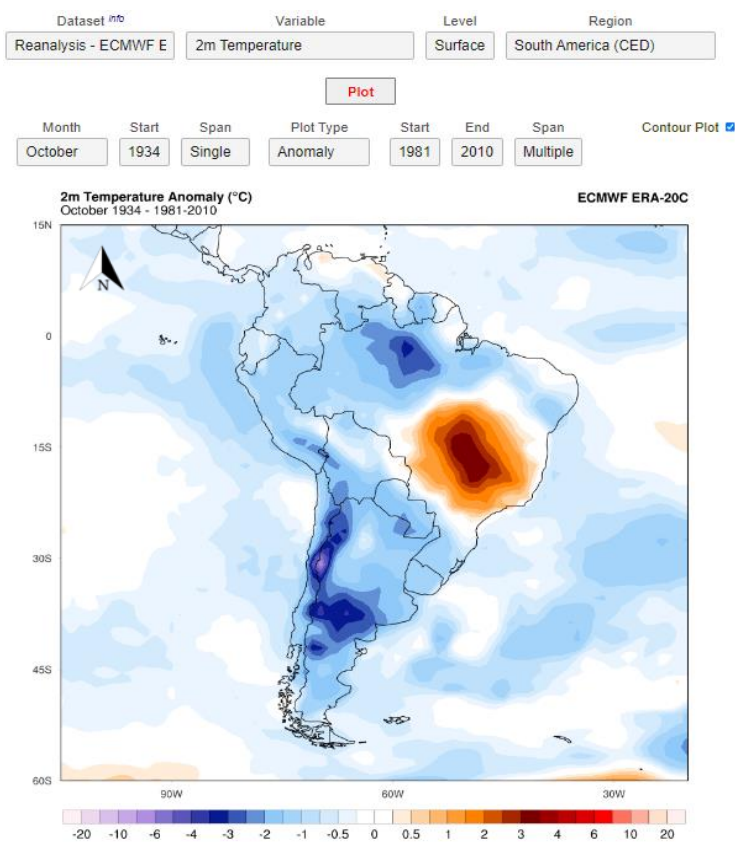
ANEXOS

Anexo 1: Temperatura en °C de octubre del año 1934



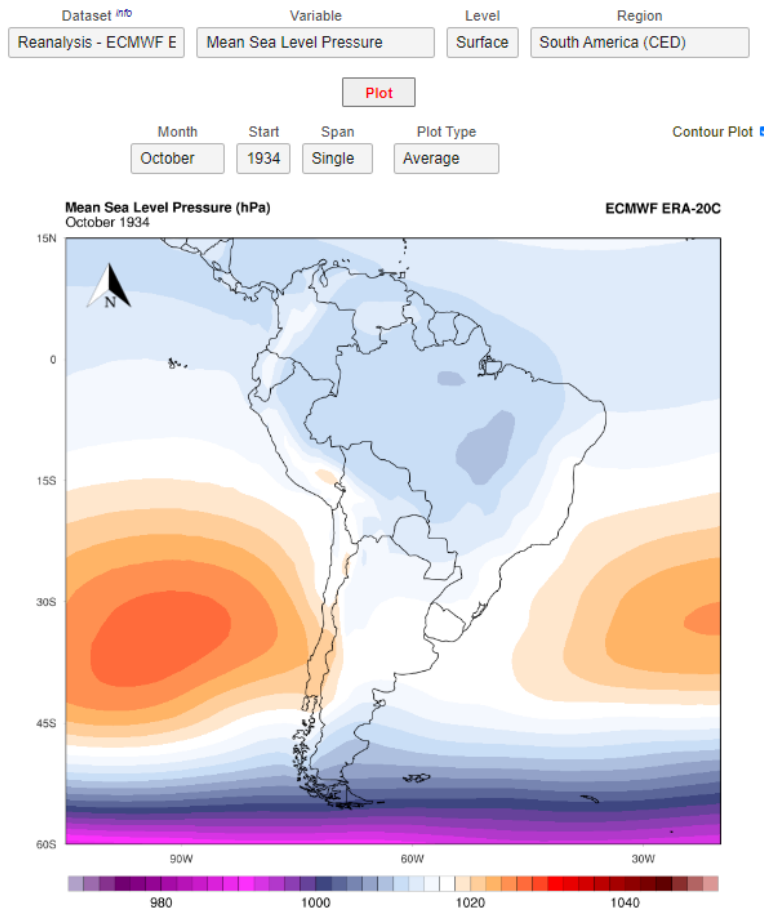
Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023)

Anexo 2: Anomalías de temperatura de octubre del año 1934, con respecto al periodo 1981-2010



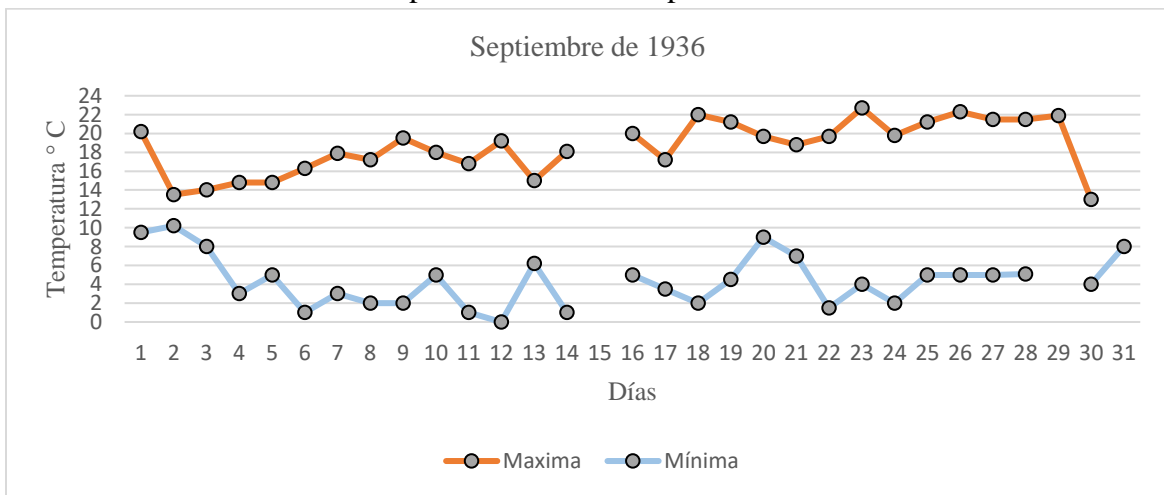
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 3: Presión media a nivel del mar de octubre del año 1934



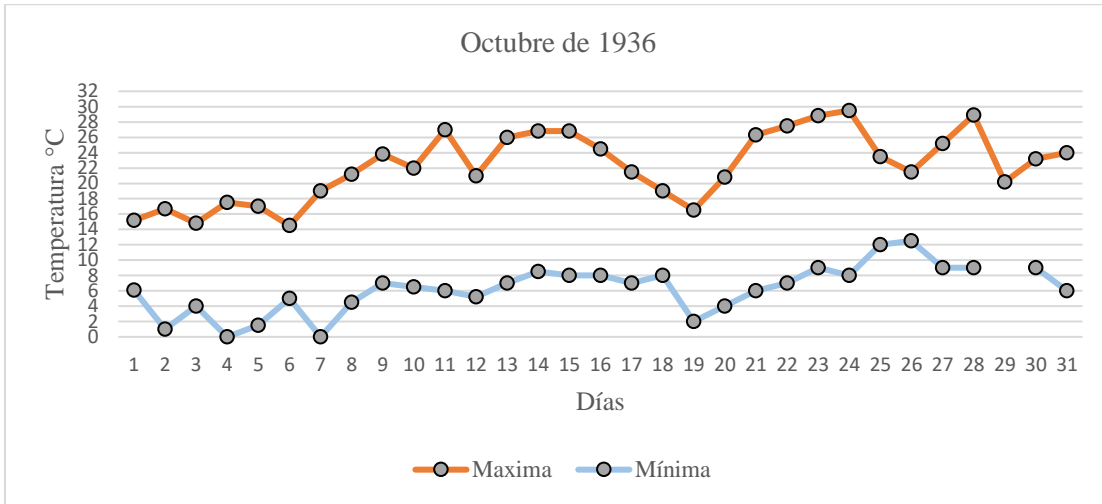
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 4: Temperatura en °C de septiembre del año 1936



