
Universidad de la República
Centro Universitario Regional Noreste
Sede Tacuarembó
Ingeniería Forestal

**¿ESTÁ INCIDIENDO EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS TASAS
DE CRECIMIENTO DE LAS PLANTACIONES DE PINUS TAEDA
Y PINUS ELLIOTTII EN URUGUAY?**

Aylen Paiz Díaz

Tutor: Dra. Ludmila Profumo

Co-tutor: MSc. Juan Pedro Posse

Tacuarembó, 16 de diciembre de 2020

PÁGINA DE APROBACIÓN

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL NORESTE – SEDE TACUAREMBÓ

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba el Trabajo Final de Ingeniería Forestal:

Título:

¿ESTÁ INCIDIENDO EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS TASAS DE CRECIMIENTO DE LAS PLANTACIONES DE PINUS TAEDA Y PINUS ELLIOTTII EN URUGUAY?

Autor/es:

Aylen Paiz Díaz

Tutor:

Dra. Ludmila Profumo

Co-tutor:

MSc. Juan Pedro Posse

Puntaje: _____11_____

Tribunal:

ProfesorChristine Lucas.....

ProfesorPaola Serrentino.....

ProfesorLudmila Profumo.....

FECHA: 16 de diciembre de 2020

RESUMEN

Existen evidencias de que en las últimas décadas ha aumentado la variabilidad climática en América Latina, asimismo, también existe un desarrollo creciente de la actividad forestal en Uruguay, por lo que resulta de particular interés evaluar la respuesta de especies comerciales a esta variación. Es por esto que, bajo la hipótesis de que la variación de la precipitación y de la temperatura media, a nivel regional, como efecto del cambio climático, afecta de manera positiva las tasas de incremento anual de las dos especies de *Pinus* plantadas comercialmente en Uruguay, se planteó el objetivo de analizar el crecimiento de rodales de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* en las regiones Noreste y Centroeste del país, identificando las variables climatológicas más influyentes. Para esto se usaron métodos clásicos de dendrocronología, a partir de la colecta en tres sitios del Noreste y dos sitios en el Centroeste de Uruguay, con una muestra total de 23 árboles de *P. taeda* y 29 de *P. elliottii*. Desde el punto de vista de la respuesta al clima se encontraron diferencias en la respuesta de ambas especies y sitios a pesar de encontrarse a poca distancia (180 Km) entre ellos, escasa diferencia de altitud (75 m) y topografía. Se trabajó con seis cronologías ARSTAN, cuatro de *P. taeda*, dos en cada sitio y dos de *P. elliottii*, una para cada sitio. A partir de un análisis de autocorrelación se observó que la respuesta del crecimiento del año corriente está influenciada por el comportamiento de las variables climáticas ocurridas en dos años precedentes (t-2), un año precedente (t-1), y en el año actual (t). Se correlacionó además a las cronologías con la ocurrencia del fenómeno ENOS (“El Niño-Oscilación del Sur”), donde *P. elliottii* en el Centroeste no presentó correlaciones significativas, sin embargo presentó correlación positiva ($r= 0,31$) en el Noreste para el período noviembre-mayo del año actual, por otro lado *P. taeda* presentó correlación significativa positiva ($r= 0,33$) en uno de los sitios del Noreste para el período marzo (t-2) a enero (t-1) y negativa ($r= -0,86$) en el período de noviembre (t-1) a mayo del año corriente, mientras que en los dos sitios del Centroeste mostró una correlación negativa ($r=-0,31$) en el período septiembre a junio (t-1) y noviembre-julio (t-1), respectivamente. A partir del análisis del clima se pudo identificar la ocurrencia del “76 climatic jump” para el sitio del Centroeste, dicho análisis no se realizó para el Noreste porque las cronologías son muy cortas allí. A partir del análisis de componentes principales se observó que en el Centroeste las cronologías de ambas especies presentan correlaciones negativas significativas con la temperatura media mínima de primavera y en el Noreste con las temperaturas medias máxima y mínima de otoño/invierno. Concluyendo que para Centroeste hay afectación por parte del cambio climático, dado por el aumento del 4% de la temperatura media (1980-2019), generando anomalías negativas en el crecimiento de *P. elliottii* y *P. taeda*. El impacto del CC no ocurre sobre la precipitación para los períodos observados. Para el Noreste no se pudo concluir respecto al cambio climático dado que

las cronologías son muy cortas. Sin embargo, sí se pudo encontrar un impacto del ENOS sobre las anomalías del crecimiento, dependiente éste del período de tiempo considerado y de las fases del ENOS. Finalmente, la hipótesis no se confirma ya que, si bien se observan efectos del CC sobre el crecimiento de los rodales de Centroeste, éstos al contrario de lo hipotetizado, generan anomalías negativas en el crecimiento como efecto del aumento de la temperatura a consecuencia del CC.

Palabras clave: cambio climático, dendrocronología, *P. taeda*, *P. elliottii*.

ABSTRACT

There is evidence that climate variability has increased in Latin America in recent decades, and there is also a growing development of forestry in Uruguay, so it is of particular interest to evaluate the response of commercial species to this variation. This is why, under the hypothesis that the variability in precipitation and average temperature at the regional level, as an effect of climate change, positively affects the annual increase rates of the two *Pinus* species commercially planted in Uruguay, the objective was set to analyze the growth of *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands in the Northeast and Central-West regions of the country, identifying the most influential climatological variables. For this, classic dendrochronology methods were used, from the collection in three sites in the Northeast and two sites in the Central-West of Uruguay, with a total sample of 23 trees of *P. taeda* and 29 of *P. elliottii*. From the climatic point of view, differences were found in the response of both species and sites despite being within a short distance (180 km), little difference in altitude (75 m) and topography. Six ARSTAN chronologies were used, four for *P. taeda*, two for each site and two for *P. elliottii*, one for each site. From an autocorrelation analysis it was observed that the growth response of the current year is influenced by the behavior of the climatic variables, which occurred in two previous years (t-2), a previous year (t-1), and in the current year (t). The chronologies were also correlated with the occurrence of the ENSO phenomenon (“El Niño-Southern Oscillation”), where *P. elliottii* in the Central-East did not present significant correlations, however it presented positive correlation ($r = 0.31$) in the Northeast for the November-May period of the current year, on the other hand *P. taeda* presented a significant positive correlation ($r = 0.33$) in one of the Northeast sites for the period March (t-2) to January (t-1) and negative ($r = -0.86$) in the period from November (t-1) to May of the current year, while in the two central-eastern sites it showed a negative correlation ($r = -0.31$) in the September period to June (t-1) and November-July (t-1). From the climate analysis it was possible to identify the occurrence of the “76 climatic jump” for the Central-East site. This analysis was not performed for the Northeast because the chronologies are very short there. From the analysis of principal components, it was observed that in the Central East the chronologies of both species show significant negative correlations with the mean minimum spring temperature and in the Northeast with the mean maximum and minimum temperatures of autumn / winter. Concluding that for the Central East there is an impact on the part of climate change, given by the 4% increase in the average temperature (1980-2019), generating negative anomalies in the growth of *P. elliottii* and *P. taeda*. The impact of CC does not occur on precipitation for the observed periods. For the Northeast, it could not be concluded regarding climate change since the chronologies are very short. However, it was possible to find an impact of ENSO on growth anomalies, depending on

the period of time considered and the phases of ENSO. Finally, the hypothesis is not confirmed since, although there are effects of CC on the growth of the Central East stands, these, contrary to what was hypothesized, generate negative anomalies in growth as an effect of the increase in temperature as a result of CC.

Key words: climate change, dendrochronology, *P. taeda*, *P. elliottii*.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a todas las personas, empresas e instituciones que colaboraron desinteresadamente para hacer posible la realización de este trabajo.

A mi tutora, Ludmila Profumo por su interés, ayuda incondicional, motivación y tiempo dedicado, por enseñarme y aprender conmigo.

A mi co-tutor Juan Pedro Posse, por su predisposición a colaborar, siempre con entusiasmo y dedicación.

A Carlos Mantero por sus innumerables colaboraciones.

A todas las empresas e instituciones que permitieron el acceso a los puntos de colecta de muestras, a LUMIN, especialmente a Juan Pedro Posse, Juliana Ivanchenko y Gerardo Osorio; a Forestadora y Maderera del Norte S.A –FYMNSA, en especial a Daniela Malatés; a la Estación Experimental Bernardo Rosengurtt de Facultad de Agronomía –FAGRO, en especial a Carlos Mantero, Xenia Vieira y a todo el equipo de motosierristas.

A FRUTIFOR LUMBER COMPANY, en especial a Santiago Dogliotti, quien hizo posible el secado de las muestras.

Al Instituto Uruguayo de Meteorología, por brindarme los datos de clima para poder realizar el análisis climático.

A Madeleine Renom por su ayuda en la interpretación y análisis de las variables climáticas.

A Natalia Berberian por su apoyo en el análisis estadístico, colaboración y por involucrarse profundamente en el trabajo.

A Carolina Munka por su colaboración y predisposición.

Al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria –INIA, especialmente Roberto Scoz y Juan Pablo Lozano.

Al Laboratorio de la Madera del Tecnólogo en Madera sede Polo Educativo Tecnológico de Rivera, por permitirme hacer uso del laboratorio, especialmente a su encargada Cyntia Da Silva.

A Carlos Benquet y Milton Vera, por lijar las muestras, por cuidar del detalle y la calidad de su trabajo.

A Carla Padilla, por su ayuda durante la medición de anillos de crecimiento, y por las mañanas y tardes de laboratorio compartidas.

A la Sede Tacuarembó del CENUR Noreste, por hacernos sentir como en casa, por ser refugio de momentos felices y otros no tanto.

A Daniel Cal por su atención y siempre disposición a colaborar.

A Walter Duarte por facilitar el transporte a los puntos de colecta de muestras.

Al grupo de docentes de la carrera Ingeniería Forestal, y a todos mis compañeros, que han sido parte esencial del proceso.

A mis amigas, de la carrera y de la vida, por alentarme y apoyarme en cada momento.

A mi hermano Ian por hacerme querer cumplir mi rol de hermana mayor de la mejor forma posible, cuando es de él de quién aprendo día a día que lo simple es lo más valioso.

A mis padres, Rosana y Alejandro por darme todo y más, por su amor y dedicación, por sentir mis logros suyos, por enseñarme el valor de las cosas y por motivarme siempre a ir por mis sueños. En especial a mi padre, un ser puro corazón, ejemplo de sabiduría y bondad, por terminar cada charla con la frase “C'est la vie”, cada vez que deja una enseñanza de esas que se guardan para siempre, por tener siempre las palabras justas en el momento correcto. Y a mi madre, por tener eso que la hace ser ella, tan sensible y especial, ejemplo de que el esfuerzo de hoy, por más pequeño que parezca, será la recompensa de mañana.

... gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
1.2 Objetivos	13
1.3 Revisión bibliográfica	14
1.3.1 Descripción de las especies <i>Pinus taeda</i> y <i>Pinus elliottii</i> ENGELM.....	14
1.3.2 Cambio climático y crecimiento de los árboles.....	16
1.3.3 Dendrocronología.....	21
1.3.3.1 Origen, antecedentes y definición	21
1.3.3.2 Uso de la dendrocronología en América Latina.....	23
1.3.3.3 Métodos y aplicaciones de la dendrocronología	26
1.3.3.4 Principios de la dendrocronología.....	30
1.3.3.5 Estudios dendrocronológicos en <i>P. taeda</i> y <i>P. elliottii</i>	31
1.3.3.5 Cambio climático, fenómeno ENOS y ocurrencia de eventos extremos.....	35
1.4 Organización de ésta monografía	36
2. MATERIALES Y MÉTODOS	37
2.1 Localización	37
2.2 Caracterización climática	42
2.3 Preparación de muestras y medición.....	45
2.4 Evaluación de los patrones de crecimiento	47
2.5 Obtención de las cronologías	47
2.6 Análisis climático.....	50
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
3.1 Análisis de variables climáticas	52
3.2 Relaciones biométricas.....	56
3.2.1 Valores de incremento radial de la muestra	57
3.2.2 Crecimiento acumulado, periódico y medio.....	59
3.3 Cronologías	66
3.4 Análisis climático.....	71
3.4.1 <i>Pinus elliottii</i>	71
3.4.2 <i>Pinus taeda</i>	76
3.5 Correlaciones con enos.....	85
3.6 Análisis de componentes principales de variables ambientales	88
3.6.1 Pca Cerro Largo	88
3.6.2 Pca Rivera	91
3.7 Before and After Control Impact (BACI)	94
3.8 Análisis de variables climáticas más influyentes	100

4. CONCLUSIONES	102
5. BIBLIOGRAFÍA.....	104

1. INTRODUCCIÓN

Pinus taeda L. y *Pinus elliottii* Engelm. han sido de las especies comerciales de su género que mejor adaptación han presentado frente a las condiciones ambientales de nuestro país, tal como muestran distintas plantaciones comerciales y ensayos realizados bajo condiciones adecuadas de manejo.

La cartografía forestal realizada a partir del procesamiento e interpretación de imágenes satelitales de Sentinel 2 en 2018, indica que la superficie bajo proyecto plantada con las especies *P. taeda* y *P. elliottii* alcanza 180.019 ha, representando un 20,6% de la superficie total registrada [1]. Esto se debe a que la zona presenta las mejores condiciones climáticas y los mejores suelos para el desarrollo y crecimiento del cultivo. A diferencia de los *Eucalyptus spp.*, la mayor parte de las plantaciones de *Pinus taeda* en el país, son sometidos a sistemas de manejo intensivos con podas y raleos para la producción de madera sólida de “alta calidad”, con turnos que van de los 15 a 25 años [2].

Dado que existen pruebas de que en las últimas décadas se ha observado una variabilidad mayor en el clima de América Latina y con el desarrollo creciente de la actividad forestal en Uruguay, resulta de interés evaluar la respuesta de especies de interés comercial a esta variación climática. Una disciplina ampliamente utilizada para el estudio de la respuesta de los árboles a la variabilidad en el clima es la dendrocronología, ciencia que estudia los anillos de crecimiento de los árboles, el tiempo de formación y su relación con las condiciones medioambientales pasadas de un sitio [3].

Los anillos de crecimiento de los árboles son archivos naturales de las condiciones medioambientales, como: temperatura, precipitación, composición química del aire o del agua, variaciones del crecimiento de la biomasa vegetal, erupciones volcánicas, variaciones geomorfológicas, actividad solar y rayos cósmicos [4].

1.2 Objetivos

Bajo la hipótesis planteada de que el aumento de la precipitación media y de la temperatura media a nivel regional, como efecto del cambio climático, afecta de manera positiva las tasas de incremento anual de las dos especies de *Pinus* plantadas comercialmente en Uruguay, se ha planteado el objetivo de analizar el crecimiento de rodales de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*

en las regiones Noreste y Centroeste de Uruguay identificando las variables climatológicas más influyentes.

Como objetivos específicos se plantearon los siguientes:

- a. identificar cambios en las variables climáticas de precipitación y temperatura para en los períodos 1966-2019 para Cerro Largo y 1987-2019 para Rivera ;
- b. comparar patrones de crecimiento entre los rodales de la región Noreste y los de la región Centro Este de Uruguay por especie;
- c. construir las cronologías correspondientes por especie y por sitio;
- d. determinar qué variables climáticas han sido las más influyentes en el crecimiento de las especies en cuestión en los últimos 30 años.

1.3 Revisión bibliográfica

1.3.1 Descripción de las especies *Pinus taeda* L. y *Pinus elliottii* ENGELM.

Pinus taeda es la especie conífera más importante en la región de los pinos del Sur de Estados Unidos de América (EUA), con un volumen de existencias ligeramente mayor al 50% del volumen total del género. Se extiende a través de todo el Sur y Sureste del país, con excepción de la zona Sur de Florida y su área de distribución natural va desde Delaware hasta Texas según se observa en la figura 1 [5].

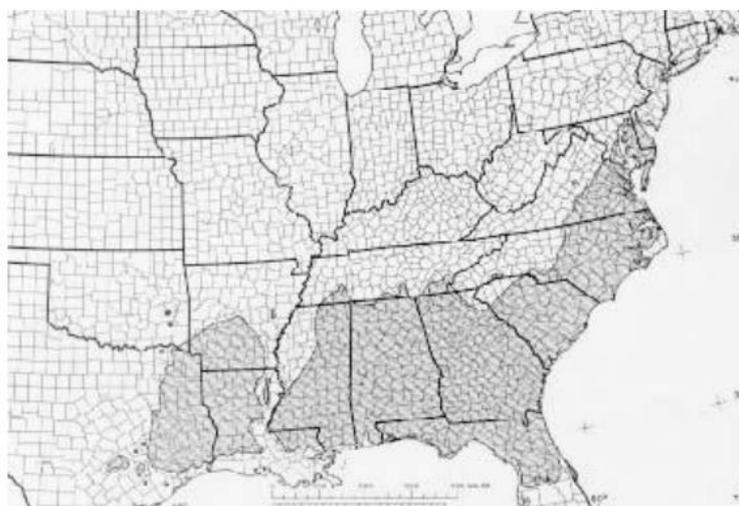


Figura 1. Área de distribución natural de *Pinus taeda*

Fuente: Baker y Langdon

El clima en dicha zona es principalmente húmedo, de cálido a templado, con veranos largos y calurosos e inviernos relativamente suaves. La precipitación media anual varía desde los 1020 a 1520 mm. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 13 a 24 °C. La temperatura media en pleno verano es de 27 °C, pudiendo superar los 38 °C. En invierno la temperatura media oscila entre 4 a 16 °C, pudiendo llegar a - 23 °C. El período libre de heladas va desde los 5 meses en la parte norte de la sierra, a 10 meses en los Estados ribereños del Sur. Los suelos son predominantemente Ultisoles en dicha zona. Son suelos de color pardo rojizo oscuro, sin presencia de saturación hídrica, que tienen un horizonte argílico de poco espesor y un porcentaje de saturación de bases inferior al 35%. El mejor crecimiento se encuentra en suelos moderadamente ácidos [6].

Es un árbol de rápido desarrollo y crecimiento. Presenta gran porte que puede alcanzar los 50 metros de altura. Presenta una copa piramidal, con ramas inclinadas hacia abajo. Las acículas se encuentran agrupadas de a 2 a 3, son de 15 a 20 cm de largo, presentando una vaina persistente. Los estróbilos femeninos son sésiles y se encuentran agrupados de a 2-4. La corteza es de color rojiza a canela, profundamente surcada, con un espesor de 1.5 a 2.5 cm [6].

Por otra parte, *P. elliotii* es originaria del sudeste de Estados Unidos y se ha adaptado exitosamente en Uruguay, alcanzando elevados niveles de productividad, siendo su principal destino la industria de madera sólida. *P. elliotii* presenta un elevado potencial para regenerarse naturalmente en determinados ambientes (Figura 2:[7]).



Figura 2. Distribución natural de *P. elliotii*.

Fuente: Facultad de Ciencias, Udelar

Es un árbol de hasta 30 m de altura, presenta copa cónica a redondeada. Sus acículas se caracterizan por ser entre 15 y 20 cm de largo y se agrupan de a dos por hacecillo. Los estróbilos masculinos son cilíndricos, mientras que los femeninos son pedunculados. Las semillas son ovoides, rugosas y sus alas son 4 veces más grandes que la semilla.

1.3.2 Cambio climático y crecimiento de los árboles

El crecimiento de los árboles se debe a la formación, diferenciación y expansión de nuevas células que dan origen a nuevos tejidos y órganos. El aumento de tamaño en un intervalo de tiempo debido al crecimiento en árboles y plantas leñosas, se da debido a la actividad de meristemas primarios y secundarios. Los meristemas primarios son responsables del crecimiento en altura, mientras que el meristema secundario (cambium) da lugar al crecimiento en diámetro a partir de la producción de capas sucesivas de xilema y floema (el cual con el tiempo dará lugar a la formación de corteza). Pero, la aparición de algún factor externo y/o interno impone una limitante, generando que el crecimiento de los árboles no sea un proceso continuo, lo que genera la formación de anillos de crecimiento. Generalmente, en zonas donde existe una estacionalidad marcada, los árboles detienen o desaceleran su crecimiento en las épocas desfavorables y lo retoman cuando las condiciones climáticas se vuelven favorables. Este patrón anual de actividad y reposo, queda marcado en la estructura de la madera que forma capas concéntricas anuales, las cuales, a partir de un corte transversal, se observan como anillos según se ve en la figura 3 [8].



Figura 3. Corte transversal en Pinus taeda donde se observan anillos de crecimiento anuales.