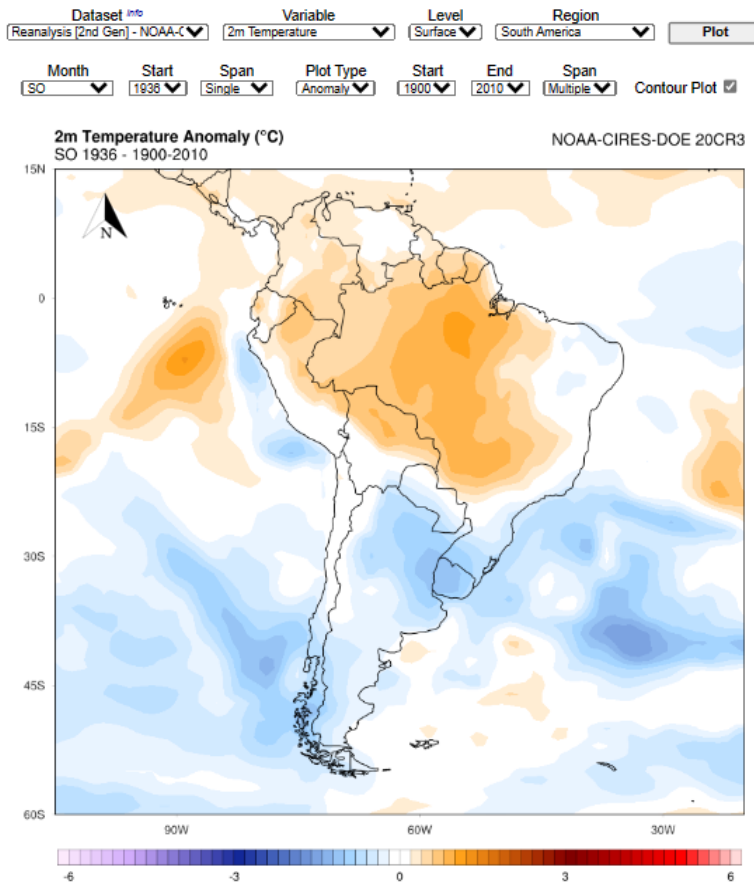
Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023)

Anexo 5: Temperatura en °C de octubre del año 1936



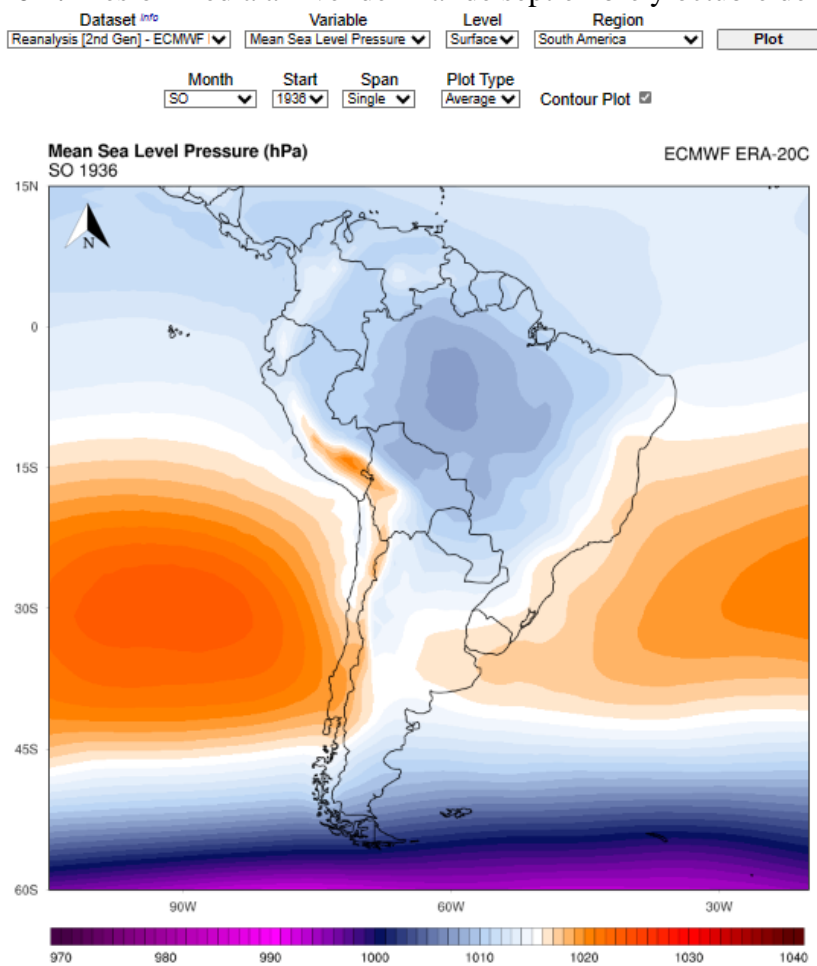
Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023)

Anexo 6: Anomalías de temperatura de septiembre y octubre del año 1936, con respecto al periodo 1900-2010



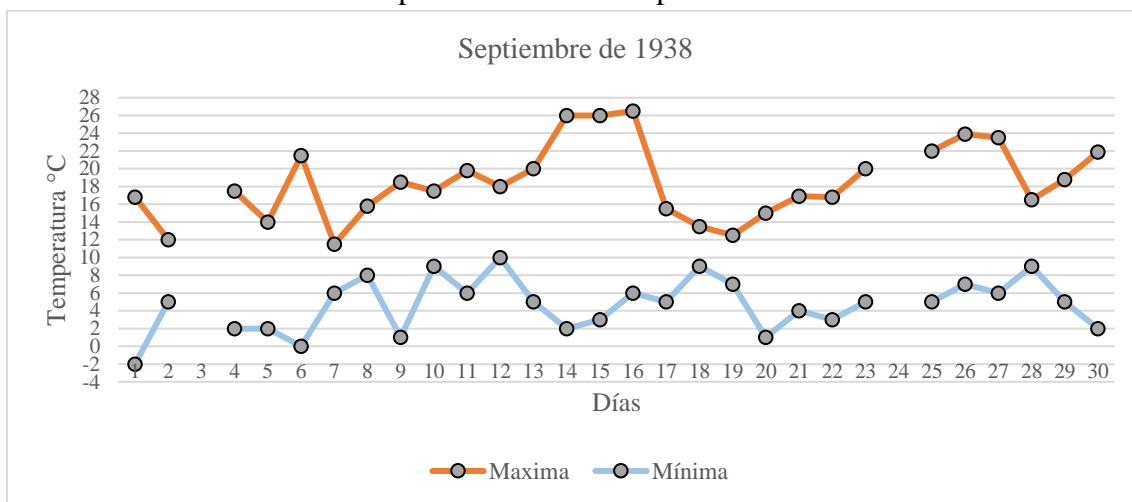
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 7: Presión media a nivel del mar de septiembre y octubre de 1936



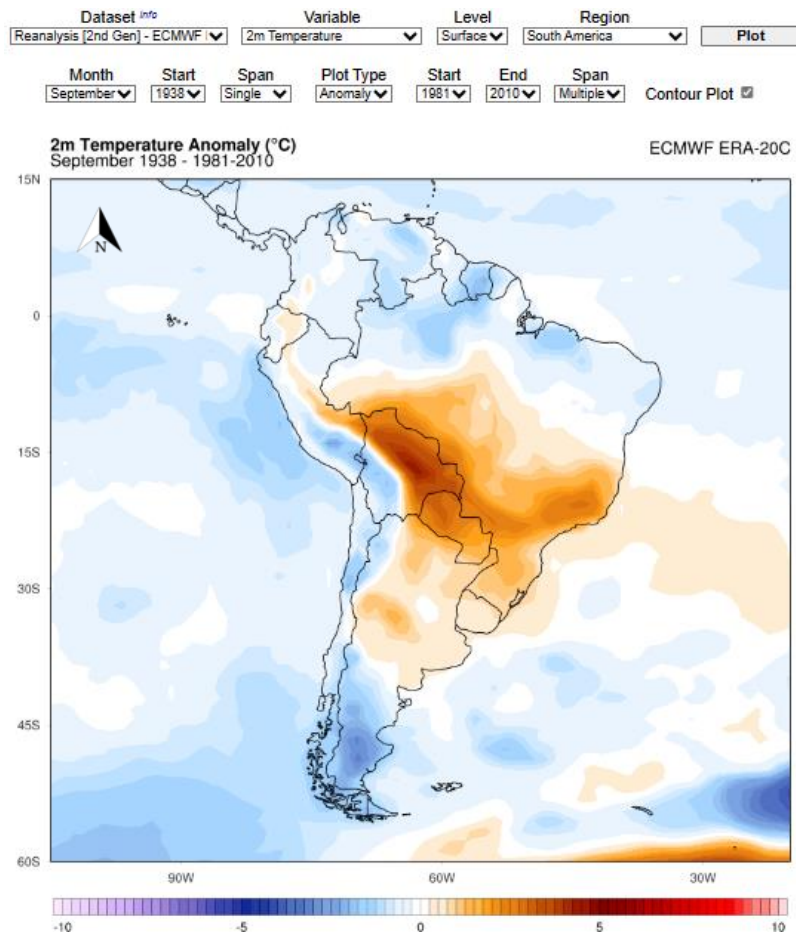
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 8: Temperatura en °C de septiembre del año 1938