Autor: A. Paiz, 2019

En la formación del anillo anual, la producción de nuevas células de xilema es rápida al principio, se enlentece a medida que avanza el verano y finalmente, se detiene cuando las temperaturas vuelven a ser bajas. Estas diferencias de velocidad en la formación de las células también quedan reflejadas en las características de la madera de los anillos. Así y debido a los cambios en el ritmo de la formación de un anillo las células de la madera que lo forman también son distintas. La madera temprana, formada al principio del periodo de crecimiento, es distinta de la madera tardía, la formada al final y por esta razón en el anillo anual de muchas especies se suelen distinguir dos bandas [8].

En coníferas o gimnospermas la madera temprana se caracteriza por ser más clara y está formada por traqueidas grandes y de paredes celulares finas, mientras que la madera tardía, se presenta como más oscura y está formada por células más pequeñas y de paredes celulares más gruesas. Estas diferencias de color y tamaño en los anillos anuales son las que permiten identificar y datar los mismos tal como se puede observar en la figura 4 [8].



Figura 4. Testigo de madera pulido y datado sobre un soporte de madera. Se observa la presencia de bandas claras y otras más oscuras, correspondientes a la madera temprana y tardía, respectivamente. Se observa además la variabilidad en el grosor de los anillos [8].

En regiones templadas y frías el período de crecimiento se ve fácilmente delimitado dado que la oscilación de la temperatura anual es muy grande, por lo que el período de crecimiento en estas regiones suele ser corto, extendiéndose desde finales de primavera al final del verano. Es por esto que, los anillos anuales son angostos y la diferencia entre el grosor de los anillos es pequeña [8].

En las regiones situadas entre las zonas templadas y los desiertos subtropicales confluyen especies de origen templado y boreal, como muchas coníferas y especies de origen subtropical o tropical. Bajo unas condiciones climáticas típicamente mediterráneas el crecimiento de los árboles está limitado por las bajas temperaturas del invierno y la falta de agua en verano de manera que la

primavera y el otoño suelen ser las épocas más favorables para el crecimiento. Esta estacionalidad determina un ritmo bimodal de la actividad del cambium que se refleja en la estructura de la madera del anillo que muestra bandas intra anuales (falsos anillos) dificultando la identificación y la datación de los anillos anuales. Además, como las temperaturas son altas durante muchos meses, el período de crecimiento puede ser muy largo y si las precipitaciones son abundantes y están bien repartidas a lo largo del año, los anillos son muy anchos. No obstante, como la variabilidad inter e intra anual climática es elevada también se producen diferencias grandes en el grosor de los anillos. Por otra parte, si las precipitaciones son escasas o no están bien repartidas a lo largo del año los anillos son más estrechos. La actividad del cambium es muy sensible a los factores ambientales y climáticos y esta sensibilidad queda reflejada en las características de los anillos anuales formados. Por lo tanto, la variabilidad del clima, la composición atmosférica, las características físicas y químicas del suelo, modifican la tasa de formación de nuevas células, su número, su tamaño y el material utilizado para construirlas, determinando, a su vez, las características físicas (grosor y densidad) y químicas (isótopos, metales pesados, etc.) de los anillos. Todas estas características pueden ser cuantificadas anual y estacionalmente separando la madera tardía y temprana, anillo por anillo y construyendo series temporales de distintas variables: series de grosor, de densidad, de isótopos, de metales pesados, etc. dependiendo de los objetivos de la investigación [8].

Además, el efecto de factores puntuales como por ejemplo si el cambium sufre alguna herida o lesión por fuego, animales, el hombre, etc., puede ser registrada en los anillos de forma que el acontecimiento quedó grabado como una cicatriz, marcando el anillo del año correspondiente [9]. Todas estas señales convenientemente datadas y replicadas constituyen una cronología cuyo patrón temporal dependerá de la frecuencia con la que se produzca un determinado acontecimiento.

De los factores antes mencionados el clima es común a todos los árboles de una región determinada. La variabilidad interanual e intra anual del clima de dicha región afectará a todos los árboles y quedará reflejada de forma parecida en el anillo formado en un año determinado, por todos los árboles que habitan en la región. Esta similitud entre árboles es notable cuando las condiciones climáticas se vuelven especialmente limitantes para el crecimiento. Por ejemplo, si la disponibilidad de agua es, en un año determinado, el factor más limitante para el crecimiento debido a que las precipitaciones son escasas, todos los árboles de la zona afectada experimentaron un menor crecimiento por la no disponibilidad de agua en ese año. Por el contrario, en las regiones

frías como las boreales o en la alta montaña, el factor más limitante suelen ser las bajas temperaturas de los meses de verano. El clima representa entonces el factor ecológico más importante. La variabilidad climática anual imprime una señal clara de su historia en los anillos de los árboles afectando, entre otros, a su grosor relativo. Cuando el clima es muy limitante para el crecimiento, los anillos que se forman ese año son estrechos en la mayoría de los árboles de una región, es un año característico. Como resultado de la estrecha relación entre el crecimiento y el clima, las series de anillos anuales formados por los árboles que crecen bajo unas mismas condiciones climáticas presentan una sincronía, su patrón de variación temporal en el grosor es muy similar. Ese patrón o secuencia de anillos característicos (anchos y estrechos) es propio de un determinado período de tiempo: es la huella del clima que es reconocible a pesar de quedar grabada sobre las marcas de otros factores que también han afectado al crecimiento [8].

Existen evidencias de que la concentración de CO₂ atmosférico ha aumentado en alrededor de un 30% a partir de la revolución industrial [10]. Se estima que este incremento de CO₂ en la atmósfera tiene un doble efecto sobre el planeta: efecto invernadero y fertilización de la vegetación. En el primer caso, junto con otros gases de invernadero, el CO₂ provoca calentamiento global de tal manera que las zonas climáticas del planeta podrían desplazarse hacia los polos y hacia mayores elevaciones alterando considerablemente la distribución de la vegetación [11]. El efecto fertilizante del CO₂ elevado, por otra parte, afecta de manera directa el crecimiento y la fisiología de algunas plantas, lo que a su vez puede alterar la estructura y el funcionamiento de las comunidades vegetales y de los ecosistemas. Estudios recientes revelan que el clima mundial ha sido particularmente inusual en el último siglo y que la década de los 90's fue la más caliente del último milenio [12].

Se sabe además que en el último siglo se ha registrado un incremento en la frecuencia de eventos climáticos extremos [13]. Numerosos estudios indican que el cambio climático que se registra en las últimas décadas está afectando de diversas maneras a los ecosistemas naturales [11].

Dada la necesidad de comprobar la ocurrencia del cambio climático, es que se ha demostrado que uno de los indicadores biológicos que detecta posibles respuestas al mismo es el crecimiento o aumento de biomasa vegetal [14].

El proceso de crecimiento se ve afectado por el aumento de CO₂ en la atmósfera de una manera directa por el efecto de fertilización y de una manera indirecta por el efecto invernadero. Esto

último implica aumento de temperatura, que a su vez afecta procesos directamente relacionados con el crecimiento como las tasas fotosintéticas y el uso eficiente del agua. Una gran cantidad de artículos reportan un aumento en la producción de algunos cultivos y en las tasas de crecimiento de las plantas bajo condiciones controladas como respuesta al aumento de la concentración de CO₂, por efecto de fertilización y por efecto invernadero [10].

Los resultados de una exhaustiva revisión de 342 artículos en los que se refieren más de 1000 experimentos sobre los efectos del aumento de CO₂ atmosférico en el crecimiento y desarrollo de las plantas, revelan que en promedio se reportan aumentos en el crecimiento de 62% en especies arbóreas [15]. En un análisis amplio de los resultados registrados en más de 500 reportes sobre los efectos de concentraciones elevadas de CO₂ en la acumulación y distribución de biomasa en los organismos, Curtis [16] encontró que tanto la biomasa total como la asimilación neta de CO₂ incrementan significativamente en ambientes con el doble de la concentración de CO₂. Ceulemans *et al.* [17] encontraron en un estudio bajo condiciones controladas con *Pinus sylvestris* de tres años, que bajo condiciones de CO₂ elevado, los anillos de crecimiento eran significativamente más anchos como resultado de un incremento en el ancho de la madera temprana. Telewski *et al* [18] al comparar el crecimiento de *Pinus taeda* bajo condiciones ambientales y en condiciones de CO₂ elevado también encontró anillos de crecimiento más anchos bajo condiciones de CO₂ elevado; Curtis [16] en un estudio bajo condiciones controladas encontraron que bajo CO₂ elevado la biomasa total de los individuos masculinos de *Populus tremuloides* se incrementó de 58 a 66 % y la de los femeninos de 22 a 70%.

La mayoría de las investigaciones que hasta la fecha se han realizado sobre los posibles efectos del aumento de CO₂ y del cambio climático sobre el crecimiento de las plantas con frecuencia son de corto plazo, se han realizado con plántulas y generalmente bajo condiciones controladas. Una herramienta de investigación alternativa que permite estudiar las tendencias en el crecimiento a largo plazo a través del tiempo, en plantas adultas y en condiciones naturales es el estudio del crecimiento a través del análisis de los anillos de crecimiento anual de especies arbóreas. Estos representan enormes bancos de información de gran potencial para la construcción de modelos de predicción [19]. Algunos estudios dendrocronológicos han reportado aumento en la tasa de crecimiento radial de los árboles durante las últimas décadas, lo cual coincide con las predicciones de fertilización por incremento de CO₂.

Los estudios sobre cambio climático se enfrentan a la escasez generalizada de registros meteorológicos pues, incluso en los países desarrollados, los registros climáticos confiables no se remontan más de 100 años. Una de las aplicaciones más importantes de la relación que existe entre el crecimiento anual y algunos factores climáticos es la posibilidad de poder reconstruir dichos factores mediante modelos de regresión utilizando los escasos registros climáticos como variable dependiente y los índices de crecimiento como predictores. La reconstrucción de factores climáticos del pasado constituye una base para el estudio de la variabilidad del clima y para el discernimiento entre las variaciones naturales y los cambios en el clima relacionados con actividades humanas, así como para la predicción de cambio climático en el futuro [20].

1.3.3 Dendrocronología

1.3.3.1 Origen, antecedentes y definición

Desde la antigüedad, el hombre se ha preocupado por entender los fenómenos y sucesos del ambiente. Los orígenes de la dendrocronología, se remontan al 322 a.C, cuando Teofrasto estudió el tiempo a partir de los astros, las nubes, los animales y las plantas y de esa manera relaciona la interacción entre la formación de los anillos de crecimiento y los fenómenos meteorológicos [21].

Durante el siglo XV, Leonardo Da Vinci al observar secciones transversales de pinos, escribió “los anillos en los troncos de árboles cortados muestran los años y, según su espesor, años más o menos secos” [22]. Posteriormente, en el año 1737, en Francia, Duhamel y Buffon (a quienes se atribuye la primera investigación sobre anillos de crecimiento), intentaron explicar la excentricidad de los anillos de crecimiento, por qué presentan espesores desiguales y el proceso de formación de la albura [23].

Studhalter [21], cataloga al botánico alemán Burgsdorf como el padre del crossdating (cofechado), ya que en el 1783 estableció que la formación de anillos de crecimiento se correlaciona en árboles de la misma especie y de la misma localidad, además observó que en un suceso de heladas extremas que se produjo en 1708, se vio reflejado en el desarrollo de los anillos de crecimiento.

Geord Ludwig Hartig, uno de los padres de la silvicultura, produjo curvas de volumen por unidad de área en función de la edad a partir del análisis de anillos de crecimiento, luego, su hijo, Theodor Hartig (1805-1880), estudió las estructuras anatómicas de la madera y el proceso de formación de

anillos de crecimiento, mientras que Robert Hartig (1869-1901), su nieto, realizó varios estudios sobre anatomía y ecología y cómo estas disciplinas se relacionaban con los anillos de crecimiento, además de utilizar los anillos para datar daños provocados en los árboles por fenómenos tales como granizo, heladas e insectos [23].

El forestal austriaco Arthur Freiherr Von Seckendorff-Gudent (1845-1886) estudió la anualidad y la edad de 6410 árboles de *Pinus nigra*, colectados en diversas regiones del imperio austro-húngaro; sus observaciones le permitieron establecer secuencias y patrones mediante una técnica que denominó “anillos característicos” hoy conocida como crossdating [23].

Actualmente, se conoce a Andrew E. Douglass (1867-1962) quien fue un astrónomo norteamericano, como padre de la dendrocronología, ya que, a partir de sus estudios de la actividad solar y su relación con los fenómenos climáticos en la tierra, descubrió la existencia de una dependencia entre el espesor de los anillos de crecimiento y la ocurrencia de precipitaciones en árboles de *Pinus ponderosa* [24]. A su vez, Bruno Huber (1899-1969), a partir de los descubrimientos de Douglass, promovió el uso de la dendrocronología en Europa y juntos, establecieron los principios de la dendrocronología moderna, motivando una nueva área de investigación que promete diversas aplicaciones, entre ellas en arqueología, geomorfología y climatología [23].

En 1870, el alemán Dietrich Brandis, conocido como el padre de la silvicultura tropical, realizó el primer estudio dendrocronológico en el trópico, donde estudió el crecimiento de *Tectona grandis* y determinó los ciclos de corta con base en los anillos [25]. En 1931, Brandis realizó en Java la primera reconstrucción de la precipitación con los anillos de *Tectona grandis* remontándose 415 años atrás, sin duda, la primera reconstrucción climática del trópico [25]. En 1954, César Pérez, supuso acertadamente que los anillos de *Cordia alliodora* (primera especie arbórea tropical estudiada) eran anuales.

Mariaux (1967) fue el primero en plantear un método para demostrar la anualidad de los anillos de crecimiento, el cual consiste en realizar marcas en el cambium vascular (heridas), que dejan una cicatriz en la madera con fechas conocidas y luego se corrobora un año o años después, mediante observaciones macro y microscópicas de una sección transversal, o muestra de barreno, tomada a la altura de la herida del árbol en cuestión. Este método es conocido como Ventanas de Mariaux [25].

Actualmente, el método más empleado para verificar la anualidad de los anillos de crecimiento de árboles tropicales es el análisis del contenido de C^{14} de la madera; este es un marcador isotópico muy importante para datar la fecha de formación de productos orgánicos [25].

En la actualidad, se reconoce como la mayor autoridad en el tema al profesor Martin Worbes de la Universidad de Gotinga (Göttingen, Alemania), quien, desde 1985, ha llevado a cabo numerosos estudios dendrocronológicos en los trópicos de América y África [3].

A partir de esto, se denomina dendrocronología a la ciencia que estudia los anillos de crecimiento de los árboles, el tiempo de formación y su relación con las condiciones medioambientales pasadas de un sitio. A su vez, es la ciencia que permite datar la madera con anillos anuales de crecimiento y dado que muchos fenómenos naturales se entienden mejor desde su pasado, por ello, la dendrocronología es una herramienta útil en ecología, climatología, química, geomorfología y arqueología [22].

1.3.3.2 Uso de la dendrocronología en América Latina

La dendrocronología está conceptualizada como la ciencia que hace posible la detección y análisis de los anillos de crecimiento en la madera de los árboles y de piezas en la madera, incluyendo la aplicación de la información registrada en su estructura, para estudios ambientales e históricos. También es una herramienta importante para la reconstrucción del crecimiento de los árboles, con la aplicación inmediata en los planes de manejo forestal sostenible [26]. Es por eso que científicos y académicos en todo el mundo, a partir de la preocupación creciente sobre los fenómenos climáticos y como se ve afectado el cambio climático, han implementado la dendrocronología como disciplina de estudio.

En América Latina los estudios dendrocronológicos eran escasos porque se creía que las especies tropicales y subtropicales no marcaban anillos de crecimiento, pero una vez que se empezó a demostrar que diversas especies, si lo hacían, hubo una explosión de trabajos en este sentido y actualmente existen diversos estudios que han utilizado ésta ciencia. En Bolivia, López [26], desarrolló los primeros estudios dendrocronológicos de árboles en 11 especies comerciales, de la provincia Guarayos, Depto. Santa Cruz, analizando los anillos de crecimiento anuales para la evaluación de los ciclos de corta de los planes de manejo forestal. Además, en la Universidad Autónoma Gabriel Renó se han generado diversas tesis sobre dendrocronología aplicada a

especies de árboles en Bolivia. A su vez, el Programa de Gestión de Bosques de la Amazonía Boliviana (PROMAB), divulgó dos importantes publicaciones científicas: En la primera, Brien *et al* [27] describieron los diferentes tipos de anillos de crecimiento de los árboles de 32 especies tropicales, indicando que *Cedrelinga catenaeformis* y *Cedrela odorata*, alcanzan edades máximas de 123 y 308 años, respectivamente. En la segunda, Brien *et al* [27] evaluaron la recuperación del volumen de leña de árboles de cuatro especies sometidas a diferentes ciclos de explotación forestal, indicando que 20 años son demasiado escasos para una recuperación completa del volumen de madera.

En Brasil surgieron estudios y tesis que analizaron los anillos de crecimiento en zonas de la selva amazónica, y aún se observa un reto frente al estudio del bosque atlántico, dado que existen pocas publicaciones sobre la anatomía, calendario de los anillos y relaciones con la fenología y el clima [27].

México se ha convertido en uno de los principales países de la región en la investigación sobre dendrocronología, con el registro de cronologías de anillos de crecimiento en 1940-1950 con base en árboles de *Pinus sp.*, *Pseudotsuga mensiesii* y *Abies duranguensis*. En la década de los 70 el “Proyecto Mexicano de Anillos de Crecimiento” originó 20 cronologías de árboles, además de otras cronologías cortas de madera recogidas de las antiguas iglesias de las misiones jesuitas [28]. En dendroarqueología, Scott [29] construyó una cronología flotante de 485 años con madera de coníferas obtenidas de ruinas prehistóricas de Casas Grandes, en Chihuahua. Las cronologías de anillos de crecimiento de árboles de coníferas de las regiones norte y noroeste fueron correlacionadas con las lluvias de invierno e índices de El Niño/oscilación del sur, aplicadas en la reconstrucción de esos índices y en la datación de árboles [28].

Por otro lado, en Perú existen registros bibliográficos sobre el análisis de los anillos de crecimiento de árboles de *Myrciaria sp.*, *Chorisia sp.* y *Cedrela sp.* en la Amazonía peruana [30]. Rodríguez *et al* [30] seleccionaron árboles de *Capparis angulata*, *Bursera graveolens* y *Loxopiterigium huasango*, determinando las curvas del incremento radial del tronco, obteniendo una alta correlación de los índices de anchura de los anillos y los niveles de precipitación.

En Argentina, se analizaron los árboles de *Cedrela fissilis* a través de los métodos de la dendrocronología, por Boninsegna *et al.* [31], permitiendo determinar su edad (60-200 años) y la tasa de crecimiento, convirtiéndose en una herramienta importante para la gestión y reconstrucción de las variables climáticas, en la selva de Misiones, al sur de la selva amazónica.

Villalba *et al.* [32] llegó a la conclusión que, en la zona Noroeste de Argentina, los anillos de crecimiento son anuales, con buena uniformidad circular, lo que permite obtener dataciones cruzadas de alta calidad, y a partir de eso, se realizaron cronologías que han sido utilizadas para la reconstrucción del clima en base a las variables precipitación y temperatura, para los últimos 300 años.

En países como Costa Rica los anillos de crecimiento de *Cordia alliodora* fueron analizados y sincronizados [33], continuado por Lojan [26] con un estudio más amplio, quien relaciona respecto al clima los anillos de árboles de numerosas especies. McKenzie [34] estudió la dinámica de la formación de anillos a través de lesiones del cambium en árboles de *Prioria copaifera*. Además, Hazlett [35] evaluó la estacionalidad de la actividad cambial de árboles de *Pentaclethra*, *Goelthalsia* y *Carapa* correlacionada con las variaciones climáticas.

Lo anterior permite observar, que los bosques latinoamericanos y centroamericanos han sido objeto de estudio en la rama de la dendrocronología, dado la diversidad de especies y su amplia extensión en el territorio, por lo que cumplen un rol muy importante para el mantenimiento y equilibrio climático a nivel global. De esta manera, resulta importante promover la dendrocronología como ciencia que trabaje de forma interdisciplinaria con otras ramas de la ciencia, para que sea de utilidad a la hora de responder a desafíos de la sociedad frente a estrategias y alternativas para la adaptación y mitigación del cambio climático, además de herramienta de gestión para los recursos forestales mundiales.

En Uruguay, Profumo [36], utilizó el análisis de los anillos de crecimiento para identificar el potencial bioindicador de la dinámica de ambientes fluviales de siete especies arbóreas subtropicales en dos sub-cuencas del río Tacuarembó en el departamento de Rivera, donde a partir de los resultados obtenidos, se permitió visualizar una línea de trabajo que utilice especies arbóreas como indicadores de calidad ambiental de cuencas hidrográficas.