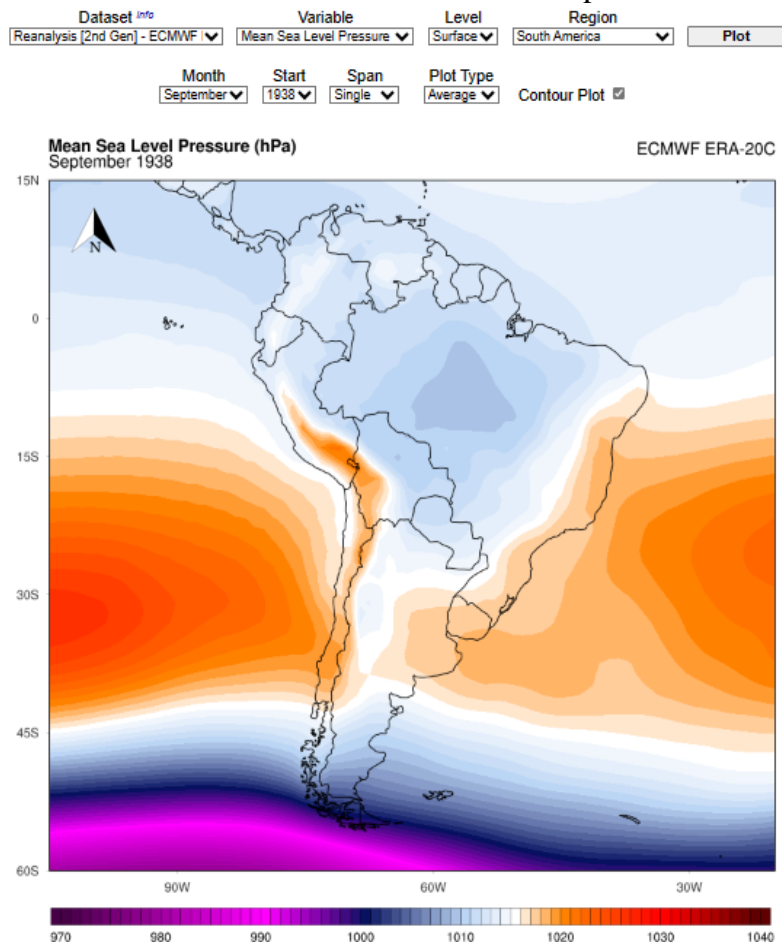
Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023)

Anexo 9: Anomalías de temperatura de septiembre del año 1938, con respecto al periodo 1981-2010



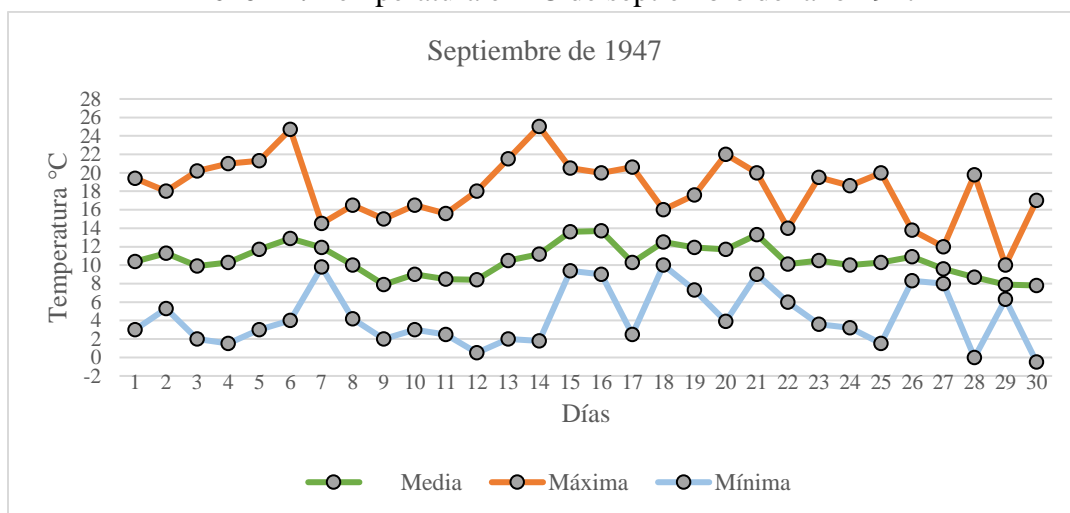
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 10: Presión media a nivel del mar en septiembre de 1938



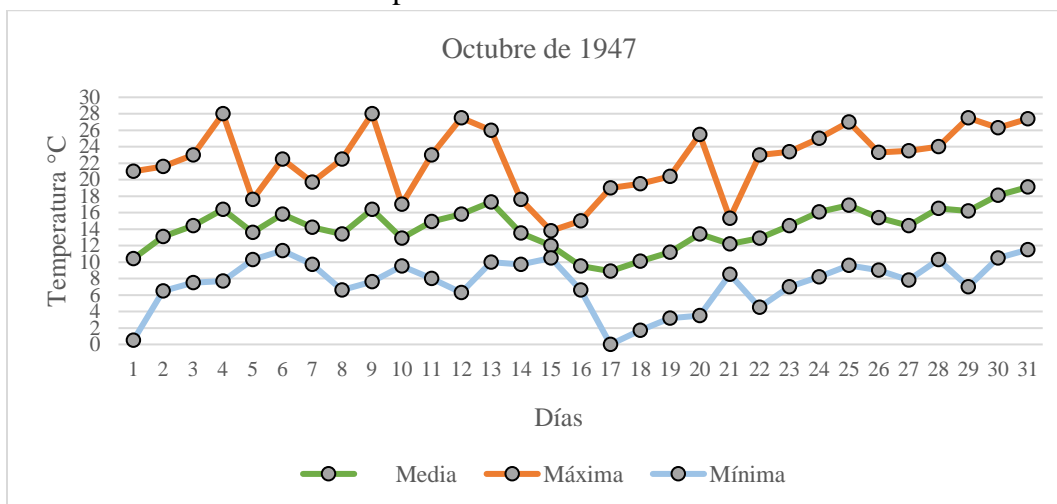
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 11: Temperatura en °C de septiembre del año 1947



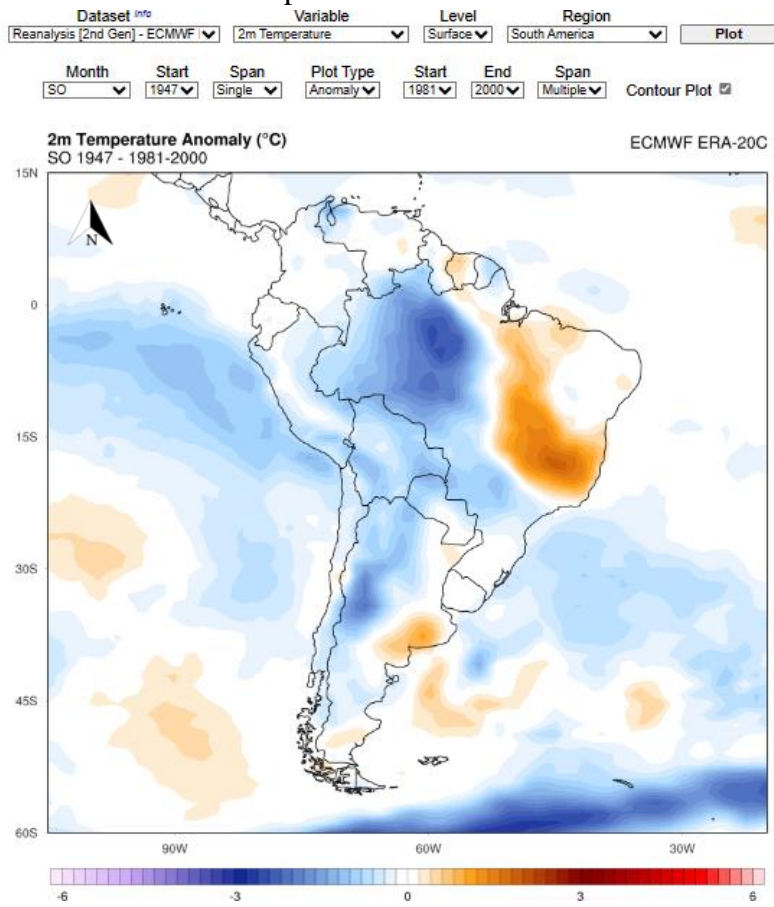
Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023)

Anexo 12: Temperatura en °C de octubre del año 1947



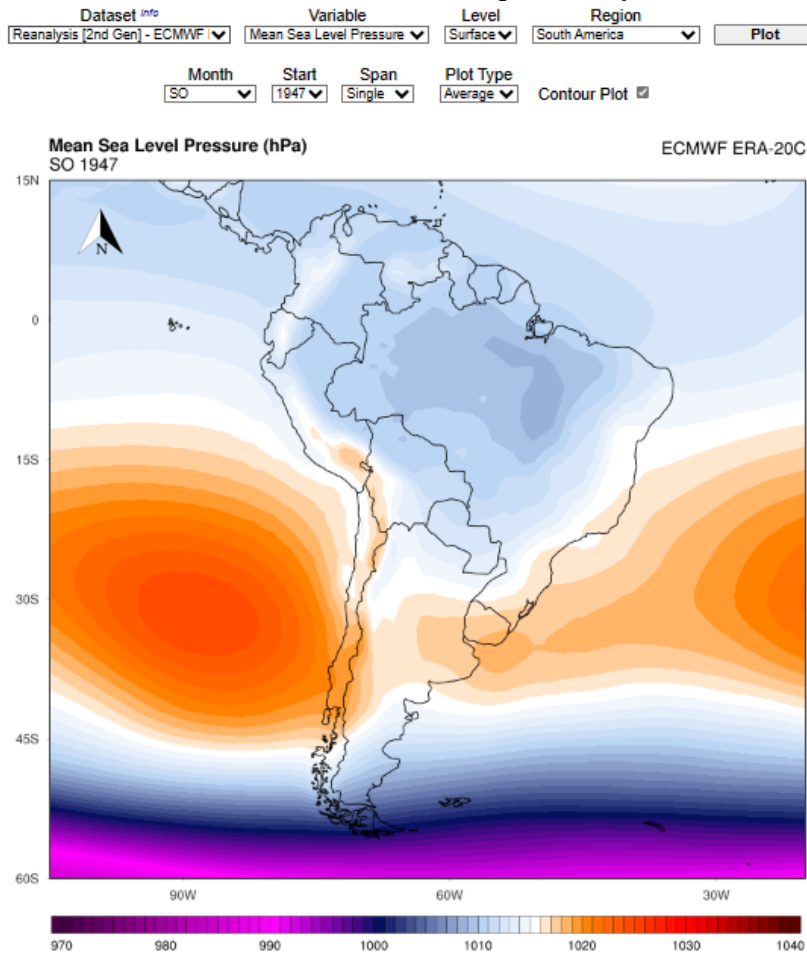
Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Muñoz (comunicación personal, 3 de abril de 2023)