Otro estudio, realizado en tres sitios de Uruguay (Isla Cristalina – Rivera, Sierra de la Blanqueada – Rocha y Bosque parque de la región Tres Bocas – Soriano), utilizó la dendrocronología como herramienta para evaluar el incremento anual de dos especies de valor ecológico y económico como lo son el coronilla (*Scutia buxifolia*) y el espinillo (*Vachellia caven*) y comprender las edades de los árboles que son raleados selectivamente y cuáles son las tasas de incremento anual de esas especies en distintas ecorregiones del país [37].

La dendrocronología se utilizó también en Uruguay para estimar el incremento anual de *L. molleoides* en dos localidades de Paysandú y Rivera, en el arroyo Guaviyú y las nacientes del Río Tacuarembó, respectivamente, a partir de la colecta de 10 individuos de cada sitio [38].

Profumo *et al* [38], emplearon además la dendrocronología como herramienta en un estudio cuyo objetivo fue entender la variabilidad regional del crecimiento de *Sebastiania commersoniana* a través del análisis de las tasas de incremento anuales en diámetro y de área basal en los bosques ribereños y serranos de las eco-regiones Litoral Oeste y Sureste y norte del país, es decir, comparar el incremento en diámetro del blanquillo en dos regiones pluviométricas contrastantes y en diferentes tipos de suelos.

Ferreira [39], estudió el potencial de *Scutia buxifolia* para estudios dendrocronológicos en Uruguay a partir del estudio de patrones temporales de crecimiento de 14 árboles en la región de Rocha, y su correlación con las variables climáticas de temperatura y precipitación, además del análisis de la variabilidad en las tasas de crecimiento en árboles expuestos a diferentes condiciones ambientales tales como la elevación, exposición y pendiente y la correlación con atributos de desarrollo como la altura, diámetro a la altura del pecho (DAP) y área de copa.

Lucas *et al* [40], a partir de estudios dendrocronológicos, presentaron las dos primeras cronologías de anillos de crecimiento de 29 árboles de *Scutia buxifolia* de dos sitios en el norte y sur de Uruguay, y a partir de la datación cruzada, establecieron correlaciones entre el crecimiento de los árboles entre 1950 y 2012 con el clima regional, incluyendo las variables de precipitaciones, temperatura, y el índice de gravedad de la sequía de Palmer- PDSI, El Niño Southern Oscillation (ENSO) y el modo anular meridional (SAM).

1.3.3.3 Métodos y aplicaciones de la dendrocronología

El principio fundamental de la dendrocronología es la datación cruzada o crossdating, de manera que, si se desean aplicar métodos de análisis dendrocronológicos haciendo uso de la misma, los árboles en estudio deben presentar anillos anuales, además de que pocos factores climáticos sean los que dominen el crecimiento de los mismos, de manera que los árboles sensibles a las variaciones del clima, reaccionan mostrando los efectos en los anillos de crecimiento [8].

La datación de las secuencias de anillos de los árboles vivos viene facilitada porque es una secuencia que está anclada en el tiempo, ya que el último anillo corresponde al último año de crecimiento [8]. De esta manera, retrocediendo hacia atrás en la secuencia de anillos, es decir en

el tiempo, se va asignando a cada uno de los mismos, el año en el cual se formó. Luego, para lograr una datación más certera, se procede a la comparación de las dataciones individuales (datación cruzada), comprobando visualmente la existencia de sincronía entre los anillos de todos los árboles en estudio, es decir, comprobar si existe un patrón entre los anillos de crecimiento de los árboles que han crecido en un período y ubicación geográfica común. Los cambios en el grosor de los anillos reflejan la respuesta de los árboles a la variabilidad del clima, teniendo en cuenta esto, luego de obtenidas las series individuales datadas e inter datadas, se procede a la medición del grosor de los anillos de crecimiento.

Una vez medido el grosor de los anillos, se realiza la validación estadística de las dataciones, utilizando programas estadísticos que busquen eliminar las variaciones producto de la edad y estime los residuos, de manera que las series permanezcan estacionarias, además de comparar cada serie individual con la cronología maestra creada a partir del resto de las series, con un nivel de significancia de 95 y 99%. Para éste paso, el programa estadístico más comúnmente utilizado es el COFECHA [41].

La señal climática grabada en los anillos hace viable la validación de la datación, a esto deben sumarse señales grabadas en los anillos que reflejan las variaciones de factores externos e internos que influyen en alguna medida en el crecimiento.

En dendrocronología, suele usarse un modelo aditivo para considerar un conjunto de factores que pueden haber influido en el grosor de los anillos, con el fin de describir la variabilidad en las series de crecimiento [19]. El modelo se caracteriza por su simplicidad, dado que los factores que pueden influir en el grosor de los anillos son clasificados en grupos y las interacciones entre ellos no son considerados. La expresión matemática de dicho modelo es la siguiente:

$$[1] G_t = T_t + C_t + a_1 \cdot P_{1t} + a_2 \cdot P_{2t} + \epsilon_t$$

De [1] se sabe que G_t es la serie de valores del grosor medido del anillo del año t , T_t es la serie de valores predichos por una función de crecimiento que recoge la tendencia debida a la edad ya que los anillos son más estrechos a medida que el árbol va aumentando el diámetro, C_t es la serie de residuos, las diferencias entre los valores de la tendencia debida a la edad y los valores del grosor de los anillos observados; estas desviaciones con respecto a la tendencia se deben a los efectos del clima, P_{1t} y P_{2t} son cambios bruscos observados en las series de crecimiento anual

debido al efecto de perturbaciones de distinta índole, y ϵ_t es un término de error no atribuible a ninguno de los factores anteriores y que se considera una variabilidad aleatoria. De esta manera y según el objetivo del estudio, lo que se hace es extraer la señal que interese mediante la utilización de técnicas estadísticas y matemáticas considerando ruido el resto de las señales. Por otra parte, la construcción de una cronología del grosor de los anillos se obtiene haciendo el promedio de todas las series individuales. No obstante, primero las series individuales tienen que ser comparables entre sí haciendo que su media sea constante de manera que todas las series tengan el mismo peso en el cómputo del promedio de todas las observaciones anuales, por lo que las series tienen que ser estandarizadas eliminando la tendencia debida a la edad mediante el ajuste de una función matemática. El cociente o la diferencia para cada año entre los valores reales del grosor y los predichos por la función nos proporciona la serie de residuos cuya variabilidad se atribuye principalmente al clima. Estas series de residuos se llaman índices de crecimiento en dendrocronología.

Dado que los anillos de crecimiento poseen información de muchas variables, la dendrocronología permite ser aplicada a campos muy variados de la ciencia, entre los que se encuentran los procesos ecológicos, geomorfológicos, arqueológicos, climatológicos, paleoclimatológicos, entre otros. La señal climática grabada en los anillos de crecimiento se puede utilizar para reconstruir el clima del pasado para periodos de los cuales no se dispone de registros meteorológicos. En concreto se pueden reconstruir las variables climáticas que más limitan el crecimiento de los árboles y muestran por lo tanto una influencia significativa sobre la formación de los anillos anuales de crecimiento los cuales registran dicha señal. En este tipo de estudios se utilizan cronologías maestras formadas por una gran cantidad de series de muchos árboles puesto que así se maximiza la señal climática común. Las reconstrucciones climáticas son de gran utilidad puesto que permiten analizar la evolución del clima del pasado, sus extremos y variaciones [8].

En la ecología, la dendrocronología, permite estudiar procesos de la naturaleza que ocurren en largas escalas de tiempo, como por ejemplo el año de germinación y muerte de los árboles, o evaluar la existencia pasada de perturbaciones en los bosques, o efectos del clima, procesos que sirven para analizar y entender la dinámica de poblaciones. La dendroecología es una excelente herramienta que permite reconstruir las trayectorias de crecimiento diamétrico de cada árbol durante todo su lapso vital, la historia de disturbios naturales y de origen humano y permite datar la fecha exacta en que se presentaron [42]. También permite determinar las tasas de crecimiento

diamétrico, a partir de lo cual se pueden estimar las tasas de absorción de CO₂, lo que permite generar información de utilidad para lograr la gestión sostenible de los bosques.

Por otra parte, la fluctuación del clima determina la distribución de aguas continentales, la ubicación de organismos animales y vegetales y el establecimiento de asentamientos humanos en los climas más favorables, por lo que es fundamental para el hombre conocer y predecir esas fluctuaciones. La dificultad de predicción de la variación climatológica ha desencadenado a lo largo de la historia la ocurrencia de eventos catastróficos fortuitos. Los cambios en la precipitación y en la temperatura del aire pueden favorecer el aumento súbito de parásitos que afectan la salud del hombre y los animales. Ese es el caso del dengue, la malaria, la leishmaniasis y la fiebre hemorrágica, entre otras [43]. Debido a que los registros instrumentales son de corta duración, se presentan limitaciones para la identificación del cambio climático, sobre todo cuando son eventos de baja y media frecuencia, tales como el fenómeno “El Niño”. En estos casos, existe la alternativa del uso de elementos “proxy” o sustitutos del clima, tales como los anillos de crecimiento de los árboles, los cuales poseen la ventaja de la simplicidad de muestreo, dado que se encuentran en todos los rangos latitudinales. Para esto, es que se ha aplicado la dendrocronología a la climatología, a partir de lo cual se han ido logrando reconstrucciones de variables tales como las precipitaciones y temperaturas de los últimos 12.500 años [44].

En disciplinas como la geología, los anillos de crecimiento de los árboles, han permitido registrar el efecto de terremotos, erupciones volcánicas, aludes de nieve, deslizamiento de terrenos, avance y retroceso de glaciares, entre otros. A partir de la observación y análisis de los anillos de crecimiento se ha podido datar estos fenómenos, determinando la frecuencia de ocurrencia de los mismos, el área de afectación y hasta su intensidad [44].

La dendrocronología ha sido empleada también en criminología, como herramienta para la determinación del momento de ocurrencia de determinado tipo de delitos. Se ha empleado ampliamente en la datación de construcciones y objetos arqueológicos. Se establece que, para lograr una datación correcta en dendroarqueología es necesario contar con cronologías maestras de árboles vivos longevos, disponer de anillos de crecimiento que tengan una señal climática común y que las muestras arqueológicas a datar posean una serie larga de anillos [8].

Actualmente, las aplicaciones y estudios entorno a la dendrocronología, se han visto enfocadas en la comprensión del actual cambio climático, el cual ha sido víctima de grandes controversias,

donde algunos científicos afirman que se origina a causa de actividades antrópicas que producen un incremento en la producción de gases de efecto invernadero, mientras que otras evidencias muestran que el cambio climático, es también producto de oscilaciones cíclicas que ocurren cada cientos o miles de años, e incrementos en la actividad solar [45].

Es decir, que gran parte de las evidencias de cambio climático, han sido almacenadas y recolectadas por los anillos de crecimiento de los árboles. El Sol es la principal fuente de energía de todos los procesos ocurridos en la tierra: crecimiento de las plantas, circulación de las masas de aire, evaporación y temperatura, entre otros fenómenos asociados con el clima. Por tanto, resulta lógico preguntarse si los cambios ocurridos en el sol pudieron haber ocasionado pasados cambios climáticos en la tierra y a su vez, generarlos en el futuro [46].

Cambios en la dinámica solar se registran a través de la presencia o ausencia de manchas solares, las cuales se ha observado que coinciden con un aumento o disminución de la temperatura, respectivamente y con la modificación de los niveles de C^{14} en la atmósfera terrestre. Tanto las concentraciones de C^{14} atmosféricas como los ciclos de manchas solares pasados se almacenan en los anillos de crecimiento de los árboles [47]. Ambas son señales proxy complementarias de la actividad solar [48]. Es por esto que la dendrocronología a partir del estudio de los anillos de crecimiento ha permitido reflejar la interacción entre la tierra y el espacio a través de fenómenos tales como la actividad solar, el campo magnético terrestre y las variaciones climáticas.

1.3.3.4 Principios de la dendrocronología

El principio de la dendrocronología conocido como el más importante es el crossdating, datación cruzada o cofechado, el cual supone que los factores ambientales y variables climatológicas afectan a todos los árboles de un mismo sitio de forma similar [3].

Las especies se han adaptado y han evolucionado bajo ciertas condiciones que les permiten crecer y desarrollarse normalmente en cierto rango de hábitats; a este concepto se le denomina amplitud ecológica. El principio afirma que los árboles son más sensibles a las variables ambientales (precipitación, temperatura, inundación de las llanuras aluviales, competencia, etc.), en los límites de su amplitud ecológica [20]. Por ejemplo: son límites ecológicos los suelos con baja retención de humedad como los arenosos y los pedregosos, así como sitios anegados donde las condiciones hipóxicas regulan el crecimiento de algunas especies.

El crecimiento individual de un árbol puede descomponerse como una suma de factores de distinta índole (crecimiento agregado). Así, el espesor de un anillo de crecimiento (R_t) en cualquier año (t) se expresa como:

$$[2] R_t = A_t + C_t + \Delta D1t + \Delta D2t + E_t$$

Donde en [2] A_t es la tendencia ontogénica o forma de crecimiento de la especie influenciada por la edad y el tamaño del árbol; C_t es la influencia de todas las variables climáticas sobre el crecimiento, los deltas están asociados con presencia o ausencia (uno o cero) de disturbios en el bosque o hábitat, pudiendo ser endógenos $D1t$ –por ejemplo, competencia por luz, formación de claros– o exógenos $D2t$ –por ejemplo, ataques de insectos, incendios–; E_t es la variabilidad no explicada o error aleatorio, asociada con otras señales [33].

En las plantas el crecimiento transcurre normalmente siempre que los factores limitantes lo permitan, por ejemplo, el anegamiento es normalmente el factor limitante del crecimiento vegetal en llanuras de inundación de los ríos. El déficit hídrico es el factor limitante del crecimiento vegetal en regiones áridas y semiáridas [49]. La selección del sitio implica conocer o intuir los factores limitantes del crecimiento, que a menudo representan la señal de interés. Además, discernir los factores que definen la sensibilidad de los árboles permite establecer el sitio de muestreo; por ejemplo, si hay interés en estudiar las sequías pasadas se deberían muestrear árboles que crecen en lugares marcadamente secos, lejos de las capas freáticas, donde el suelo tenga baja retención de humedad como cimas de montañas o laderas donde la señal climática se hace máxima. Asimismo, árboles que crecen a elevaciones bajas, en condiciones más húmedas, cerca del nivel freático no formarían anillos sensibles al déficit hídrico, sino anillos complacientes o anillos de anchura uniforme [50].

1.3.3.5 Estudios dendrocronológicos en *P. taeda* y *P. elliottii*

Existen diversos estudios en otros países que han utilizado la dendrocronología como herramienta para el análisis de distintos factores en especies del género *Pinus*.

Un estudio realizado por Telewski [18] utilizó la dendrocronología para analizar las respuestas al enriquecimiento con CO_2 atmosférico de las propiedades de la madera y el ancho de los anillos de crecimiento a largo plazo de *Pinus taeda*, comparando la respuesta tanto a campo como en cámaras con atmósferas controladas de CO_2 . Como resultado se observó que solo el anillo de

crecimiento del año 1993 mostró una densidad mayor de madera tardía bajo condiciones de campo y no se observó una diferencia significativa en la densidad mínima de madera temprana en los anillos de crecimiento individuales entre tratamientos en cámara. El estudio concluyó que los resultados muestran que el efecto más significativo del enriquecimiento de CO₂ en la producción de madera de *P. taeda* es su influencia en el crecimiento radial, medido como anchos anuales de anillos de crecimiento y que esta influencia es más pronunciada en los primeros años de crecimiento y tiende a disminuir con la edad.

Cabris [51], utilizó la dendrocronología en un ensayo de once orígenes de *P. taeda* en la Estación Experimental Bernardo Rosengurtt de Facultad de Agronomía - Udelar en el departamento de Cerro Largo para evaluar la variación entre y dentro de los distintos orígenes respecto a parámetros de calidad de la madera, entre los que se incluyen la proporción de leño tardío y ancho del anillo de crecimiento a lo largo de los radios, donde observó que los bloques, orígenes, árboles e interacción entre bloques son efectos altamente significativos.

Kirwan *et al* [52], evaluaron el impacto del nivel del mar en un bosque estuarino de *Pinus taeda* en Maryland a partir de un análisis dendroecológico y observaron que, pese a que el nivel del mar había aumentado considerablemente en los años anteriores y que se constataba la presencia de varios árboles muertos en la interfaz bosque-pantano, no hubo una disminución en el ancho de los anillos de crecimiento, lo que hace poco probable la mortalidad inducida por el nivel del mar. Pero, por otra parte, se observó una correlación positiva con la precipitación anual y la temperatura de invierno y una correlación negativa con las temperaturas de verano.

Machado *et al* [53] estudiaron el efecto de las variables climáticas en el crecimiento mensual de *Araucaria angustifolia* y *Pinus taeda* en la fase juvenil durante un período de tres años en Campina Grande do Sul y en Curitiba, a partir del empleo de la dendrocronología. Como resultado se observó un incremento corriente mensual más alto entre los meses de octubre y febrero, lo que se correlacionó fuertemente con la temperatura, presión atmosférica y fotoperiodo.

En la región de la frontera oeste del estado de Rio Grande Do Sul en Brasil, Schneider *et al* [54], estudiaron el crecimiento en diámetro de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* en áreas degradadas por la acción antrópica, a partir de análisis dendrocronológicos, resultando un crecimiento en diámetro con diferentes tendencias para ambas especies. El estudio permitió crear un modelo de crecimiento capaz de estimar el diámetro según la edad para ambas especies y para cada tipo de

suelo según el nivel de degradación del mismo. A su vez, los mismos autores, analizaron para ambas especies, el crecimiento volumétrico en las mismas áreas, lo que les permitió desarrollar una ecuación única para estimar el volumen promedio en función de la edad tanto para las dos especies, como para el nivel de degradación del suelo. En este último estudio las dos especies presentaron diferentes estimaciones en el nivel de crecimiento representado por el intercepto y pendiente de las curvas, con un excelente ajuste para un coeficiente de determinación de 0.98 y bajo error estándar de 0.38 m³/árbol.

Grissino-Mayer *et al* [55] estudiaron la relación entre el clima y el crecimiento de árboles de *Pinus taeda* en el norte de Georgia, a partir de la determinación de los meses donde el clima tiene su mayor influencia en el crecimiento y el análisis de la relación entre el crecimiento y la precipitación de la temporada del mismo. Los resultados mostraron que, la precipitación durante el período mayo-agosto (primavera-verano) del año actual tiene un efecto positivo en el crecimiento de *P. taeda*, mientras que la temporada de crecimiento anterior no muestra ningún efecto significativo sobre el crecimiento. Se encontraron efectos negativos para la influencia de la temperatura durante los meses de junio y agosto (verano) anteriores, abril actual (primavera) y para el período junio – septiembre (verano-otoño). La precipitación total en función de los índices de anillos de crecimiento de los árboles fue altamente significativa ($r=0.48$), por lo que el estudio concluyó que *P. taeda* resulta una especie útil para investigar el impacto del clima en el crecimiento de los árboles en la zona de estudio.

Ortega *et al.* [56], ensayaron la concentración de nutrientes en los anillos anuales de crecimiento de árboles de *Pinus taeda* de 17 años, a partir de microanálisis por fluorescencia de rayos X para revelar el patrón de distribución elemental a lo largo de los anillos, partiendo de la hipótesis de que los anillos de crecimiento son sensibles a los cambios químicos del suelo. Como resultado se observó una disminución del contenido de calcio y manganeso desde la médula hasta la corteza, una disminución de potasio a azufre desde la médula hasta el tercer anillo de crecimiento, una disminución de hierro y fósforo desde la médula hasta el anillo 13 y una correlación positiva de potasio y azufre con la estación más lluviosa y cálida del año. Las relaciones molares anuales de los anillos de Ca/Mn y K/Ca fueron buenos indicadores del pH del suelo y la actividad del cambium de la madera y la metodología μ -XRF, como método no destructivo de análisis de concentración de nutrientes en anillos de árboles, reveló usos potenciales en el seguimiento de los tratamientos de fertilizantes del suelo.

Dobner y Camargo [57], evaluaron la influencia de variables meteorológicas en 30 años de crecimiento radial de árboles de *P.taeda* sometidos a diferentes intensidades de raleo de copa en el sur de Brasil, utilizando técnicas estándar de dendrocronología para obtener las cronologías residuales. Al calcular las correlaciones entre las cronologías y las variables meteorológicas, los resultados indicaron que, considerando todo el año corriente de crecimiento, las condiciones meteorológicas no muestran una influencia particular sobre el crecimiento radial de los árboles en la zona de estudio. Con respecto al déficit de presión de vapor, se obtuvo una correlación significativa negativa con el crecimiento radial de los árboles para todas las intensidades de raleo. Cuando se consideraron las estaciones, se observó una correlación positiva de las precipitaciones de invierno con el crecimiento radial. Se observó además una correlación negativa constante entre la temperatura mínima y máxima durante el invierno y el crecimiento radial para todas las intensidades de raleo, lo que muestra que *P.taeda*, en el sur de Brasil, se beneficia de los inviernos más fríos en general. Los resultados también sugieren que el raleo de alta intensidad puede incrementar la influencia de la temperatura en el patrón de crecimiento de los rodales.