Anexo 13: Anomalías de temperatura de septiembre y octubre del año 1947, con respecto al periodo 1981-2000



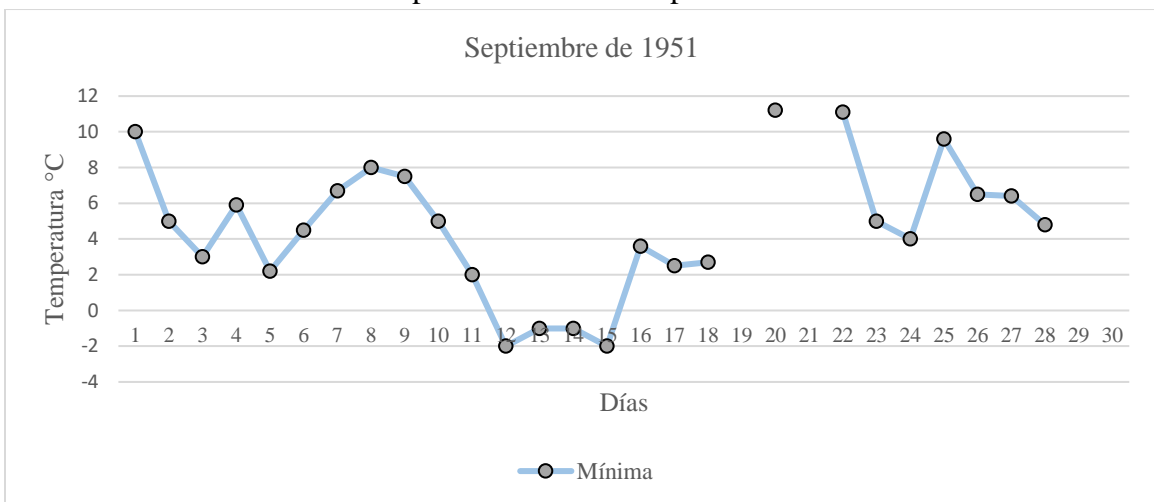
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 14: Presión media a nivel del mar en septiembre y octubre del año 1947.



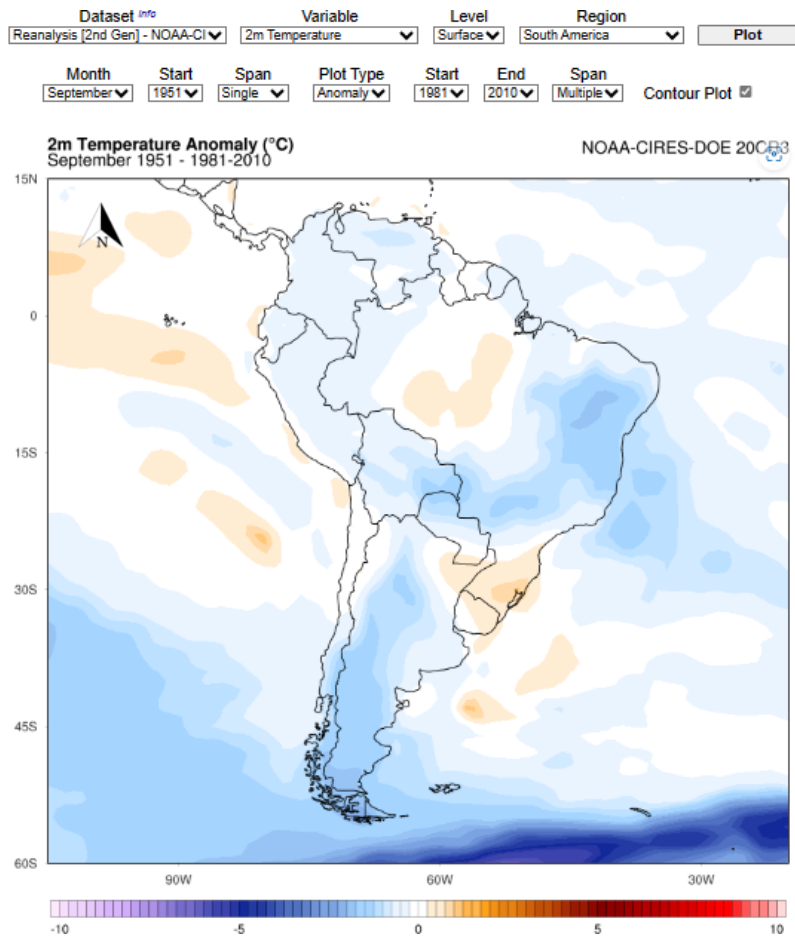
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 15: Temperatura en °C de septiembre del año 1951



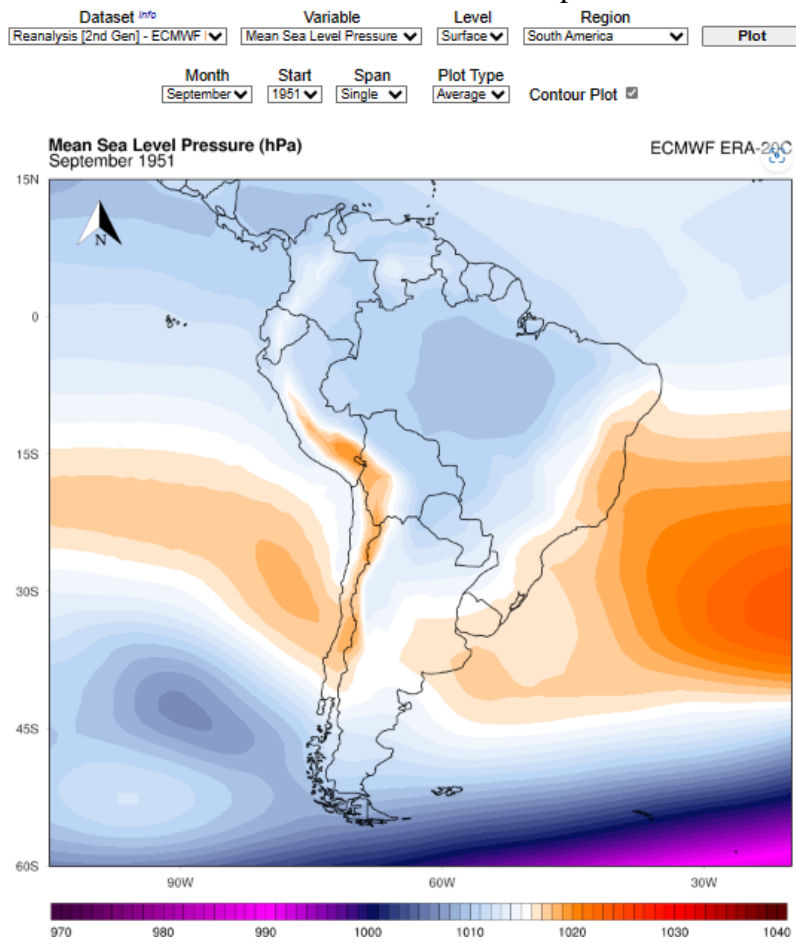
Fuente: Elaboración propia en base a datos del CR2 (s.f.)