Respecto a *P.elliottii*, Harley *et al.* [58], estudiaron la influencia de ciclones tropicales en el crecimiento de dicha especie entre los años 1909 y 2014, en la costa de Mississippi, Estados Unidos, donde el registro de dichos ciclones se encuentra incompleto. Para desarrollar las cronologías, determinaron el ancho total de los anillos de crecimiento, el ancho de la madera temprana en el anillo, y el ancho de la madera tardía. Las cronologías fueron comparadas con la marejada ciclónica y los registros de velocidad del viento. Como resultado se observó que, el año siguiente a la ocurrencia de ciclones tropicales, el anillo de crecimiento fue significativamente suprimido respecto a los demás, y no hubo una significancia con las altas velocidades del viento. Los árboles individuales mostraron una supresión en el crecimiento durante 1 a 6 años posteriores a la ocurrencia de los ciclones. Este estudio demuestra que los pinos cortados en las proximidades del agua salada se pueden utilizar para producir cronologías de ocurrencias de CT para la región norte del Golfo de México y, por lo tanto, eventualmente se puede utilizar para ampliar y complementar temporalmente el registro de observación de ciclones tropicales existente.

Funderburk *et al.* [59], estudiaron la influencia de la elevación y efecto del huracán Katrina en los árboles de *Pinus elliottii* que sobrevivieron al huracán en Cat Island, Mississippi. La sobrevivencia de dichos árboles se atribuyó a las observaciones de campo de los patrones geográficos que indican que el crecimiento y resistencia al impacto de la tormenta podría depender sustancialmente de la elevación del suelo. Para demostrar esto, evaluaron la tasa media

de crecimiento radial para toda la vida del árbol y el porcentaje de cambio en la tasa de crecimiento radial entre los 5 años anteriores a la tormenta y los 5 años posteriores a la misma. Los resultados arrojaron una disminución en el crecimiento radial posterior a la tormenta, pero, sin embargo, no se observó una significancia entre el crecimiento y la elevación del terreno. Se obtuvo una correlación significativa entre el crecimiento radial y la edad, observando que, a mayor edad, el crecimiento disminuye, mientras que el mismo fue suprimido entre los años 2005 y 2010 producto de la ocurrencia del huracán.

1.3.3.5 Cambio climático, fenómeno ENOS y ocurrencia de eventos extremos

El cambio climático es, por definición, el cambio en el clima consecuencia de las actividades humanas [60]. Su estudio consta de dos pasos:

- a) detección: detectar cambios durante un período relativamente largo de tiempo generalmente mayor a 30 años en alguna variable de interés.
- b) atribución: probar que la acción humana es responsable del cambio detectado.

Dado que el clima varía naturalmente en un continuo de escalas temporales desde horas y días, a siglos y milenios es necesario contar con series observadas largas para estudiar y detectar los efectos de la acción humana. El cambio climático no se restringe a un cambio en las condiciones medias en las lluvias o temperatura de una región, sino que generalmente está acompañado por cambios en la frecuencia de ocurrencia e intensidad de los extremos meteorológicos e hidroclimáticos [60].

Uruguay, se encuentra ubicado geográficamente en una región de gran variabilidad climática en todas las escalas de tiempo, desde sub-estacionales a décadas y centenios. La variabilidad natural del clima induce cambios año a año sobre Uruguay muy grandes, principalmente en precipitaciones. En esta escala de tiempo, los océanos globales, y en particular el Pacífico tropical, juegan un rol fundamental. Entre ellos se destaca El Niño Oscilación Sur (ENOS), que es un fenómeno que resulta del acoplamiento entre el océano y la atmósfera en la región del Pacífico tropical. A nivel oceánico El Niño consiste en un calentamiento anómalo de las aguas ecuatoriales del océano Pacífico central y oriental. Durante un evento ENOS las anomalías de temperatura de superficie del mar inducen cambios en la precipitación tropical que altera las regiones de liberación del calor que gobiernan los movimientos atmosféricos. Como respuesta la atmósfera genera ondas que se propagan dentro de la región tropical y hacia altas latitudes de ambos

hemisferios (patrones de teleconexión). Algunas de estas ondas se propagan hacia Sudamérica e inducen anomalías de circulación sobre nuestra región alterando la posición e intensidad de la Corriente en Chorro, así como el Jet de capas bajas. Por lo tanto, ENOS es capaz de alterar las precipitaciones, vientos y la temperatura de nuestro país. Así, el estudio de la variabilidad climática natural de nuestra región debe considerar el impacto de este fenómeno [60].

A su vez, existen otros fenómenos que son parte de la variabilidad climática y que deben considerarse cuando se trata de evaluar el impacto del clima sobre alguna variable. En los últimos años se ha detectado un cambio importante en las series temporales a partir del año 1976 con una aparente disminución en la variabilidad espacial de las mismas, este cambio en la homogeneidad espacial, antes y después de dicho año es conocido como el “*climatic jump del 1976*” y fue detectado principalmente en los índices basados en la temperatura mínima, por lo que se dice que este salto afectó fundamentalmente en la ocurrencia de eventos extremos vinculados a la temperatura [61].

El salto climático del 76 se evidencia por cambios cualitativos en la circulación atmosférica y oceánica de gran escala [62]. Alrededor de ese año los patrones de temperatura de superficie del mar en el Océano Pacífico cambiaron rápidamente, presentándose el Pacífico tropical más cálido que las décadas precedentes.

1.4 Organización de esta monografía

En este trabajo se presentará la metodología utilizada para abordar los objetivos planteados y una sección de resultados y discusión de los mismos, donde se presentará un análisis de la variación de las variables climáticas estudiadas para el período de interés, cómo ha sido el crecimiento de cada serie de árboles por cada sitio, luego se mostrarán las cronologías obtenidas para cada serie y finalmente se discutirá cómo ha sido la respuesta a las variables climáticas en cada serie, cuáles han sido las variables más influyentes en el crecimiento de cada una y se presentará la respuesta en el crecimiento obtenida a partir del análisis estadístico de esas variables climáticas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Localización

Las zonas de colecta de muestras para el estudio en cuestión abarcan 5 puntos donde se colectaron 2 especies distintas (Tabla 1, Figura 5). Durante la colecta se extrajeron discos basales mediante el uso de motosierra. Para los árboles apeados se cuantificaron las variables de DAP, altura total, altura del fuste y altura de copa, con el fin de estimar volumen de los árboles extraídos.

Dpto	Propietario	Lugar	Coordenadas		Especie	Fecha plantación	Fecha de colecta	N
Cerro Largo	Fagro Udelar	Bañados de Medina	32° 19'51"S	54° 26'11"W	<i>P. elliottii</i>	1966	4/8/2020	10
Rivera	Lumin	San Juan Paso	30° 0' 10.82"S	55° 38' 48.11" W	<i>P. elliottii</i>	1987	19/9/2019	19
Cerro Largo	Fagro Udelar	Bañados de Medina	32° 20'40"S	54° 26'05"W	<i>P. taeda</i>	1966	5/11/2019	6
Cerro Largo	Fagro Udelar	Bañados de Medina	32° 19'51"S	54° 26'11"W	<i>P. taeda</i>	1966	4/8/2020	4
Rivera	Fymnsa	Parada Medina	31° 10'4" S	55° 39'42" W	<i>P. taeda</i>	1995	14/2/2020	7
Rivera	Lumin	Cerro Alegre	31° 17'45" S	55° 41'42" W	<i>P. taeda</i>	2002	14/2/2020	7

Tabla 1. Localización de los puntos de colecta



Figura 5. Puntos de colecta, ubicación del punto de muestreo de *P. elliottii* en San Juan; puntos de muestreo de *P.taeda* de LUMIN y FYMNSA; los puntos de muestreo de *P. taeda* y *P. elliottii* en Cerro Largo.

Se colectaron 19 discos basales de *P. elliotti* plantados en el año 1987 (32 años), en “San Juan”, predio ubicado en el Paso Platón, Departamento de Rivera. El criterio de selección de las muestras fue coleccionar aquellos árboles que fueran dominantes en crecimiento, evitando árboles de los márgenes para aislar el “efecto de borde”. Este rodal se caracterizó por no presentar ningún régimen de poda, ni de raleo. El principal uso de los montes cosechados de este predio es para madera debobinable con el fin de producir tableros contrachapados.

Los suelos predominantes en el área corresponden al grupo 7.2 con un índice de productividad de 61 (Figura 6).

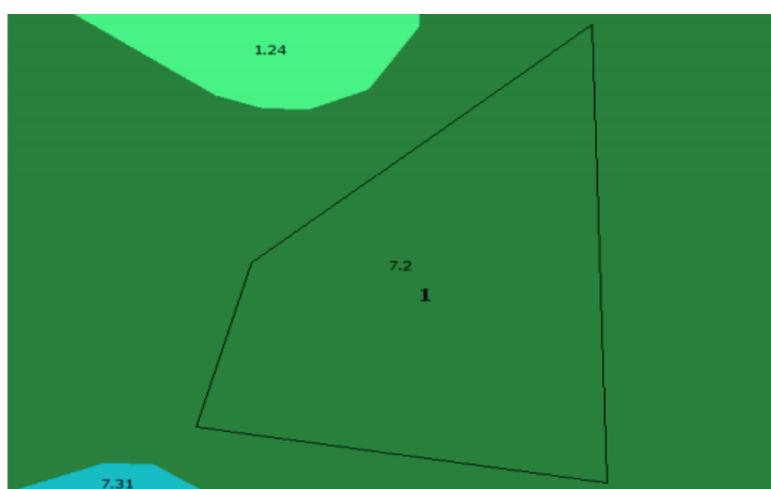


Figura 6. Suelos presentes en punto de colecta en San Juan.

Fuente: RENARE, MGAP.

Dicho tipo de suelos se caracteriza por localizarse en toda el área de areniscas de Tacuarembó, ocupando las zonas de relieve más fuerte. El relieve lo forman colinas sedimentarias no rocosas con pendientes de 10 a 15%. El material geológico está constituido por areniscas de Tacuarembó. Los suelos dominantes son Inceptisoles Melánicos/Umbricos (Regosoles) moderadamente profundos, de textura franco arenosa, color pardo muy oscuro, fertilidad muy baja y bien drenados. Asociados se encuentran Luvisoles Ócricos/Melánicos Abrúpticos/Típicos (Praderas Arenosas gris amarillentas), muy profundos de color pardo amarillento oscuro, textura arenoso franca, bien drenados y fertilidad muy baja. La vegetación es la normal de la zona (RENARE, MGAP).

Por otra parte, los puntos de colecta de *Pinus taeda* en el departamento de Rivera, abarcaron la colecta de 7 discos basales de árboles plantados en el año 1995 (24 años), pertenecientes a la

empresa FYMNSA y 7 discos basales cuya plantación se realizó en el año 2002 (17 años) de la empresa LUMIN. Los árboles colectados en ambos puntos se caracterizaron por presentar un régimen de manejo silvicultural de podas y raleos (Tabla 2).

Empresa	Edad del rodal	Manejo	Densidad (árboles/ha)
Fymnsa	0	Plantación (1995)	1111
Fymnsa	3	Primera poda hasta 2,1 m y raleo a pérdida	
Fymnsa	4	Segunda poda de 2,1 a 4,2m (666árb/ha) y raleo a pérdida	666
Fymnsa	7	Poda media de 4.2 a 6.2m (450 árb/ha)	
Fymnsa	9	Poda alta a 7.2m (300árb/ha)	
Fymnsa	10	Primer raleo comercial	450
Fymnsa	14	Segundo raleo comercial	311
Lumin	0	Plantación (año 2002)	1000
Lumin	4	Poda a 1.8m (533 árb/ha)	533
Lumin		Raleo a pérdida	
Lumin	5	Poda a 3.4m (533 árb/ha)	
Lumin	6	Poda a 4.5m (330 árb/ha)	
Lumin	7	Poda a 6.4m (279 árb/ha)	
Lumin	10	Primer raleo comercial	333

Tabla 2. Régimen de manejo de los árboles colectados de FYMNSA, y de LUMIN

Los suelos comprendidos en las zonas de colecta de *P.taeda* de LUMIN y FYMNSA abarcan en su mayoría 7.2 y 7.31, con índices de productividad de 61 y 66, respectivamente (Figura 7).

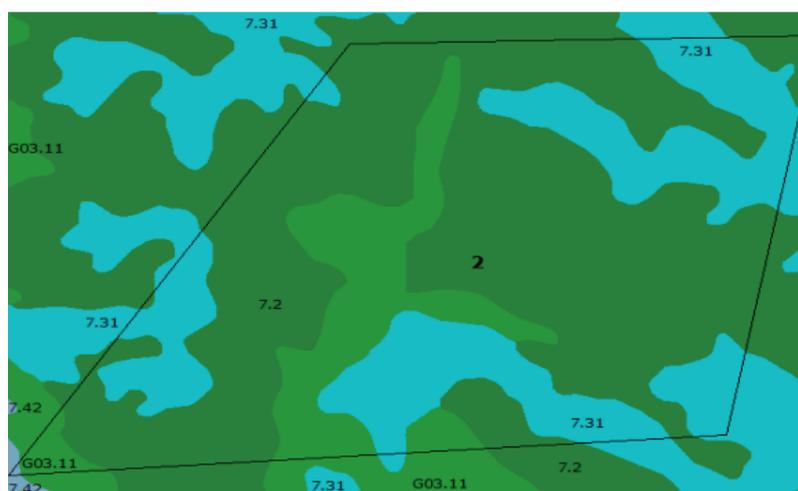


Figura 7. Suelos comprendidos en los puntos de colecta de FYMNSA y LUMIN.

Fuente: RENARE, MGAP.

Los suelos 7.2 se caracterizan por presentar un relieve formado por colinas sedimentarias no rocosas con pendientes de 10 a 15%. El material geológico está constituido por areniscas de Tacuarembó. Los suelos dominantes son Inceptisoles Melánicos/Umbricos (Regosoles) moderadamente profundos, de textura franco arenosa, color pardo muy oscuro, fertilidad muy baja y bien drenados. Asociados se encuentran Luvisoles Ocricos/Melánicos Abrúpticos/ Típicos (Praderas Arenosas gris amarillentas), muy profundos de color pardo amarillento oscuro, textura arenoso franca, bien drenados y fertilidad muy baja (RENARE, MGAP).

Por otra parte, el material geológico de los suelos 7.31 lo forman areniscas rojas, poco litificadas, apoyadas sobre areniscas de Tacuarembó. El relieve está constituido por colinas sedimentarias no rocosas, con pendientes de 6 - 10%. Los suelos dominantes son Acrisoles Ocricos Típicos (Praderas Arenosas rojas) muy profundos, de color pardo rojizo, textura arenoso franca, bien drenados y fertilidad extremadamente baja. Asociados, aparecen Acrisoles Ocricos Albicos muy profundos de color pardo oscuro, textura franco arenosa, bien drenados y fertilidad extremadamente baja (RENARE, MGAP).

Otro punto de colecta fue en la “Estación Experimental Bernardo Rosengurtt” de Facultad de Agronomía, Udelar, ubicado en el departamento de Cerro Largo, donde se obtuvieron muestras de dos sitios, EEBR1, donde se colectaron 7 discos basales de *Pinus taeda* plantados en el año 1966 (53 años), y EEBR2 donde se colectaron 4 discos basales de *Pinus taeda* y 10 de *Pinus elliottii*, plantados entre 1966 y 1970 (53 años).

Los suelos mayormente presentes en la zona de colecta corresponden a los 13.32 y 3.51 (Figura 8).

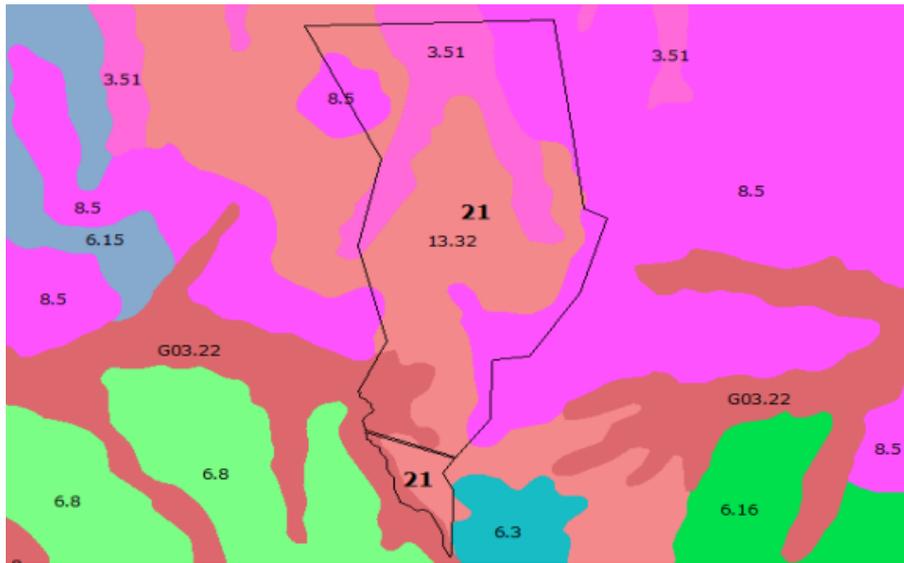


Figura 8. Suelos presentes en el punto de colecta de Cerro Largo.

Fuente: RENARE, MGAP.

El índice de productividad promedio en la zona es de 107. El grupo 13.32 está integrado por dos asociaciones de suelo, la primera ocupa una zona más o menos extensa entre Fraile Muerto y Ramón Trigo, donde el relieve es de lomadas fuertes, con pendientes de 4 - 5%, los suelos son Brunosoles Éútricos Típicos muy profundos, de color gris muy oscuro, textura arcillo limosa, bien drenados y fertilidad alta; y la segunda asociación ocupa una extensa zona entre Ruta 44, río Negro y la cañada Aceguá, donde el material geológico está formado por sedimentos finos de la formación Yaguarí o depositados sobre ésta y los suelos dominantes son Brunosoles Éútricos Típicos, profundos, de color negro, textura franca, bien drenados y fertilidad alta y Vertisoles Háplicos moderadamente profundos de color negro, textura arcillosa bien drenados y fertilidad muy alta. Las dos asociaciones tienen vegetación de pradera invernal. Su uso actual es ganadero de ciclo completo o invernada y no se hace agricultura (RENARE, MGAP).

Por otra parte, los suelos 3.51 comprenden las planicies alcalinas, con meso y microrrelieve que bordean las lomadas continentales, axial como las áreas alcalinas en el de las llanuras. Los suelos dominantes son suelos halomórficos; Solods Ócricos, Solonetz Solodizados Ócricos y Solonetz de texturas limosas. Los suelos halomórficos ocupan aproximadamente un 50% de la asociación. Asociados a estos se encuentran Planosoles Subéútricos Ócricos, de texturas limosas y francas, y además Gleysoles Lúvicos Melánicos Típicos, francos. El material madre está constituido por lodolitas limo arcillosas pertenecientes a la formación Dolores. El uso es fundamentalmente

agrícola arrocero y ganadero. El tipo de vegetación es de pradera estival y herbazales halófitos (RENARE, MGAP).

2.2 Caracterización climática

El clima de Uruguay es caracterizado como templado y húmedo, con precipitaciones durante todo el año y temperaturas que en el mes más caluroso superan los 22°C.

La precipitación media anual de Uruguay es del orden de los 1300 mm, con un decrecimiento de las isoyetas (líneas de igual precipitación) de noreste a sudoeste (Figura 9). El país tiene un clima lluvioso, sin una estación seca definida, y una gran variabilidad interanual.

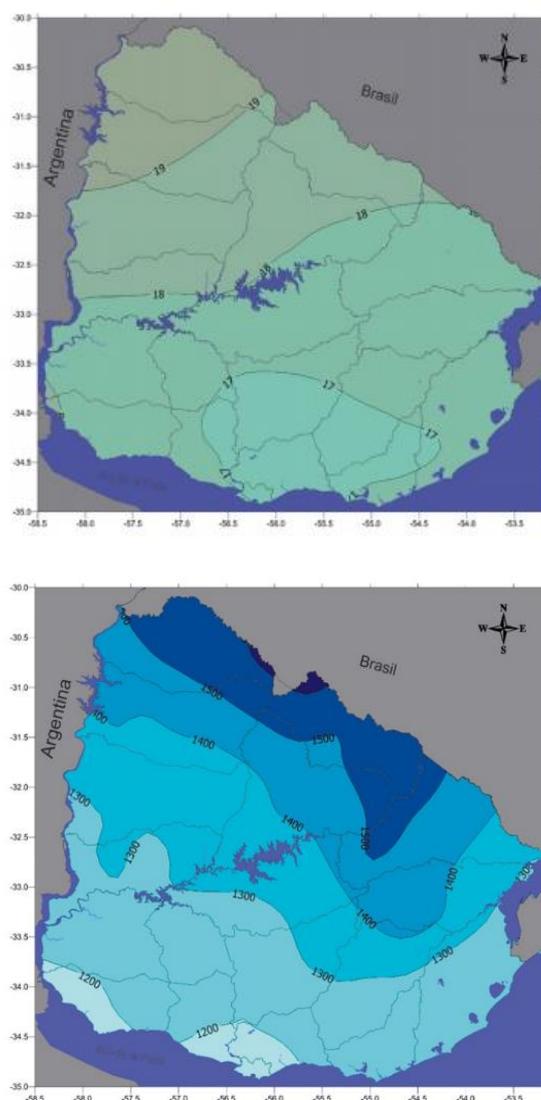


Figura 9. Distribución de isotermas e isoyetas en Uruguay para el período 1980-2009.

Fuente: INIA, 2010.

El departamento de Cerro Largo para el histórico 1980-2009 presentó una temperatura media anual de 17.0°C y una precipitación media anual de 1400 mm, mientras que el departamento de Rivera una temperatura media anual de 18.0°C y una precipitación media anual de 1500mm, según datos de INUMET, 2020; e INIA, 2010.

Para poder realizar los análisis climáticos necesarios se utilizaron datos históricos de las variables precipitación, temperatura media, media mínima y media máxima para ambos sitios de estudio, cedidos por el Instituto Uruguayo de Meteorología (Inumet).

Para el departamento de Cerro Largo se obtuvieron datos históricos del período 1966 a 2019 de la estación meteorológica de Melo, localizada en 32° 22,1' S- 54° 11,6' W y altitud 100.36 m s.n.m.

Para el departamento de Rivera, se solicitaron datos para el período 1987 a 2019, de la estación meteorológica de Rivera, localizada en 30° 53,8' S- 55° 32,6' W, y altitud 241.94 m s.n.m.

Dado que INUMET no cuenta con datos digitalizados de las variables temperatura media, media mínima y media máxima mensual para el período 1960-1980 para el departamento de Cerro Largo, las mismas fueron obtenidas de la base de datos del Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), obteniendo correlaciones con los datos de Inumet para el período común de 0.95, 0.99 y 0.98, respectivamente.

La precipitación media anual acumulada del departamento de Cerro Largo en el período 1966-2019 fue de 1309,5 mm, con un patrón de lluvias trimodal, con tres picos en febrero (120mm), julio (122 mm) y setiembre (118 mm), y el mes menos lluvioso diciembre con 95 mm (Figura 10). La temperatura media anual para el mismo período fue de 17.8 °C, donde la media del mes más frío fue de 11.8 °C en el mes de junio y la media del mes más caluroso de 23.8°C en el mes de febrero (KNMI; INUMET).

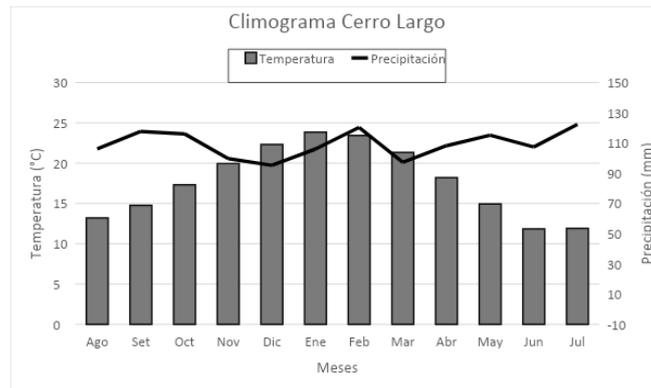


Figura 10. Climograma- Diagrama climático para la región de Cerro Largo.

Fuente: Instituto Uruguayo de Meteorología, estación meteorológica de Melo.

En el histórico de 32 años desde 1987 a 2019, el departamento de Rivera presentó una precipitación media mensual de 134mm, con un patrón de lluvias bimodal, con dos picos en los meses de abril (180 mm) y octubre (160 mm), y el mes de menor precipitación en agosto con 93 mm. La temperatura media anual para ese histórico fue de 18.7°C, donde la media del mes más frío fue en julio con 12.6°C y el mes más caluroso en enero con 24.9°C (Figura 11).

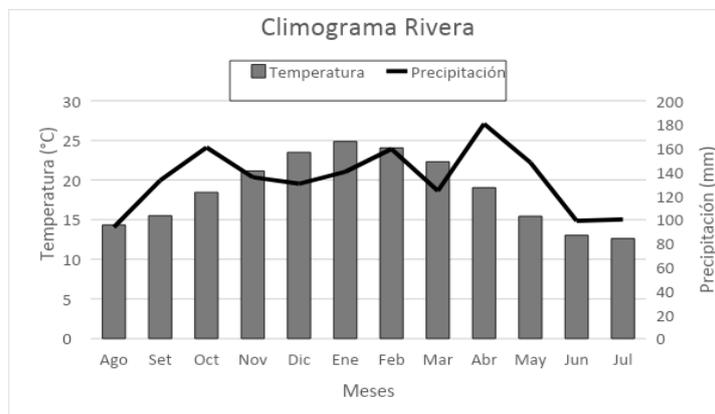


Figura 11. Climograma- Diagrama climático para la región de Rivera. Fuente: Instituto Uruguayo de Meteorología, estación meteorológica de Rivera.

A partir de la revisión de bibliografía y los datos de variables climáticas proporcionadas por INUMET y KNMI, se observaron y graficaron las tendencias de dichas variables para los períodos de estudio, profundizando en el análisis de la ocurrencia de eventos extremos y el comportamiento de esas variables para meses específicos dentro del año de crecimiento de los árboles.

2.3 Preparación de muestras y medición

Los discos obtenidos fueron puestos en horno de secado y posteriormente lijados con lijas progresivamente más finas a fin de poder realizar la medición de los anillos de crecimiento.

En cada disco transversal se trazaron 4 radios perpendiculares entre sí. A partir de estos radios se generaron las series de anillos que luego fueron datadas, medidas y posteriormente analizadas.

Una vez trazadas las series de cada sección se marcaron los anillos de crecimiento, descartando la presencia de anillos falsos, es decir, aquellos que no completaron toda la circunferencia de la sección transversal o, que, se fusionaron con otros anillos.

Luego se realizó la datación de cada anillo de los cuatro radios trazados para cada uno de los discos, asignándole un año calendario a cada uno.

Nutto *et al* [63] evaluaron metodologías dendrocronológicas para el análisis de crecimiento de *Mimosa scabrella* y *Pinus taeda*, que abarcaron los métodos de medición de anillos de crecimiento manual (utilizando regla milimétrica), medición digital con el software WinDENDRO y el método digital con el software ArcView. Para *P. taeda* los resultados mostraron que, usando el software WinDENDRO se obtenía la menor desviación (0.46%), si se compara con el método manual, a su vez, ese método digital por análisis de imagen resultó ser el más rápido en comparación con los demás, por lo que el trabajo concluyó que utilizar softwares digitales basados en análisis de imagen son una buena alternativa para reemplazar el método manual.

Por lo que se realizó la medición de los anillos de crecimiento (con un total de 7700 anillos), a partir del uso de un carro de desplazamiento Tree-Ring System de VELMEX (Figura 6) cuya precisión es de 0,001m, en conjunto con el software de medición Measure J2X.

MeasureJ2X es un software escrito en lenguaje JAVA [23]. Dicho software presenta una interfaz gráfica que funciona como la mayoría de los programas del paquete Microsoft (Figura 12, Figura 13). El software permite abrir archivos, guardarlos, iniciar archivos nuevos, ver estadísticas en discos ya medidos y editar algunos archivos de medición. Además de registrar los anchos de anillos de crecimiento medidos en conjunto con el sistema VELMEX, permite ingresar datos manualmente.

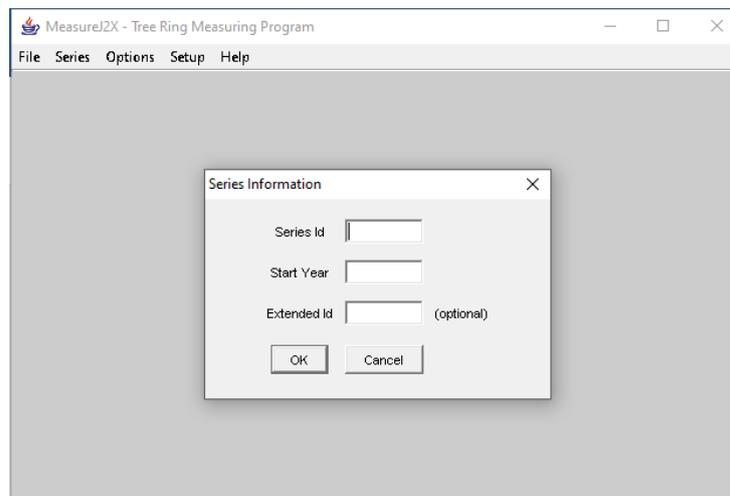


Figura 12. Interfaz del software MeasureJ2X.



Figura 13. VELMEX. Fuente: VELMEX, Inc.

Aquellos discos cuyo diámetro no permitía montarlos en el carro de desplazamiento VELMEX por su tamaño, fueron medidos manualmente mediante el uso de lupa y regla milimétrica (Figura 14).



Figura 14. Trazado de radios y medición con regla milimétrica de discos de gran diámetro.
Fuente: la autora, Paiz, 2020.

2.4 Evaluación de los patrones de crecimiento

Una vez obtenidos los valores de anchos de anillos para cada disco colectado, se analizaron los patrones de crecimiento por especie y por sitio a partir de los incrementos radiales acumulados. Se evaluaron los indicadores de Incremento Medio Anual (IMA) e Incremento Corriente Anual (ICA) a partir del incremento diametral y del incremento en área transversal, permitiendo analizar las tasas de crecimiento para cada sitio, determinando cual podría eventualmente ser el de mejores condiciones para desarrollar plantaciones de *Pinus*.

Esto permite generar un insumo para evaluar la edad óptima de corta para cada rodal por especie y por sitio, en función de variables dendrométricas y compararla con la edad a la que efectivamente se cortan los árboles comúnmente.

2.5 Obtención de las cronologías

Los valores de los anchos de los anillos para cada serie fueron ingresados al software COFECHA ([41];[64]) para evaluar la calidad de la medición de los mismos.

COFECHA utiliza técnicas de correlación entre series temporales segmentadas para evaluar la calidad de la datación cruzada en series de medición. La datación cruzada es esencialmente un proceso de “alta frecuencia”. En la mayoría de las regiones geográficas templadas, las variaciones

de un año a otro en los anchos de los anillos son más importantes para una datación cruzada exitosa que las tendencias de baja frecuencia a largo plazo. Sin embargo, estas tendencias de baja frecuencia se pueden utilizar al datar especies con series de anillos más complacientes [64].

Otra función importante de COFECHA es su evaluación de la precisión de la medición. El programa detectará la medición de anillos "atípicos" que se encuentran en las porciones externas ("colas") de la distribución de todos los anillos para todas las series en un año determinado. Estos anillos están marcados y numerados en la salida y deben inspeccionarse visualmente y posiblemente volver a medirse para garantizar que las medidas originales sean precisas. A menudo, estos anillos representan patrones de anillos anómalos que se producen debido a una lesión local en el árbol o porque el límite del anillo no es claro. Sin embargo, en ocasiones, estos anillos marcados representan errores de medición.

A partir de esa evaluación se fueron descartando aquellas series cuya correlación con las demás fue muy baja y corrigiendo aquellos posibles errores de medición, con el fin de poder generar la cronología master para cada sitio de evaluación, a partir del promedio de todos los valores de anchos de anillos de crecimiento.

Se obtuvieron como resultado 6 cronologías maestras, dos cronologías de *P. taeda* para cada departamento y una de *P. elliottii* por departamento.

Luego de obtenidas las cronologías maestras se utilizó el software ARSTAN para eliminar anomalías y el efecto de la edad en las cronologías y así poder obtener las cronologías finales a ser utilizadas para evaluar la incidencia o no del clima en el crecimiento de los árboles estudiados.

ARSTAN es uno de los principales programas utilizado para construir las cronologías finales. ARSTAN se diferencia de COFECHA en que tiene una gama más amplia de técnicas de estandarización que se pueden utilizar en series individuales antes de compilar una cronología maestra. No debe confundirse con la cronología maestra que se desarrolla en COFECHA. COFECHA también utiliza la estandarización (generalmente una spline de suavizado cúbico de 32 años) para crear una cronología maestra para la datación de otros discos. Esta cronología maestra, sin embargo, fue creada específicamente para fines de datación y no es la cronología maestra que debería usarse para el análisis final [23]. En ARSTAN se pueden utilizar diferentes técnicas de estandarización para maximizar la señal de interés y eliminar el ruido de la cronología

final. Fue desarrollado para poder estandarizar matemáticamente series de anillos de árboles y para eliminar o controlar el componente de autocorrelación en la serie de tiempo. El programa ajusta una curva a las medidas de cada disco, divide el ancho del anillo por el valor de la curva modelada y promedia los índices del árbol para desarrollar una cronología a nivel de rodal.

Históricamente, una curva exponencial negativa se consideraba una técnica de estandarización conservadora porque elimina una curva geométrica conocida relacionada con la edad de la serie de ancho de anillo. Una curva exponencial negativa describe el grosor decreciente de los anillos desde la médula hasta la corteza que pueden desarrollarse en los pinos crecidos en rodales nativos. Recientemente, los dendrocronólogos se han dado cuenta de que esta curva funciona mejor donde los árboles crecen en rodales abiertos y no experimentan muchos eventos de perturbación. Cook [19], demostró la necesidad de técnicas de estandarización más complejas en los bosques de dosel cerrado que tienen más señal dinámica del rodal que los bosques abiertos. Los splines de suavizado cúbico toman en consideración la autocorrelación (el efecto del crecimiento anterior o del clima sobre el crecimiento del año actual), por lo que, debido a esto, es que se eligió el modelo matemático de spline de suavizado cúbico para ajustar las cronologías finales.

Luego de realizar la estandarización de las seis cronologías maestras se obtuvieron las cronologías finales ARSTAN que posteriormente se utilizaron para realizar el análisis climático. Se obtuvieron además las cronologías standard y residuales, producto de la estandarización realizada.

Unas de las salidas de ARSTAN son los valores de running (r_{bar}) y expressed population signal (EPS). Running r es un estadístico que se puede utilizar para examinar la intensidad de la señal a lo largo de la cronología. Debido a que es una correlación continua entre series, es una buena medida de la fuerza de la señal común a través del tiempo y depende de la profundidad de la muestra. Por otra parte, EPS es una medida de la variabilidad común en una cronología que es dependiente de la profundidad de la muestra. El segmento de la cronología con $EPS > 0.85$ fue definido como confiable [23]. Cuando el EPS es menor a 0.85 la cronología comienza a ser dominada por la señal que expresan árboles individuales en lugar de la señal del rodal en su conjunto.

Además de considerar los estadísticos EPS y running r , ARSTAN permite calcular las autocorrelaciones, es decir, el efecto que tuvo el crecimiento de años anteriores sobre el crecimiento del año actual. A partir de las autocorrelaciones obtenidas, se decidió utilizar las

variables climáticas de dos años hacia atrás, para evaluar si el efecto del clima de años pasados influyó sobre el crecimiento del año corriente de los árboles estudiados.

2.6 Análisis climático

La relación lineal entre el ancho del anillo anual y las variables climáticas se analizó con funciones de respuesta comúnmente utilizadas en análisis dendroclimáticos, a partir del uso de una matriz denominada RESPO [65], de manera de poder identificar la ventana de tiempo con la correlación más alta para cada cronología durante un período de 36 meses, desde agosto de dos años antes del año actual, hasta julio del año de crecimiento, considerando el año de crecimiento vegetativo (t) desde agosto del año calendario anterior (donde los árboles comienzan su período de actividad) hasta julio del año actual. Para esto, se usaron múltiples correlaciones de Pearson para comparar el crecimiento anual de los anillos de los árboles con los datos climáticos de dos años precedentes (t-2), un año precedente (t-1) y el año corriente (t), para determinar el período de meses consecutivos con correlaciones altas para cada cronología [40].

Las variables climáticas utilizadas para realizar el análisis fueron la precipitación media mensual y anual acumulada de dos años precedentes y un año precedente y la precipitación media anual del año corriente, la temperatura media mensual, temperatura media máxima mensual y temperatura media mínima mensual para el período de crecimiento y dichas variables fueron correlacionadas con los índices de crecimiento de las cronologías ARSTAN.

Si bien el análisis fue realizado a partir del efecto mensual de cada variable climática sobre el crecimiento, también se analizaron los efectos de lo ocurrido en grupos de cuatro meses, dado que al agruparse los mismos, se pudo observar la mayor correlación de todas las combinaciones de los 36 meses posibles.

A la hora de realizar el análisis del comportamiento de las variables para cada especie y sitio, durante los períodos 1966-2019 para Cerro Largo y 1987-2019 para Rivera, se observó que durante esos períodos se registraron eventos extremos de precipitación y temperatura que fueron asociados con la ocurrencia de “El Niño- Oscilación del Sur” (ENOS), por lo que se decidió evaluar si la ocurrencia de estos eventos tuvo algún efecto sobre el crecimiento de los árboles.

Para esto se obtuvieron los índices de ENOS del Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) para ambos departamentos, Rivera y Cerro Largo, y se correlacionaron con las seis

cronologías ARSTAN, con el fin de identificar correlaciones significativas para meses particulares ya sea en dos años precedentes, un año precedente y el año corriente.

Por oportunidad de la identificación de las variables más influyentes en el crecimiento, se presentó la dificultad de que se contaba con un gran número de variables (52 en total), que incluían la variable año, la especie, el sitio, datos de precipitación media mensual y anual para el período de crecimiento de los árboles, y temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales, para cada departamento. Es por esto que se utilizó el análisis de componentes principales (PCA), como herramienta para identificar patrones en los datos resaltando sus similitudes y diferencias. Dicho análisis fue realizado en el software estadístico R.

Esta herramienta reduce el número de dimensiones, sin mucha pérdida de información a partir de la creación de nuevas variables que son combinaciones lineales de las anteriores. Estas variables se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra.

A partir de este análisis se obtuvieron los componentes principales para Cerro Largo y Rivera, que permitieron posteriormente identificar cuáles de las variables tuvieron una mayor influencia sobre el crecimiento de los árboles. A su vez, se trabajó con la variable “año”, con el fin de identificar si hubo algún cambio en el comportamiento de las variables climáticas con el paso del tiempo.

A partir de los resultados obtenidos del análisis de componentes principales donde se evaluó el efecto año, se analizó la respuesta en el crecimiento de los árboles frente a un eventual cambio climático, evidenciado por el agrupamiento de años de los períodos 1966-1979 y 1980-2019 como consecuencia de la ocurrencia del “*climatic jump del 76*”. Para esto se realizó un análisis de Before and After Control Impact (BACI) para el departamento de Cerro Largo (dado que las cronologías de Rivera son posteriores a la ocurrencia del evento del año 1976), separando los períodos antes mencionados y utilizando la misma metodología que se utilizó para analizar la respuesta de meses individuales y cuatro meses a las variables climáticas estudiadas. Para este análisis se consideró nuevamente el período de crecimiento desde el mes de agosto al mes de Julio.

Los objetivos de este análisis fueron evaluar si un cambio en las variables ambientales ha cambiado el entorno, de manera de determinar qué componentes están adversamente afectados y

estimar la magnitud de esos efectos [66]. Para analizar este impacto se evaluaron las correlaciones dividiendo las cronologías en períodos iguales de 25 años para el departamento de Cerro Largo y 15 años para Rivera. De esta manera se logró obtener las correlaciones de meses individuales con las variables climáticas de dos años precedentes (t-2), un año precedente (t-1) y el año actual.

Finalmente, y con el objetivo de identificar las variables que más efecto tuvieron sobre el crecimiento de los árboles en cada sitio, se realizó un análisis de regresión múltiple en R, para cada departamento, donde se utilizaron los componentes obtenidos del PCA y otras variables de interés tales como el año, la especie y el sitio, y cuya variable dependiente fueron los índices de las 6 cronologías ARSTAN.

Para los modelos obtenidos, se analizó la significancia de cada una de las variables consideradas, y se obtuvo a partir de esto, las variables que mejor explicaron el crecimiento de los árboles estudiados.