Anexo 16: Anomalías de temperatura de septiembre del año 1951, con respecto al periodo 1981-2010



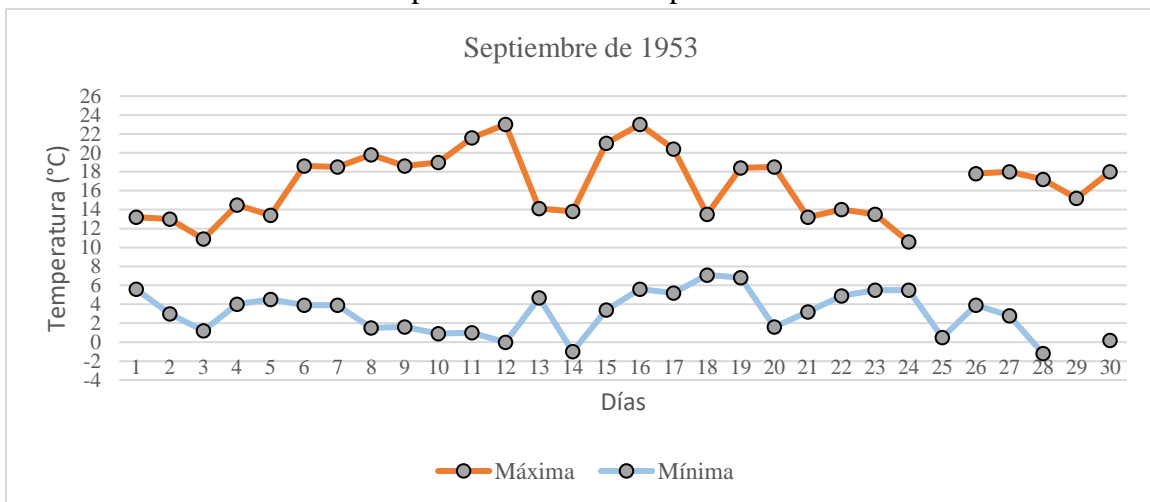
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 17: Presión media a nivel del mar en septiembre del año 1951



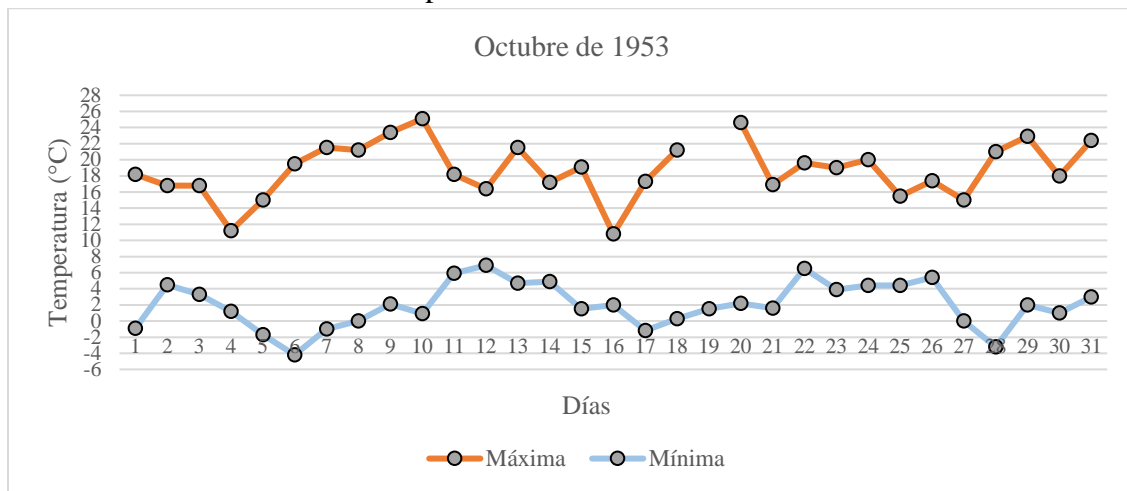
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 18: Temperatura en °C de septiembre del año 1953



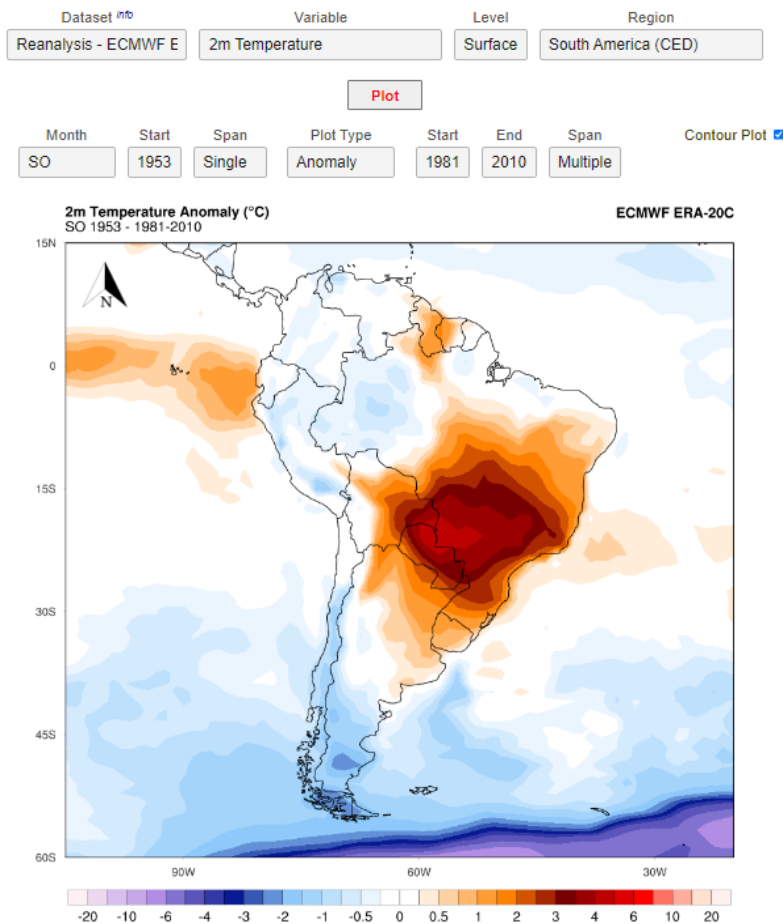
Fuente: Elaboración propia en base a datos del CR2 (s.f.).

Anexo 19: Temperatura en °C de octubre del año 1953



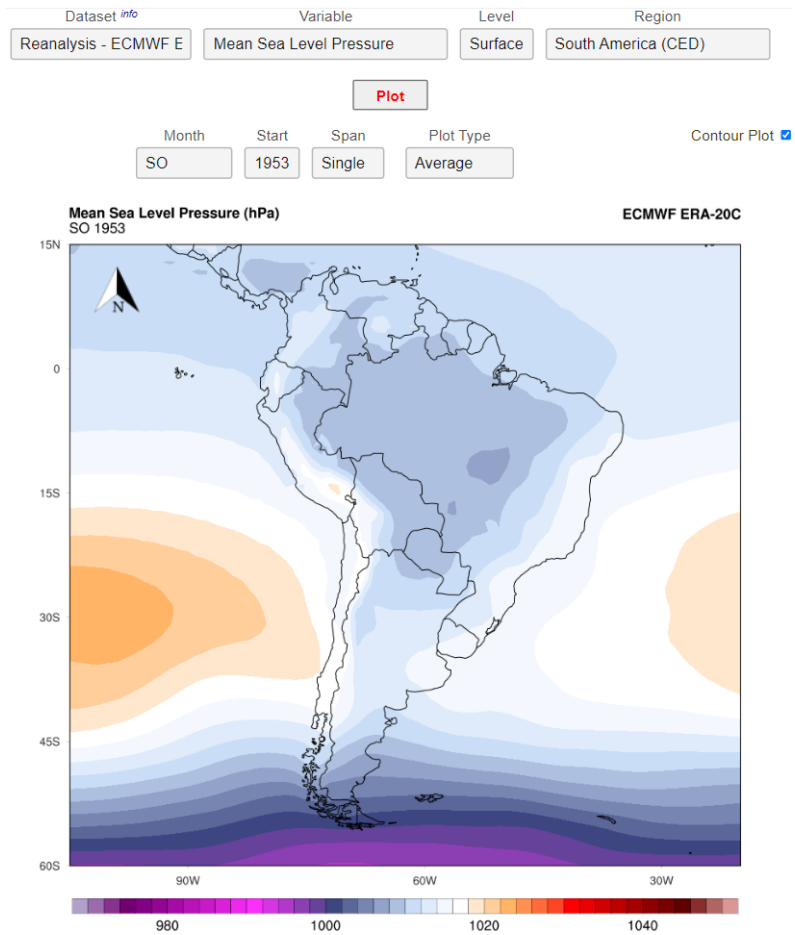
Fuente: Elaboración propia en base a datos del CR2 (s.f.)

Anexo 20: Anomalías de temperatura de septiembre y octubre del año 1953, con respecto al periodo 1981-2010



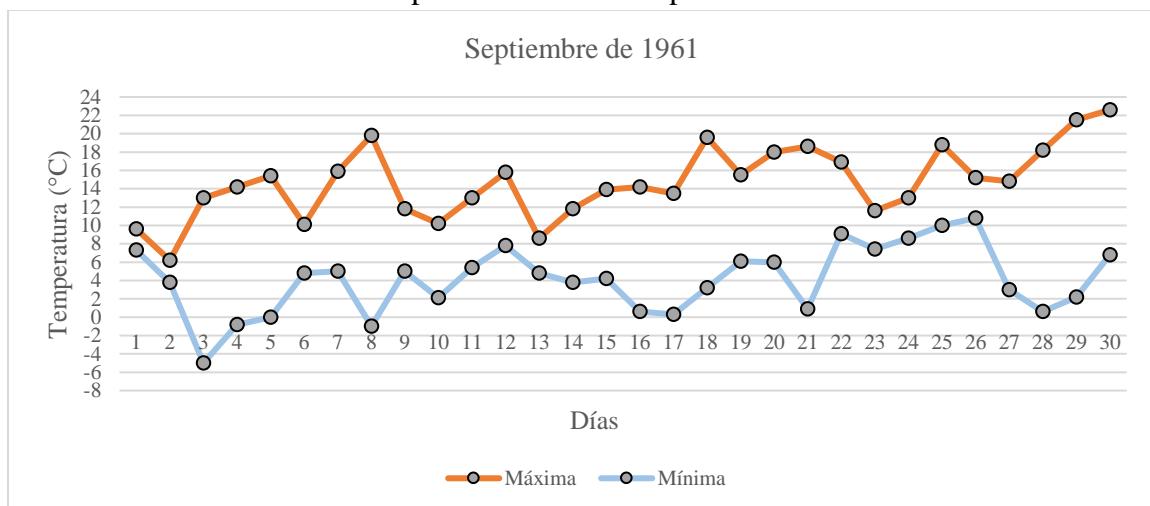
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 21: Presión media a nivel del mar en septiembre y octubre del año 1953



Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 22: Temperatura en °C de septiembre del año 1961



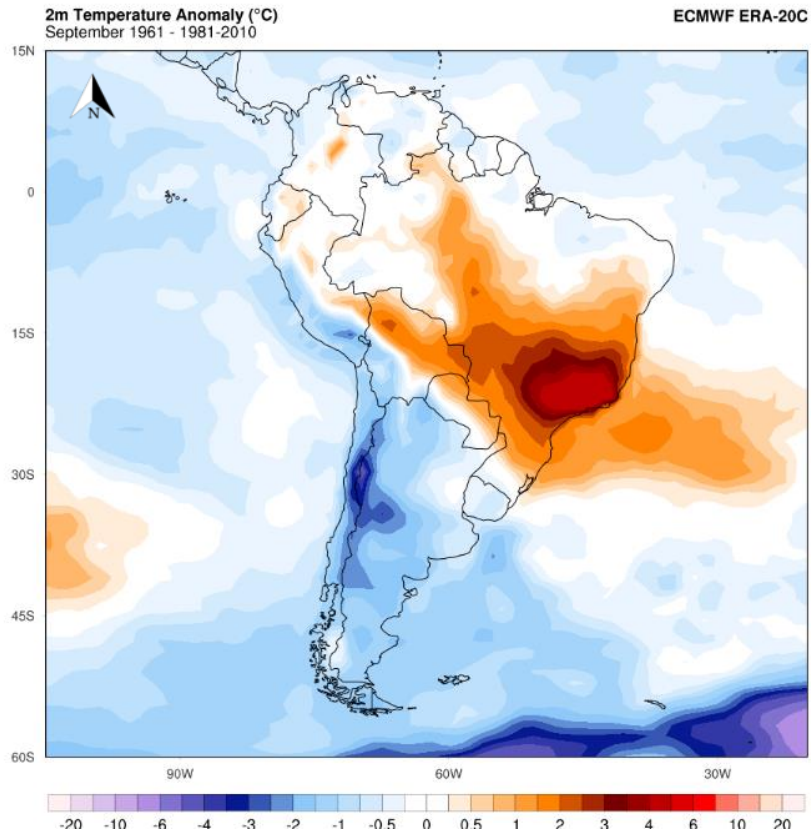
Fuente: Elaboración propia en base a datos del CR2 (s.f.).

Anexo 23: Anomalías de temperatura de septiembre del año 1961, con respecto al periodo 1981-2010

Dataset *info* Variable Level Region
Reanalysis - ECMWF E 2m Temperature Surface South America (CED)

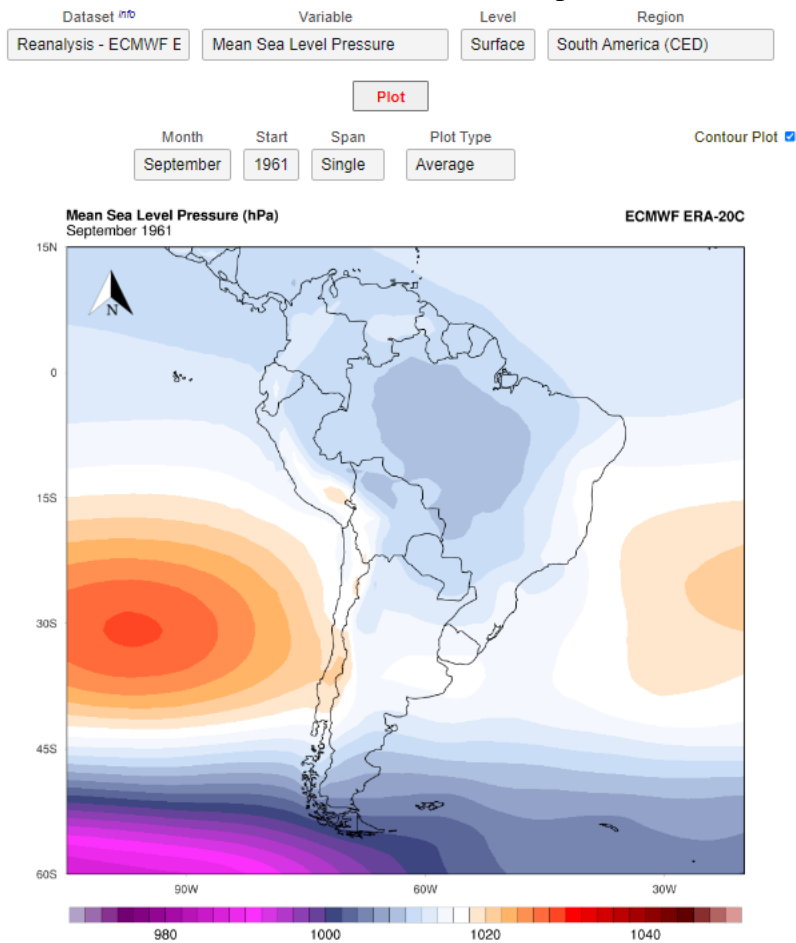
Plot

Month Start Span Plot Type Start End Span Contour Plot
September 1961 Single Anomaly 1981 2010 Multiple



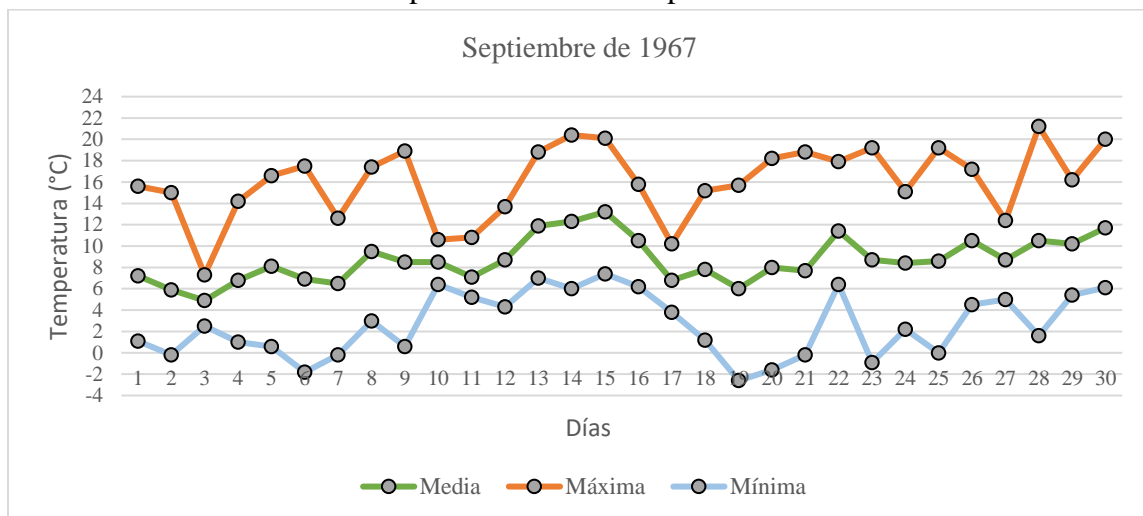
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 24: Presión media a nivel del mar en septiembre del año 1961



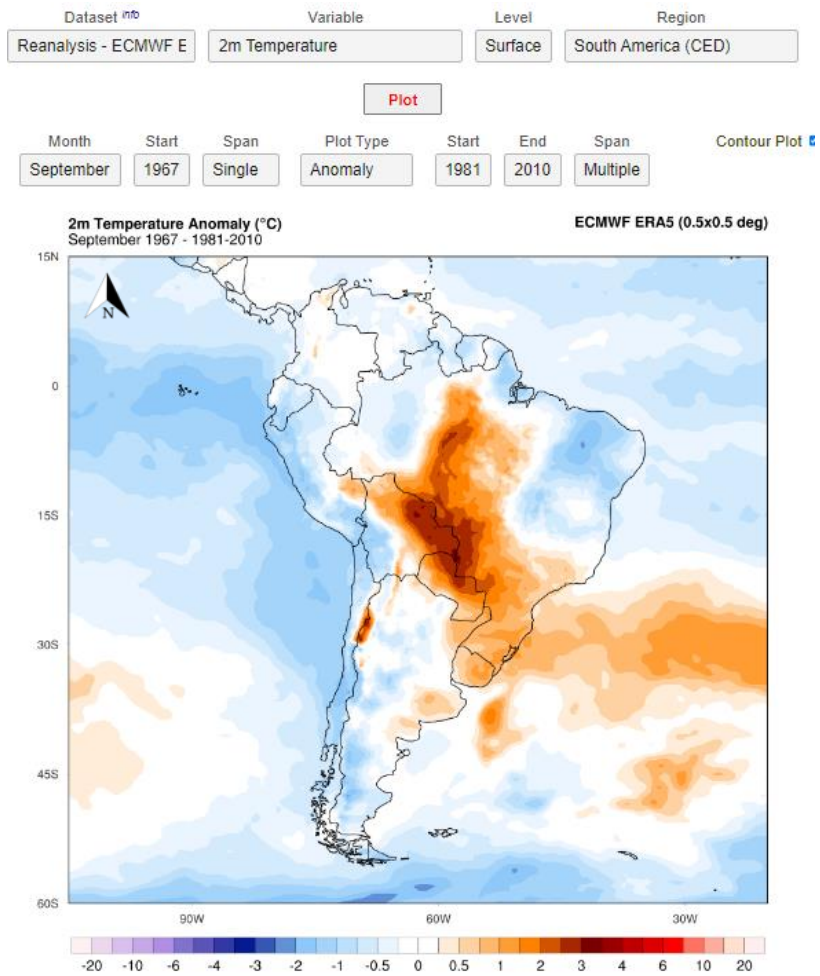
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 25: Temperatura en °C de septiembre del año 1967