3.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de variables climáticas

El clima se define sobre un período de al menos 30 años. Por lo tanto, una forma de ver los cambios ocurridos en el clima es tomar la diferencia entre dos períodos consecutivos de 30 años. Para un conjunto diferente de condiciones externas podemos obtener un estado del clima diferente y podemos definir el cambio climático como la diferencia entre dos estados climáticos del mismo tipo, por ejemplo, la diferencia entre dos inviernos, dos décadas, etc. Esta diferencia debe incluir cambios en la media y varianza. Una anomalía climática se puede definir entonces como la desviación de un estado climático particular para un intervalo de tiempo dado del conjunto de estados posibles [60].

El cambio climático no se restringe a un cambio en las condiciones medias en las lluvias o temperatura de una región, sino que generalmente está acompañado por cambios en la frecuencia de ocurrencia e intensidad de los extremos meteorológicos (por ej. olas de frío y calor) e hidroclimáticos (por ej. sequías) [60].

La figura 15 muestra la evolución temporal de las lluvias anuales acumuladas promediadas de Rivera y Cerro Largo en el período 1966-2019. Lo más conspicuo es la gran variabilidad año a año que exhibe esta variable: por ejemplo, en Rivera en 1989 llovió cerca de 800 mm en todo el

año mientras que en 2002 llovió cerca de 2400 mm, o sea 3 veces más. En Cerro Largo las variaciones no son tan grandes con un mínimo cercano a 700 mm en 1989 y un máximo de 2050 mm en 2002. La media para CL para el periodo considerado es de 1298 mm, mientras que para Rv y también para el período considerado es de 1604 mm, si consideramos el mismo periodo de tiempo para las dos localidades, CL pasa a ser de 1329 mm y 1604 mm en Rv; CL aumenta en un leve 2%.

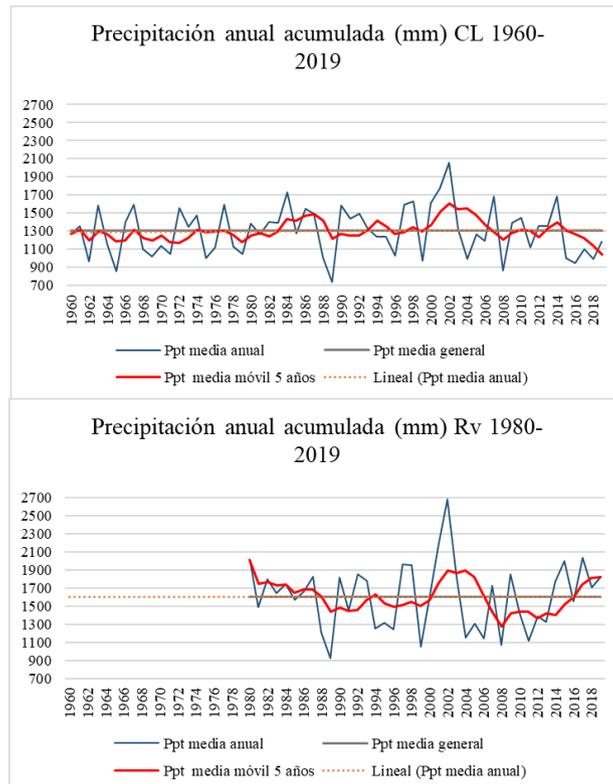


Figura 15. Precipitación anual acumulada, media móvil de 5 años y tendencia lineal, en mm, para las localidades de Cerro Largo en el período 1960-2019, estación meteorológica de Melo; y para Rivera en el período 1980-2019, estación meteorológica de Rivera . Fuente: Instituto Uruguayo de Meteorología, estación meteorológica de Melo y Rivera.

En la figura 16 se presentan los gráficos con los valores de las temperaturas medias, medias máximas y medias mínimas para las dos localidades y para los períodos estudiados. Se observa que la temperatura media del período para Cerro Largo es de 17,8°C y de 18,7°C para Rivera, mientras que la media máxima para CL es de 23,5°C y de 23,9°C para Rv, finalmente la temperatura media mínima es de 11,9°C para CL y de 13,4°C para Rv; apreciándose para las tres variables que los valores de Rv se mantienen superiores y que existe una leve tendencia lineal al

aumento para ambos períodos considerados y para ambas localidades, fundamentalmente para CL y expresado en la temperatura media.

Según Barreiro *et al* [60], la evolución de la temperatura anual en el periodo 1901 a 2000 muestra también una tendencia creciente sobre el periodo completo, configurando un crecimiento de las temperaturas medias anuales de aproximadamente 0.8°C durante el último siglo. Se observa que este incremento es sostenido desde finales de la década de 1970 hasta el presente, habiéndose registrado los máximos históricos durante los últimos cinco años. En los datos de las dos localidades trabajadas, el efecto mencionado para la región se expresa en Cerro Largo fundamentalmente para las variables temperatura media y algo en la temperatura media máxima, sin embargo, la temperatura media mínima tiene una tendencia que más tiene que ver con las variaciones del ENOS (Niña) que con un aumento de temperatura (Figura 16) y para Rv se observa tal tendencia lineal muy leve al aumento en las tres variables, incluso para la temperatura media mínima.

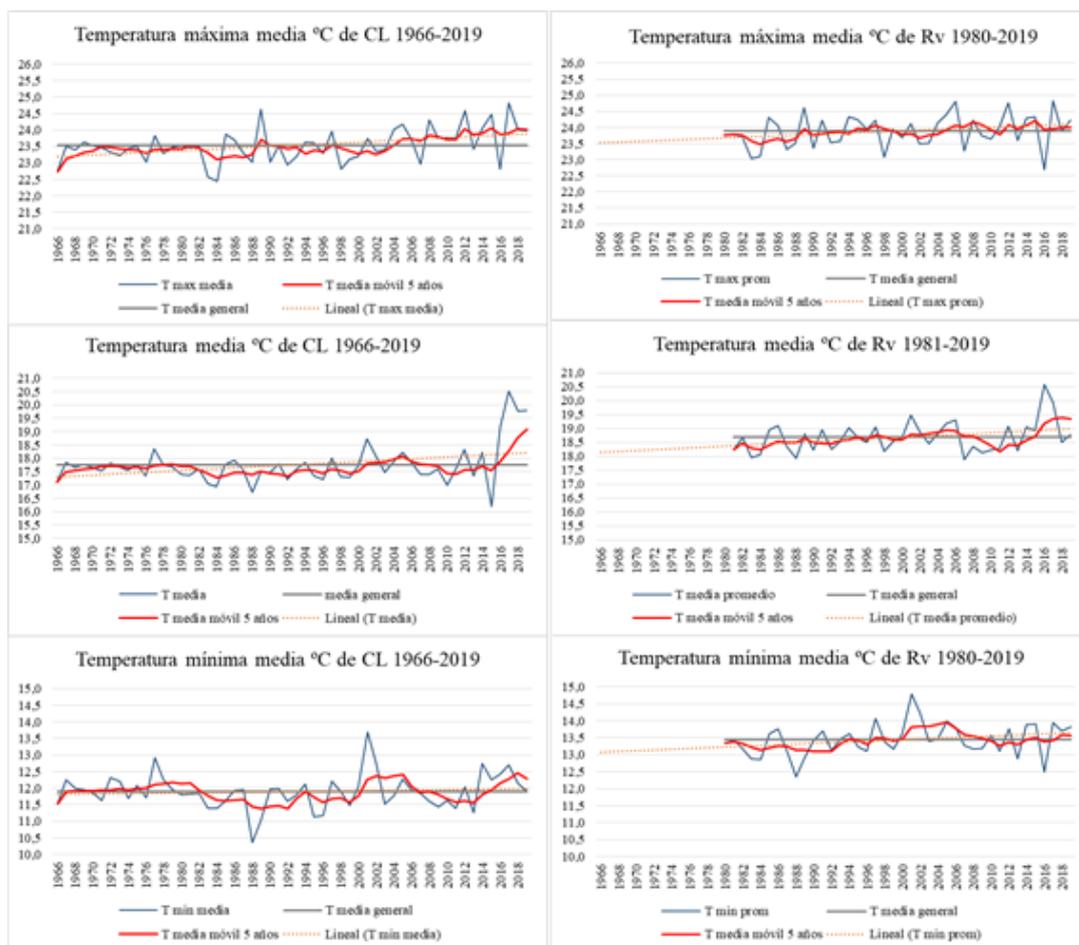


Figura 16. Temperatura máxima promedio, media promedio, mínima promedio y tendencia lineal, en °C, para los departamentos de Cerro Largo y Rivera en el período 1966-2019 y 1980-2019, respectivamente. Fuente: Instituto Uruguayo de Meteorología, estación meteorológica Melo y Rivera y base de datos de CRU, Royal Dutch Meteorological Institute (KNMI).

En particular si observamos el verano de 1988-1989 tanto en el departamento de Cerro Largo como Rivera, vemos que tanto las temperaturas máximas como las mínimas se acompañan en su comportamiento, superando sus respectivas desviaciones estándar, influenciando así a la temperatura media. El verano de 1997-1998 (uno de los más fríos de los 43 años estudiado) coincide con el desarrollo de un evento intenso del El Niño Southern Oscillation (ENOS), donde en general las temperaturas en Uruguay tienden a estar por debajo de lo normal, y con mayor influencia sobre las temperaturas máximas.

En términos generales se observa que existe una leve tendencia al aumento de la temperatura media en ambas localidades, tanto para el período 1960-2019 como para 1980-2019 (figura 16). Si se considera el período común para ambas localidades como siendo 1980-2019, se tiene que los valores de Rv no cambian, por razones lógicas y que para CL hay un leve descenso en la temperatura media mínima que pasa de 11,9°C (1960-2019) a 11,8°C (1980-2019). Sin embargo, si dividimos el período común en dos períodos iguales: 1980-1999 y 2000-2019, se observa que la temperatura media de CL aumenta en un 4%, pasando de 17,4°C a 18,1°C y en Rv aumenta 2% pasando de 18,5°C a 18,8°C (figura 17).

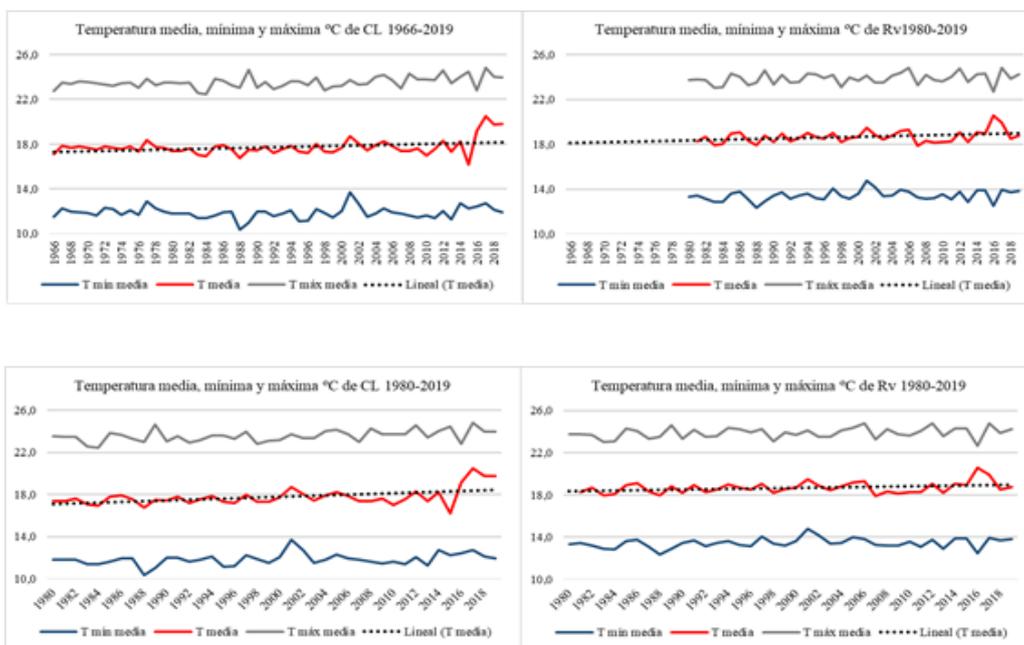


Figura 17. Valores resumidos de temperatura máxima promedio, media promedio, mínima promedio y tendencia lineal, en °C, para los departamentos de Cerro Largo y Rivera: arriba: en el período 1966-2019 y 1980-2019, respectivamente y abajo: en el período común 1980-2019. Fuente: Instituto Uruguayo de Meteorología, estación meteorológica Melo y Rivera y base de datos de CRU, Royal Dutch Meteorological Institute (KNMI).

3.2 RELACIONES BIOMÉTRICAS

En las tablas 3 y 4 se presentan los valores alométricos generales de los individuos muestreados para este trabajo. Allí observamos que los árboles de la especie *P. taeda* tienen en promedio entre 41,36 y 50,3 cm de diámetro, altura total de entre 22,89 y 30,43 m. Recordando que los árboles colectados en Cerro Largo tienen el doble de edad que los de Rivera, vemos que además de tener mayores diámetros también tienen fustes más largos llegando a 18,35 m para *P. taeda* 2; mientras que en Rivera los fustes tienen la altura que les ha propiciado la poda realizada por las empresas, estando entre 6,11 y 7,02m. Según se observa en la tabla 3 la mayor variabilidad para todas las variables se dio en el rodal de Cerro Largo, mientras que los rodales de Rivera son más homogéneos salvo para la variable altura de fuste.

	<i>P. taeda</i> L Rivera			<i>P. taeda</i> F Rivera			<i>P. taeda</i> 1 Cerro Largo			<i>P. taeda</i> 2 Cerro Largo		
	\bar{x}	Desvio	CV	\bar{x}	Desvio	CV	\bar{x}	Desvio	CV	\bar{x}	Desvio	CV
DAP	43,7	3,56	8%	41,4	1,18	3%	50,3	11,81	23%	46,53	5,62	12%
ht	24	0,77	3%	24,9	1,24	5%	22,89	3,01	13%	30,43	1,19	4%
hf	6,11	0,48	8%	7,02	0,89	13%	2,65	0,39	15%	18,35	0,94	5%
hc	17,9	0,85	5%	17,9	1,43	8%	20,24	3,27	16%	12,08	1,45	12%
\emptyset copa							6,18	1,42	23%	6,4	0,57	9%

Tabla 3. Variables alométricas de *P. taeda*.

Por otra parte, también se cumple una tendencia similar en el comportamiento de los individuos muestreados de *P. elliottii*, ya que los ejemplares de Cerro Largo, los cuales poseen el doble de edad de los individuos de Rivera, presentan valores de coeficiente de variación también superiores, a excepción de la variable altura total. La variación para la variable ht es de 5% para ambos lugares, mientras que el valor de la media es superior para Rivera, aunque la media de DAP es 7cm menor, dando la pauta de que el sitio - Rivera es más propicio para la especie (tabla 4).

	Rívera			Cerro Largo		
	Lumin			EEBR		
	\bar{x}	Desvio	CV	\bar{x}		CV
DAP	49,01	3,94	8%	56,94	7,73	14%
ht	32,85	1,67	5%	30,63	1,47	5%
hf	22,44	2,89	13%	14,49	6,29	43%
hc	10,41	3,13	30%	16,14	6,1	38%
\emptyset copa	5,04	0,67	13%	7,82	2,42	31%

Tabla 4. Variables alométricas de *P. elliottii*.

3.2.1 Valores de incremento radial de la muestra

En las figuras 18 y 19 se presentan los valores de incremento radial anual de todos los anillos de crecimiento de cada disco muestreado, para cada especie por sitio. Estos valores son la matriz de datos utilizados para construir las cronologías, que constituyen anomalías del crecimiento de los árboles a los cuales se les quita el efecto de la edad mediante una ecuación de crecimiento ajustada con los propios datos, tal como se planteó en la metodología.

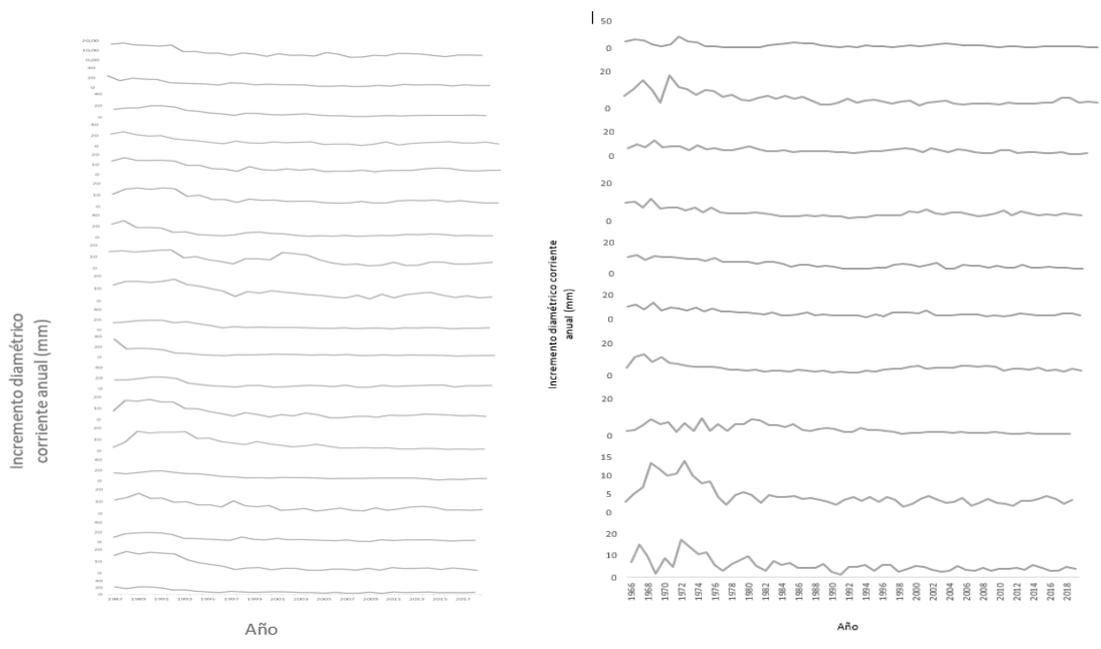


Figura 18. Series temporales del promedio de incremento diamétrico corriente anual de las series de 19 árboles de *P. elliotii* de Rivera y 10 árboles de *P. elliotii* de Cerro Largo, considerados para armar la cronología maestra.

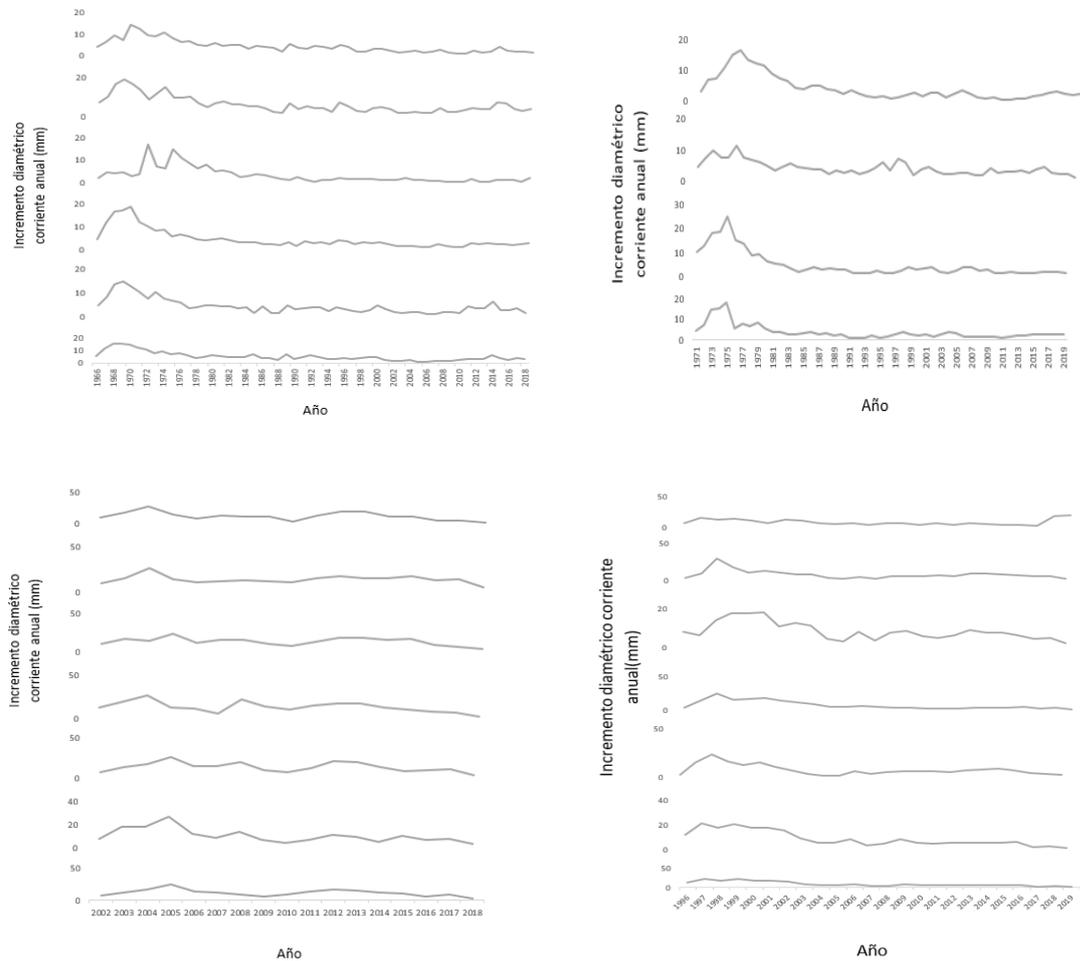


Figura 19. Series temporales del promedio de incremento diamétrico corriente anual de las series de 7 árboles de *P. taeda* 1 y 4 árboles de *P. taeda* 2 de Cerro Largo, 7 árboles de *P. taeda* L y 6 árboles de *P. taeda* F de Rivera, considerados para armar la cronología maestra.