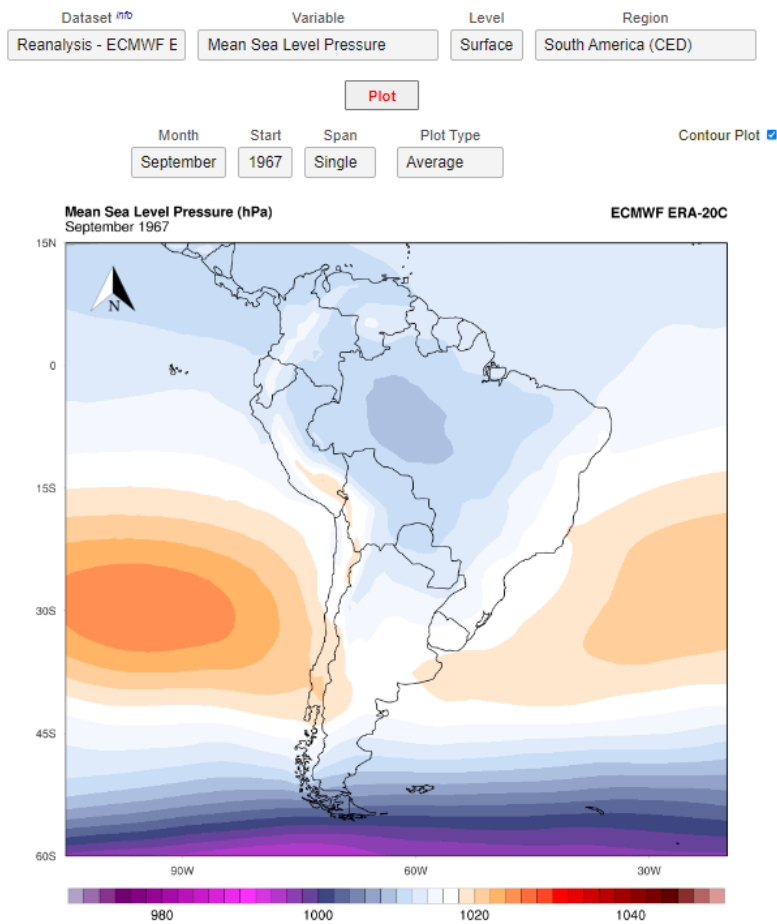
Fuente: Elaboración propia en base a datos del CR2 (s.f.).

Anexo 26: Anomalías de temperatura de septiembre del año 1967, con respecto al periodo 1981-2010



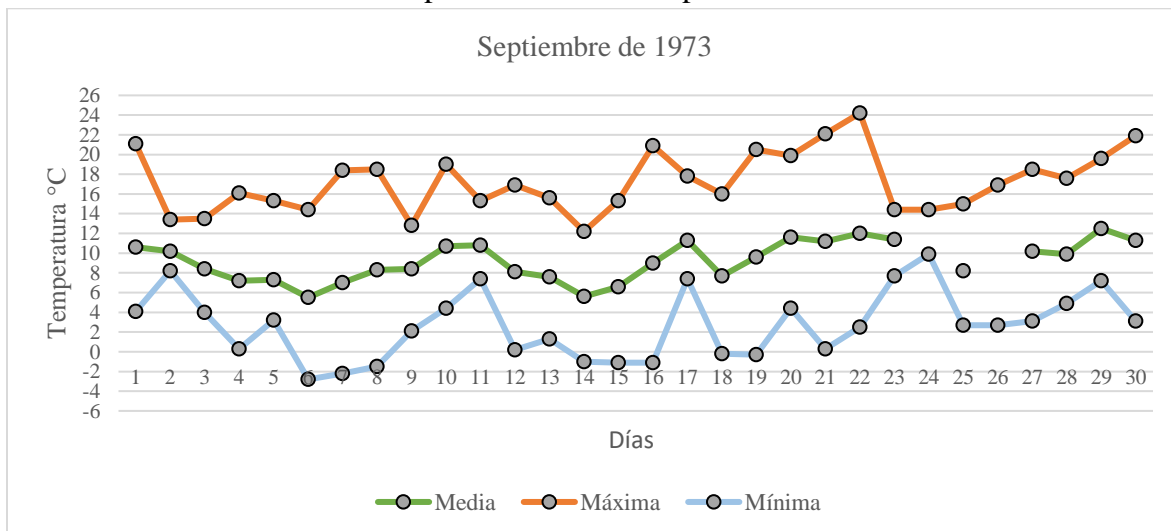
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 27: Presión media a nivel del mar en septiembre del año 1967



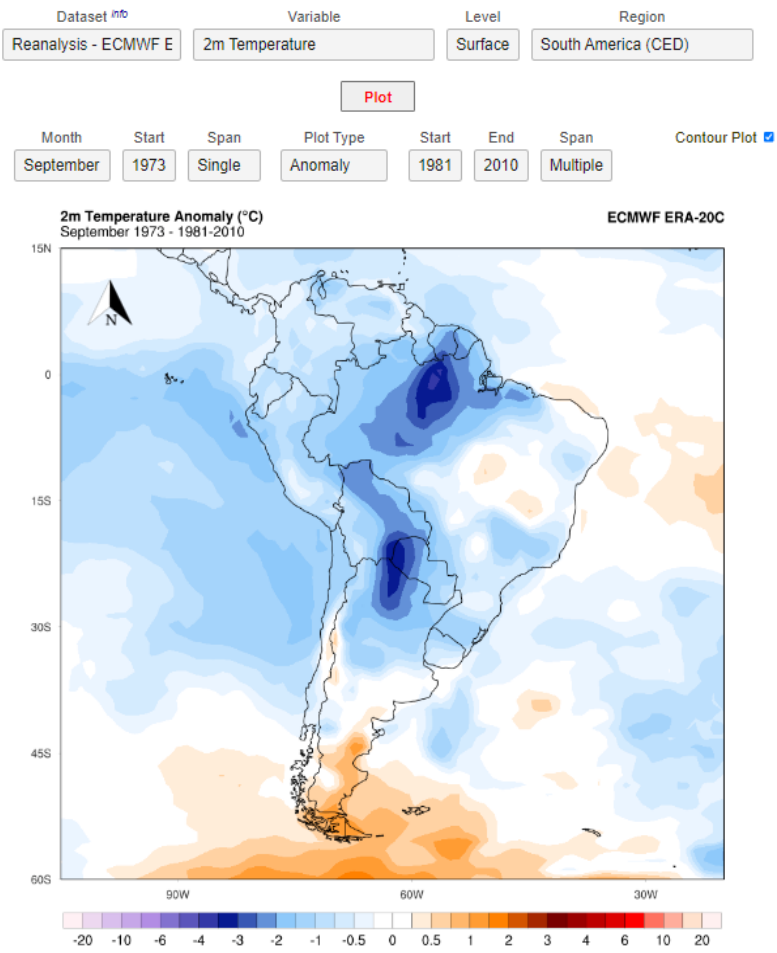
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 28: Temperatura en °C de septiembre del año 1973



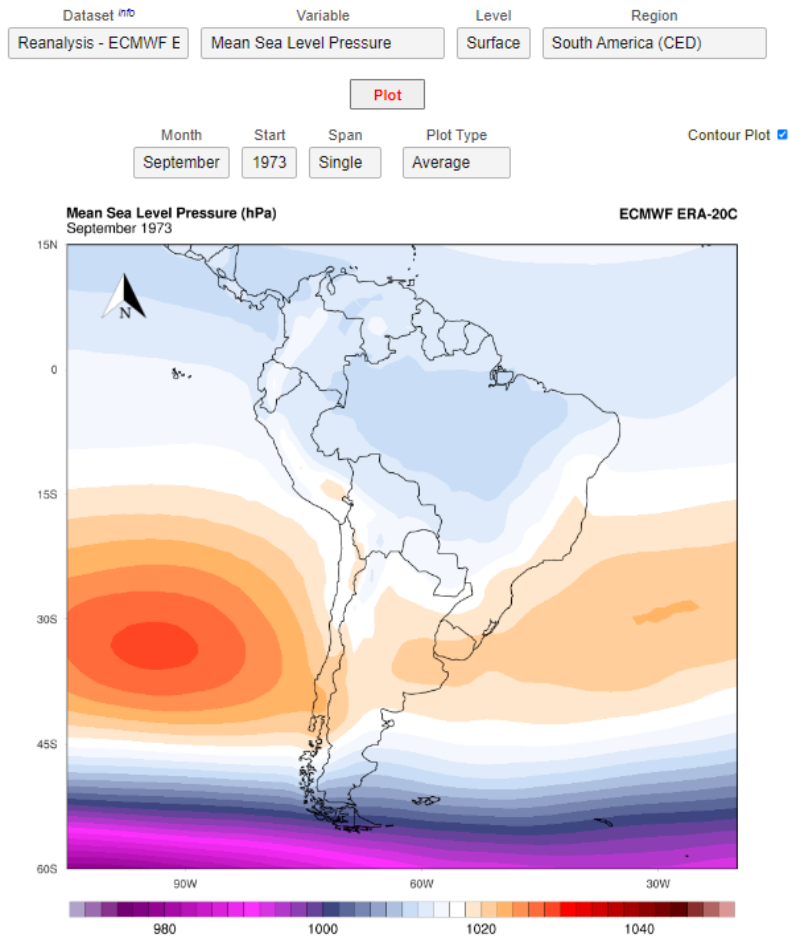
Fuente: Elaboración propia en base a datos del CR2 (s.f.).

Anexo 29: Anomalías de temperatura de septiembre del año 1973, con respecto al periodo 1981-2010.



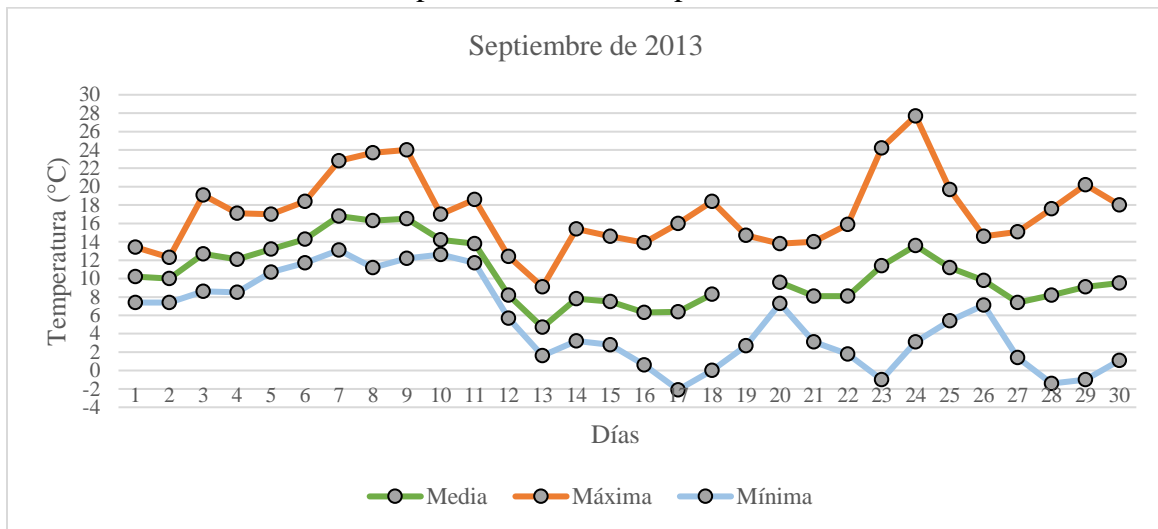
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 30: Presión media a nivel del mar en septiembre del año 1973



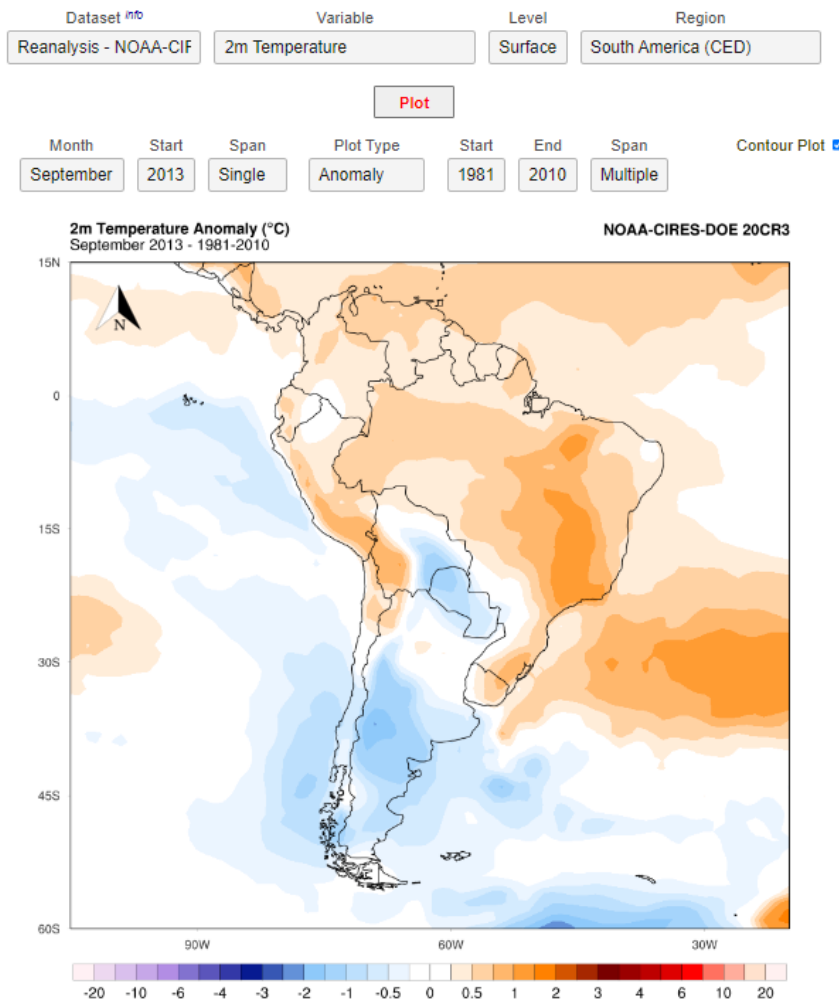
Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 31: Temperatura en °C de septiembre del año 2013



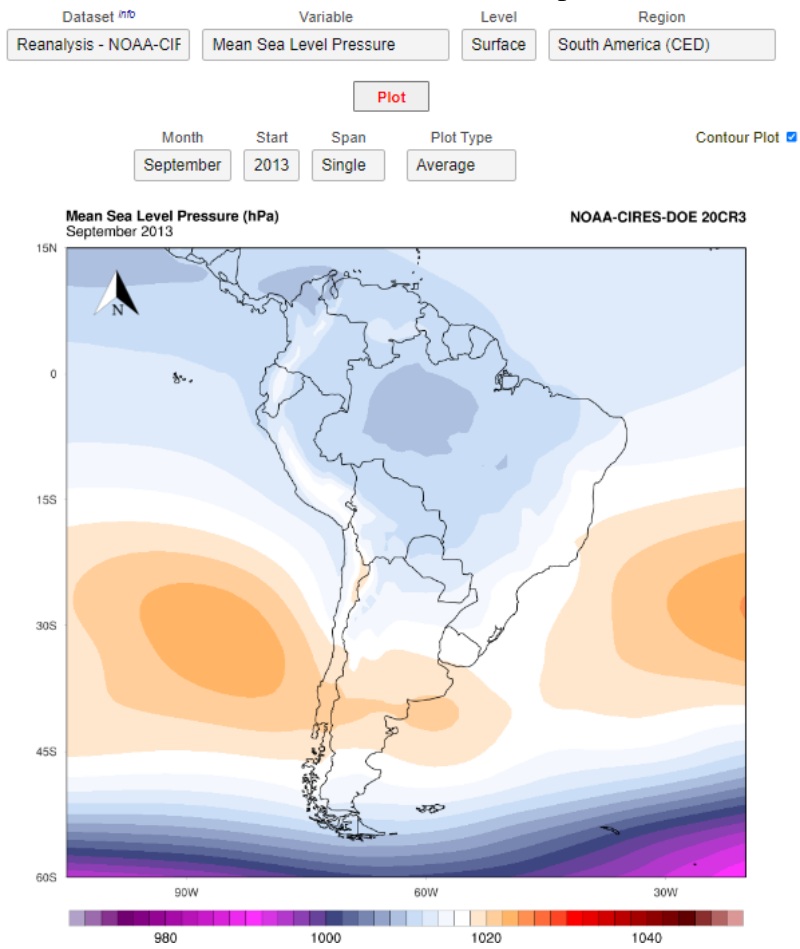
Fuente: Elaboración propia en base a datos del CR2 (s.f.).

Anexo 32: Anomalías de temperatura de septiembre del año 2013, con respecto al periodo 1981-2010.



Fuente: Modificada de Climate Reanalyzer (2023)

Anexo 33: Presión media a nivel del mar en septiembre del año 2013



Fuente: Climate Reanalyzer (2023) [Captura de pantalla, se le agregó norte]