3.2.2 Crecimiento acumulado, periódico y medio

En la figura 20 se presenta el crecimiento acumulado o crecimiento periódico promedio en función de la edad para todas las localidades por especie, según el criterio que se utiliza para la construcción de las cronologías, que más adelante se desarrolla. Es claro que las colectas de Cerro Largo son más longevas como se ha comentado en secciones anteriores. A pesar de que las mismas tienen más de 50 años siguen presentando una tendencia de crecimiento acumulado en diámetro en forma creciente. Asimismo, se observa que el crecimiento acumulado en Rivera

(líneas azules en la figura 20) siempre resulta más acelerado que en Cerro Largo (líneas rojas en la figura 20) para ambas especies, independientemente de la edad y de la silvicultura.

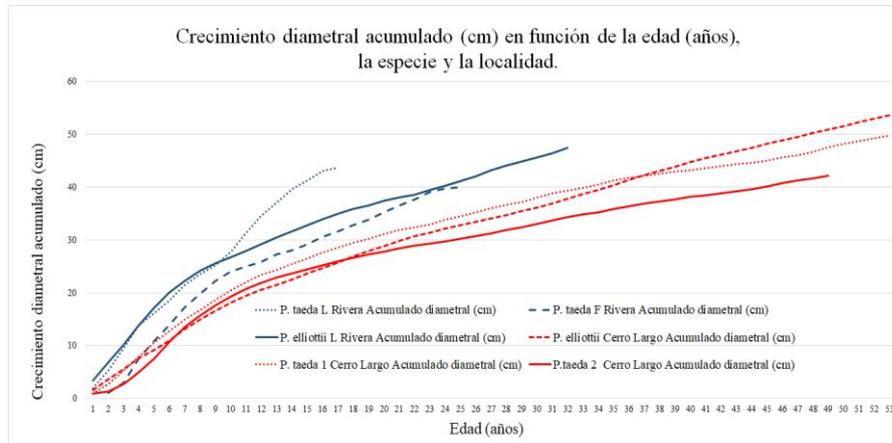


Figura 20. Crecimiento diametral acumulado en cm en función de la edad para las colectas de los departamentos de Rivera y Cerro Largo, para ambas especies.

Cuando se desglosan los datos en las “spaguetti plots” en la figura 21 y se comparan en detalle el incremento radial de *P. Elliottii* por lugares en función del tiempo, se observa que la dispersión de los datos de Cerro Largo es mayor, con un 47% de coeficiente de variación frente a 39% en Rivera (tabla 5). Es importante recordar que el rodal de CL pertenece a un ensayo de orígenes, mientras que el rodal de Rivera es más homogéneo porque la semilla es la misma, ya que es una plantación comercial de rendimiento con manejo silvicultural intensivo. Tal como se constata en la tabla 5 los valores de crecimiento medio radial son menores para Rivera de (1,58 cm/año) que para Cerro Largo (1,64 cm/año) para todo el periodo de edades y de 1,77 cm/año para las edades en común, 32 años de edad, es aún mayor en Cerro Largo.

Para *P. taeda* los valores de crecimiento acumulado radial son distintos entre empresas para la misma localidad en Rivera y entre sitios para la localidad de Cerro Largo, sin embargo, los valores de desvío y coeficiente de variación de *P. taeda* de Fymnsa resultan similares a los valores de *P. taeda* 2, el ensayo de orígenes y procedencias de CL, lo cual resulta particularmente interesante (tabla 5). Los valores medios de incremento radial anual general para *P. taeda* fueron de 1,27 cm/año a 1,67 cm/año; donde los valores más elevados estuvieron en CL, por otra parte el mayor valor de CV 52% estuvo en Lumin de Rivera en porcentaje respecto a la media, pero no en valor absoluto, según se puede observar en la tabla 5 y en la figura 21.

Se observa que los árboles de Cerro Largo son más grandes, por eso el crecimiento acumulado promedio por año es mayor que en Rivera; pero no es solamente ese hecho, sino que a pesar del tamaño también presentan una tasa de acumulación de madera mayor, expresado a través del área transversal, como indicador de crecimiento. Muchas veces las especies comerciales se cortan demasiado temprano, por lo que al extender los turnos de corta se podrían obtener mayores rendimientos. La pauta clara de esta última observación es que en los “spaghetti plots” de CL, de *P. taeda* 2 y *P. elliottii* las tasas de crecimiento aparecen en forma creciente para el crecimiento radial acumulado, eso se puede apreciar también en la figuras 23 y 25 donde se registra el incremento medio anual - IMA y el incremento corriente anual - ICA, en área transversal (cm²).

En la figura 23 las gráficas (a) y (b) correspondientes a Rivera se aprecia que luego del raleo el crecimiento se acelera considerablemente, eso se ve sobre todo en *P. taeda* de Lumin, siendo plantaciones comerciales con una genética más homogénea, aunque la variación es elevada y llega a tasas de crecimiento algo más aceleradas para ese caso en particular.

	P. elliottii RIV	P. elliottii CL	P. taeda L RIV	P. taeda F RIV	P. taeda 1 CL	P. taeda 2 CL
\bar{x} (cm)	1,58	1,64	1,27	1,32	1,65	1,44
σ (cm)	6,10	7,76	6,62	5,75	7,15	5,67
C.V (%)	39	47	52	44	43	39

Tabla 5. Comparación de medias, desvíos y coeficientes de variación para el crecimiento radial acumulado en cm por especie y por sitio.

Test for equal means						
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)	
Between groups	1641.25	5	328.249	81.53	6,78E-26	
Within groups	7650.98	90	85.108			
Error	301.977	75	402.636			
Between subjects	7349	15	489.933			
Total	9292.22	95				
Levene's test for homogeneity of variance, from means			p (same)	0.1637		
Levene's test, from medians			p (same)	0.2726		

	<i>P. taeda</i> L Rivera	<i>P. taeda</i> F Rivera	<i>P. elliottii</i> Rivera	<i>P. elliottii</i> Cerro Largo	<i>P. taeda</i> 1 Cerro Largo	<i>P. taeda</i> 2 Cerro Largo
<i>P. taeda</i> L Rivera		0.0001264	0.001543	0.0001264	0.0001264	0.0001264
<i>P. taeda</i> F Rivera	14.59		0.0001266	0.000145	0.1159	0.0001462
<i>P. elliottii</i> Rivera	5.787	8.799		0.0001264	0.0001264	0.0001264
<i>P. elliottii</i> Cerro Largo	21.96	7.372	16.17		0.1014	1
<i>P. taeda</i> 1 Cerro Largo	18.23	3.644	12.44	3.728		0.1049
<i>P. taeda</i> 2 Cerro Largo	21.94	7.371	16.15	0.02118	3.707	

Tabla 6. Prueba estadística de medias y varianzas para cada especie y localidad, los valores por debajo de la diagonal indican los resultados del test de Tukey, y los valores por encima los p-valor.

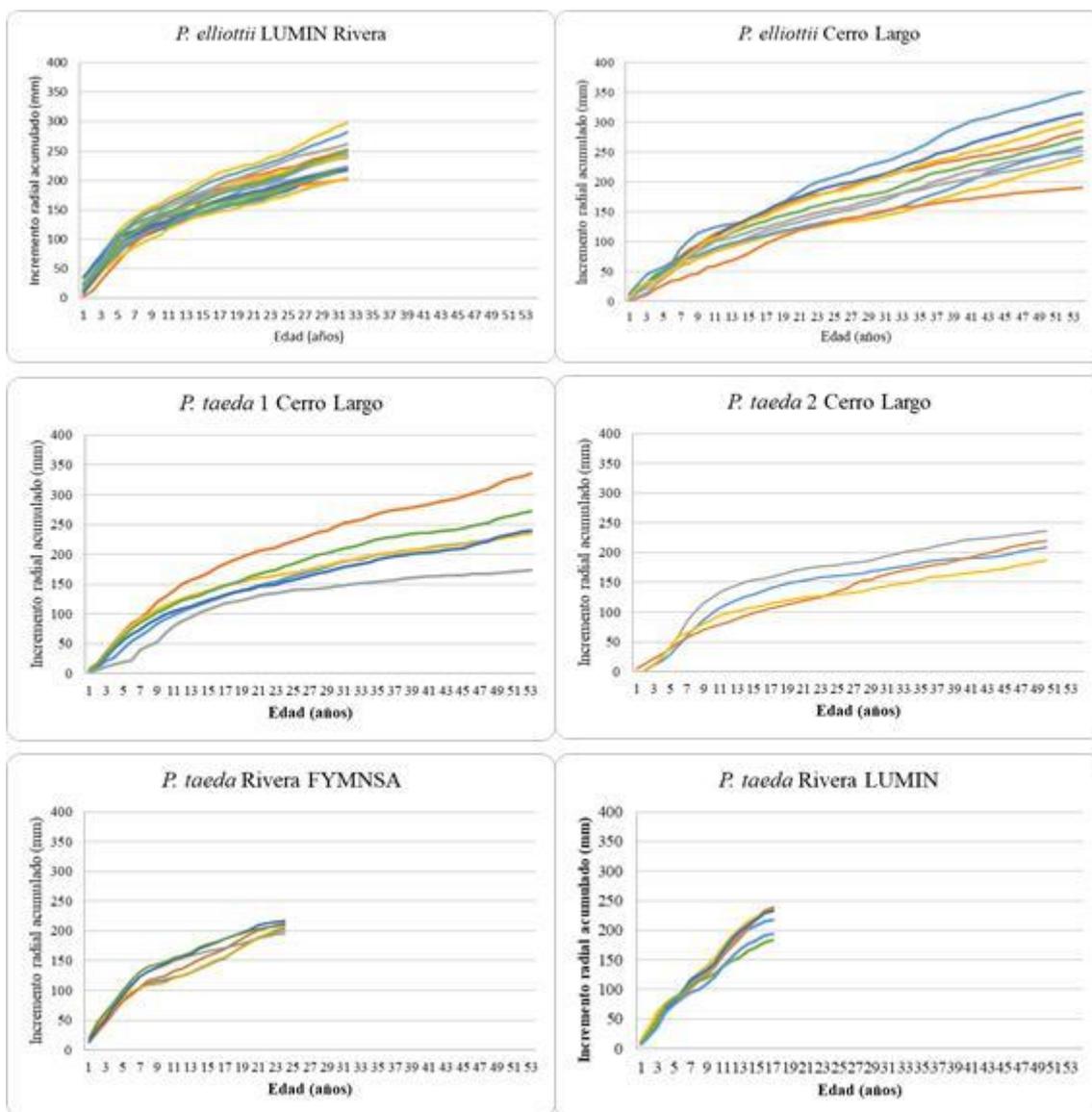


Figura 21. Spaghetti plots con el Incremento radial acumulado de *P. elliottii* y *P. taeda* para los departamentos de Rivera y Cerro Largo.

El crecimiento se puede estimar como volumen o como área basal, en este caso usamos el área transversal promedio por localidad/especie, como indicador de área basal. Según el período de tiempo se puede pensar en crecimiento anual corriente, crecimiento periódico y crecimiento medio anual.

El área basal o área transversal, como se utiliza en este caso, es un indicador más adecuado para tomar decisiones respecto al turno de corta biológico, que el incremento en diámetro. Por esa razón, además de las clásicas gráficas de IMA/ICA de crecimiento diametral, también se muestra

la tendencia para los mismos indicadores, pero considerando el área transversal promedio, para cada cronología.

Para *P. taeda* Rv Lumin la curva de diámetro a la base de ICA corta tres veces a la de IMA, en función de los sucesivos raleos efectuados, si consideramos el tercer corte, éste se da a los 13 años con un valor de 2,5 cm/año de ICA y de 2,85 cm/año de IMA, figura 22 (a). Cuando se realiza el mismo análisis utilizando el área transversal se tiene que la curva de ICA corta a la de IMA a los 16 años con valores de ICA de 3,03 m²/ha/año (a una densidad de 333 árb/ha) y de 3,84 m²/ha/año, de IMA, figura 23 (a).

Para *P. taeda* Rv Fymnsa pasa algo bastante similar a lo que sucede en Lumin, pero las diferencias en las edades de corte son mayores. Para la variable diámetro a la base, la curva de ICA corta a la de IMA a los 7 años, con valores de 2,6 cm/año y 2,83 cm/año de IMA, figura 22 (b); cuando se observa la gráfica de área transversal se ve que la edad del óptimo biológico pasa a los 23 años, donde las curvas se tocan varias veces antes, pero dada la ocurrencia de los raleos, que hacen que el ICA se vuelva a acelerar. Finalmente, los valores de corte son de 1,42 m²/ha/año, para 311 árb/ha, y 1,68 m²/ha/año para IMA, a los 23 años, figura 23 (b).

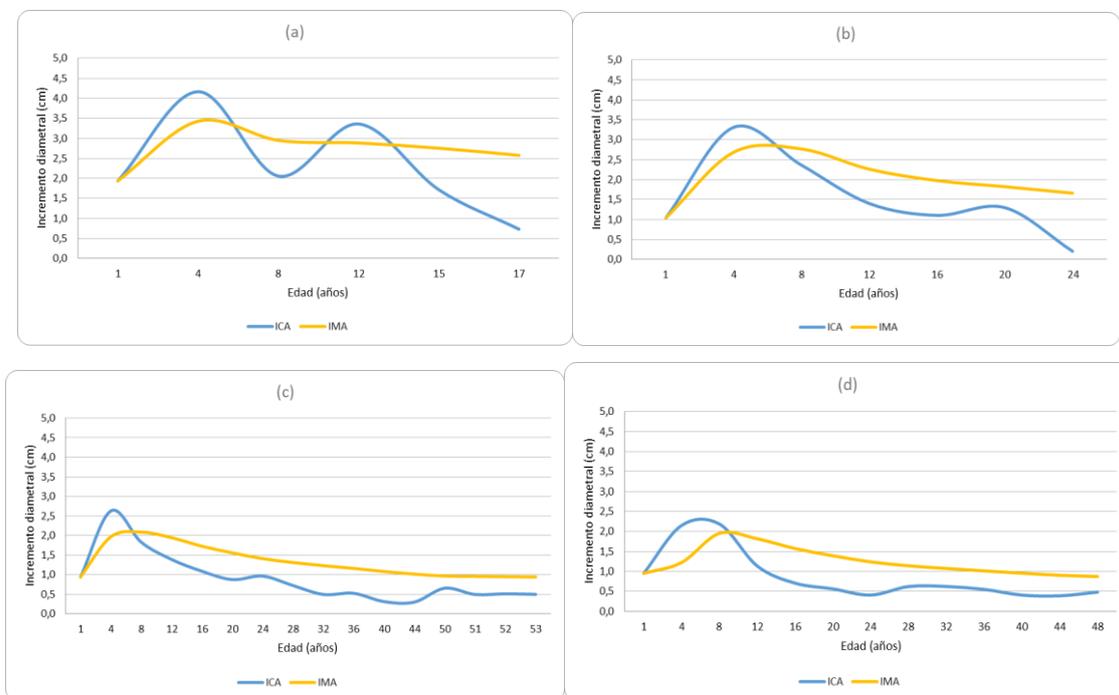


Figura 22. IMA e ICA en cm para (a) *P. taeda* L de Rivera, (b) *P. taeda* F de Rivera, (c) *P. taeda* 1 de Cerro Largo y (d) *P. taeda* 2 de Cerro Largo a partir del incremento diametral.

Cuando se analizan los datos de Cerro Largo para *P. taeda* 1 ocurre algo muy interesante, recordando que se trata de un ensayo de orígenes y procedencias, sin raleos. Se tiene que el IMA y el ICA en diámetro a la base se iguales a los 7 años con valores de 2,23 cm/año para ICA y de 2,12 cm/año para IMA (figura 22 (c)), mientras que si se observa la gráfica de área transversal (figura 23 (c)) se tienen muchos puntos de contacto: a los 22-23 años, luego a los 29 y un tercer periodo que va desde los 37 a los 45 años. Luego el ICA se mantiene constante con 0,004 m²/árbol/año, en este caso no se tienen datos de densidad, y este valor se mantiene constante para los dos indicadores (ICA e IMA), hasta los 53 años que es cuando se tala el rodal.

En el caso de *P. taeda* 2, también de Cerro Largo, ocurre algo muy similar a lo sucedido con *P. taeda* 1. Los valores de IMA e ICA se igualan a los 9 años, con un crecimiento diametral a la base de 2,0 cm/año (figura 22 (d)). Luego para el área transversal hay tres períodos durante los cuales el ICA presenta valores inferiores al IMA: de los 14 a los 26 años, de los 33 a los 34 años y al igual que con *P. taeda* 1, de los 37 a los 44 años. A partir de los 45 años el ICA supera el crecimiento del IMA y se mantiene en 0,003 m²/árbol/año (figura 23 (d)).

En función de estos resultados se visualiza la importancia de mantener rodales testigo de largo aliento para la investigación y la toma de decisiones basadas en información de largo plazo sobre el comportamiento de las especies forestales comerciales en Uruguay.

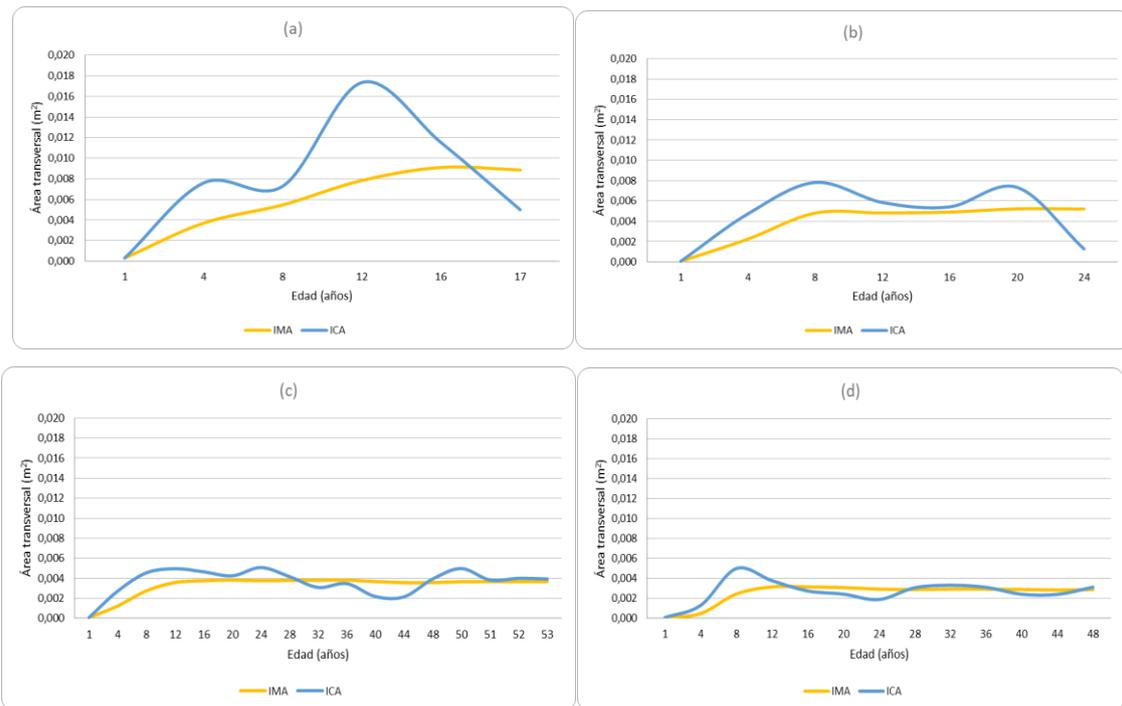


Figura 23. IMA e ICA en m^2 para (a) *P. taeda* L de Rivera, (b) *P. taeda* F de Rivera, (c) *P. taeda* 1 de Cerro Largo y (d) *P. taeda* 2 de Cerro Largo a partir del área transversal.

Para *P. elliottii* en Rivera los valores de ICA e IMA, del diámetro a la base, se igualan a los 5 años con un valor de 3,4 cm anuales, tal como se observa en la figura 24 (a). Para el caso del área transversal, los valores de ICA e IMA se igualan en dos períodos: de los 10 a los 11 años y de los 18 a los 24 años, posteriormente a partir de los 25 años y luego hasta los 32, cuando se corta el rodal, el crecimiento del ICA supera al IMA con valores de 0,006 a 0,008 $m^2/\text{árbol/año}$, con una tendencia creciente del ICA, según la figura 25 (a).

Los resultados muestran que, para el caso de *P. elliottii* en Cerro Largo, los valores de ICA e IMA, del diámetro a la base, se igualan a los 8 años con un valor de 1,9 cm anuales, tal como se observa en la figura 24 (b). Finalmente, cuando se tiene en cuenta la figura 25 (b) con área transversal se registra que el ICA nunca llega a tener valores menores que el IMA hasta que el rodal se tala a los 53 años, el ICA (0,005 $m^2/\text{árbol/año}$) se mantiene constante con valores superiores al IMA (0,004 $m^2/\text{árbol/año}$). Resaltando nuevamente la importancia de contar con información de largo plazo sobre el comportamiento de las especies forestales comerciales en Uruguay.

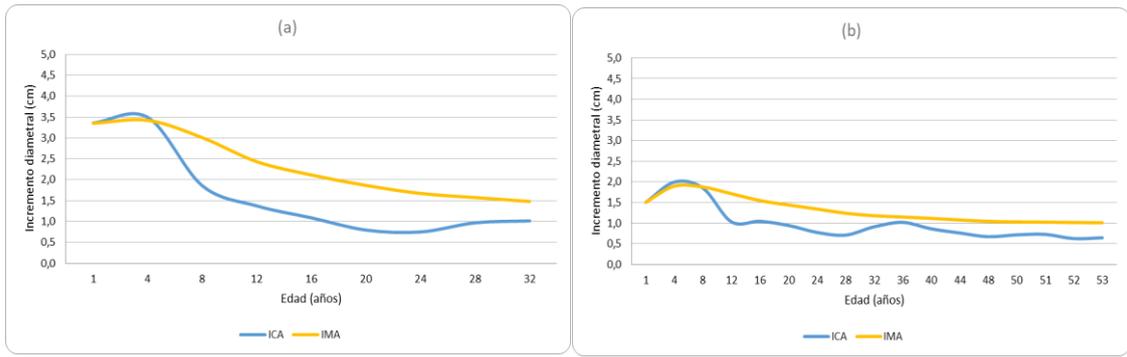


Figura 24. IMA e ICA en cm para (a) *P. Elliottii* de Rivera y (b) *P. Elliottii* de Cerro Largo, a partir del incremento diametral

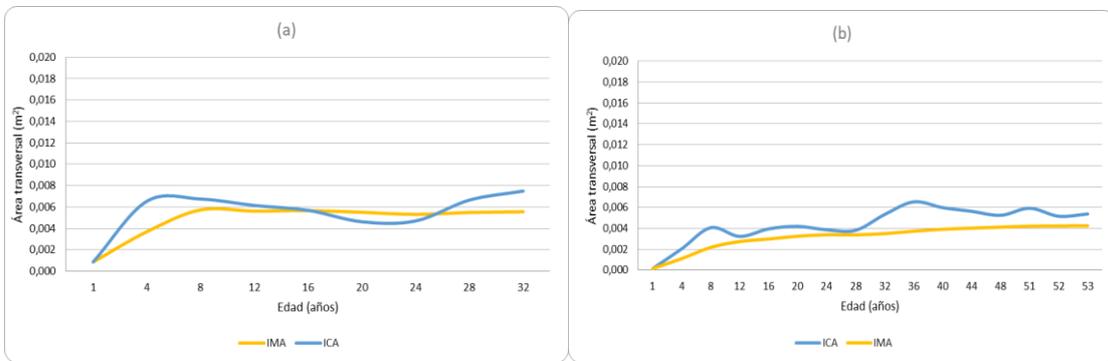


Figura 25. IMA e ICA en m² para (a) *P. Elliottii* de Rivera y (b) *P. Elliottii* de Cerro Largo, a partir del área transversal.

3.3 CRONOLOGÍAS

Para la obtención de las cronologías se utilizó el método de “Skeleton Plot” [67] para poder realizar la correcta datación cruzada de los anillos de crecimiento de cada disco basal, de esta manera se detectaron para cada muestra los años más extremos, identificando aquellos anillos más estrechos en función de los demás anillos de la serie, y así se utilizaron estos años marcadores para buscar coincidencias entre las series de los demás discos de la misma especie y sitio (figuras 26 y 27).

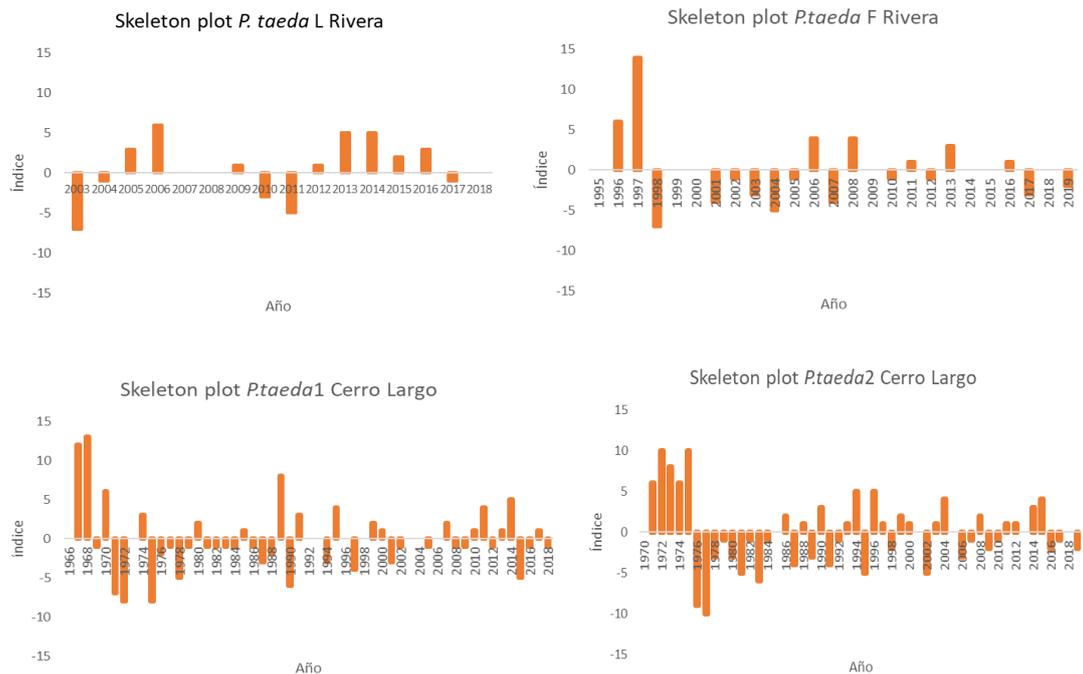


Figura 26. “Skeleton plot” de los discos de *P. taeda* L de Rivera, *P. taeda* F de Rivera, *P. taeda* 1 de Cerro Largo y *P. taeda* 2 de Cerro Largo.

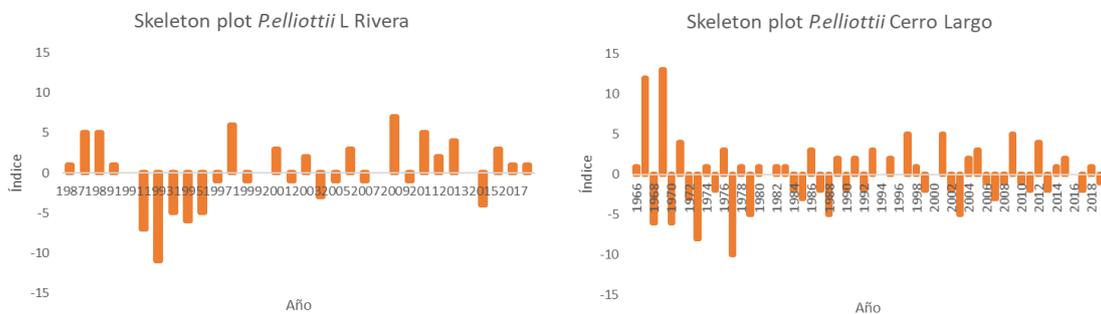


Figura 27. “Skeleton plot” de los discos de *P. elliottii* L de Rivera y *P. elliottii* de Cerro Largo. Las series fueron analizadas en COFECHA, y en función del software se fueron corrigiendo eventuales errores de datación y medición.

Como se puede observar en la tabla 7, se calculó la intercorrelación entre árboles por especie y por sitio. Para *P. taeda* L de Rivera se obtuvo una correlación de 0.78 y se consideraron las 7 muestras, dado que en general presentaban una buena intercorrelación. En cuanto a *P. taeda* F de Rivera, presentó una intercorrelación de 0,69 y se descartó una de las muestras de los 7 árboles colectados, dado que presentó baja correlación con los demás árboles. Por otra parte, *P. elliotti* de Rivera presentó una baja intercorrelación ($r=0.36$). En Cerro Largo, las muestras de *P. taeda*

colectadas en el primer rodal presentaron una alta correlación ($r=0.60$) y se consideraron 6 de las 7 muestras colectadas inicialmente, dado que una de ellas pertenecía a una especie distinta. Del segundo rodal de Cerro Largo se obtuvieron intercorrelaciones de 0.28 para *P. taeda* y 0.36 para *P. elliottii*, lo que era predecible dado que provenían de un ensayo de orígenes.

Sitio	<i>P. taeda</i>		<i>P. elliottii</i>	
	Número de árboles	Correlación entre árboles	Número de árboles	Correlación entre árboles
LUMIN	7	0.78	19	0.36
FYMNSA	6	0.69		
EEBR1	6	0.60		
EEBR2	4	0.32	10	0.28
Total	23		29	

Tabla 7. Cantidad de árboles por sitio y correlación entre los mismos obtenida de COFECHA.

Si bien inicialmente se pretendía considerar en conjunto las muestras de *P. taeda* de los dos rodales de Cerro Largo, al unir ambas cronologías se obtenían correlaciones muy bajas, dado que en estos casos influye que uno de los rodales estaba dado por un ensayo de orígenes y que, a pesar de la cercanía de ambos, uno de los rodales se encontraba en ladera media y otro en la ladera baja. Es por esto que se obtuvieron 6 cronologías en total, 2 cronologías de *P. taeda* por departamento y una cronología de *P. elliottii* por departamento.

En las figuras 28 y 29 se observan las cronologías maestras (obtenidas de COFECHA), standard, residual y ARSTAN por especie y por sitio. A pesar del suavizado, las cronologías ARSTAN mantienen picos muy llamativos en el año 2014, donde las precipitaciones fueron notoriamente más abundantes que el año anterior.

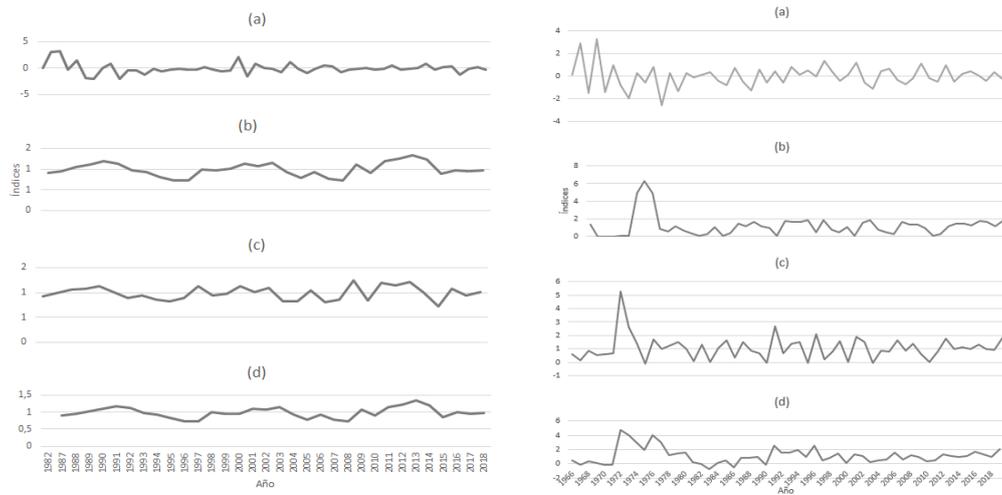


Figura 28. Cronologías de *P.elliottii* de Rivera (izquierda) y *P. elliottii* Cerro Largo (derecha) - (a)Cronología master salida de COFECHA, (b) Cronología Standard, (c) Cronología residual y (d) Cronología Arstan salidas de Arstan.

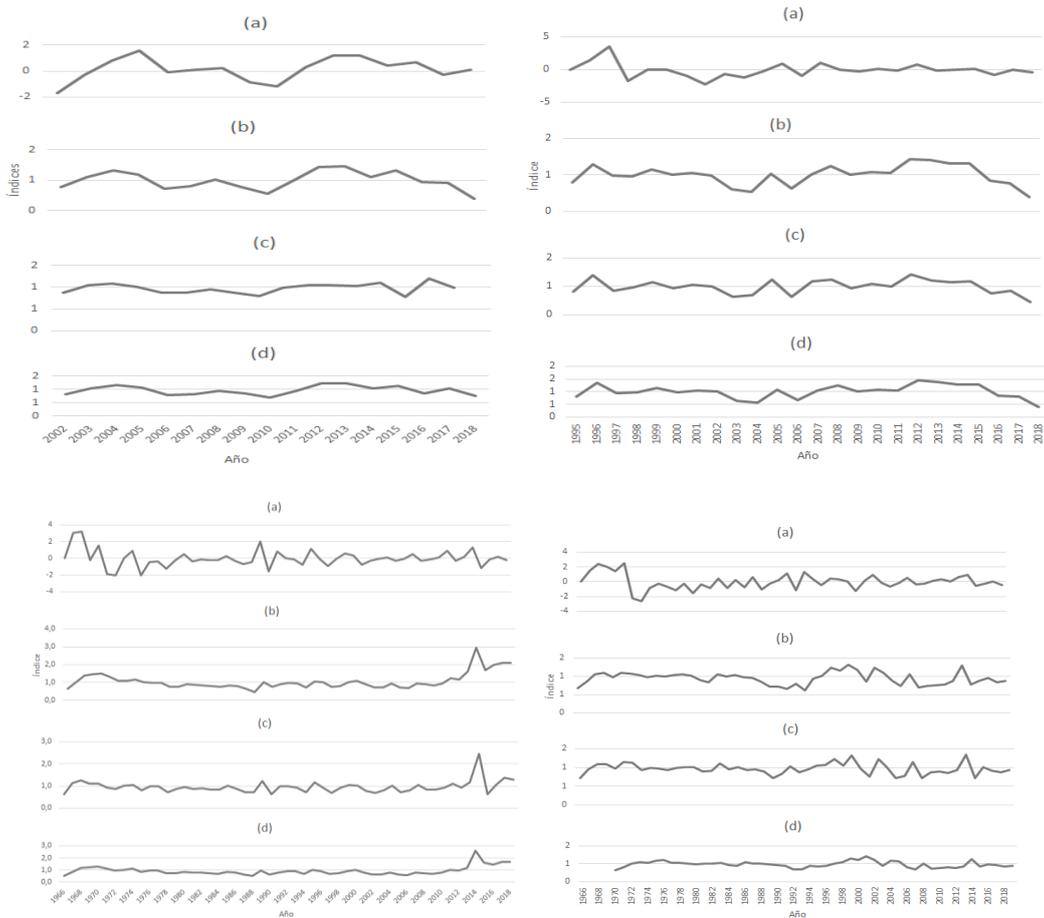


Figura 29. Cronologías de *P.taeda L de Rivera*, *P. taeda F de Rivera*, *P. taeda 1 de Cerro Largo* y *P. taeda 2 de Cerro Largo* (de izquierda a derecha y desde arriba abajo)- (a)Cronología master salida de COFECHA, (b) Cronología Standard, (c) Cronología residual y (d) Cronología Arstan salidas de Arstan.

En la tabla 8 se muestran los valores de EPS (Expressed population signal) y rbar para las 6 cronologías obtenidas. Como se vio anteriormente un valor de $EPS > 0.85$, se considera confiable en cuanto a la señal que expresan los árboles en su conjunto. En este caso, sólo la cronología de *P. elliotii* de Cerro Largo fue la que obtuvo un valor de EPS que se encuentra en el límite, lo que es esperable, dado que, tratándose de un ensayo de orígenes, la procedencia de las semillas puede ser un factor influyente en el crecimiento y que por tanto debe de considerarse a la hora de evaluar la respuesta frente a las variables climáticas.

Especie	Depto	EPS	rbar
<i>P. elliotii</i>	Rivera	0.96	0.73
<i>P. elliotii</i>	Cerro Largo	0.85	0.71
<i>P. taeda L</i>	Rivera	0.98	0.69
<i>P. taeda F</i>	Rivera	0.99	0.75
<i>P. taeda 1</i>	Cerro Largo	0.98	0.64
<i>P. taeda 2</i>	Cerro Largo	0.94	0.65

Tabla 8. EPS y BAR de todas las cronologías

Por otra parte, en la figura 30, se ven los gráficos de autocorrelación extraídos del software ARSTAN, donde se destaca una autocorrelación significativa común de las seis cronologías para el año corriente t , un año precedente ($t-1$) y dos años precedentes ($t-2$). Se puede observar, además, que tanto para *P. elliotii* como las dos cronologías de *P. taeda* de Cerro Largo, se dan autocorrelaciones elevadas (>0.5), fundamentalmente para un año precedente, lo que denota una fuerte influencia de lo ocurrido respecto a las variables climáticas de un año anterior sobre el crecimiento actual de los árboles, es decir, que los mismos expresan de manera más efectiva el comportamiento pasado del clima.

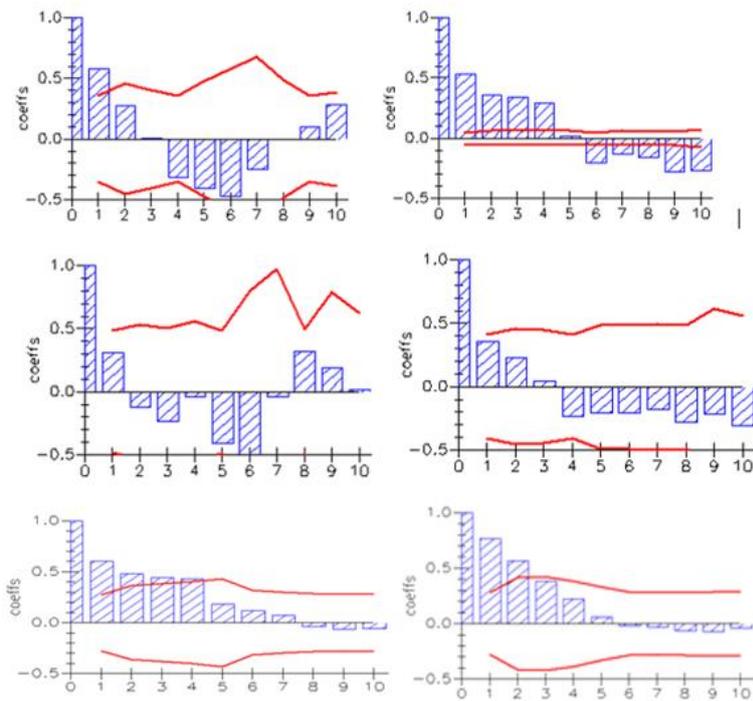


Figura 30. Gráficos de autocorrelación para cada cronología : (a) *P. elliottii* Rivera, (b) *P. elliottii* Cerro Largo, (c) *P. taeda* L Rivera, (d) *P. taeda* F Rivera, (e) *P. taeda* 1 Cerro Largo, (f) *P. taeda* 2 Cerro Largo- Salida de ARSTAN.

3.4 ANÁLISIS CLIMÁTICO

3.4.1 *Pinus elliottii*

El análisis climático, en cuanto a la respuesta en el crecimiento en relación con la influencia de las variables climáticas precipitación, temperatura media, media mínima y media máxima, se realiza considerando el período de crecimiento o “t” desde el mes de agosto al mes de julio próximo. A partir de esto se observó la respuesta del crecimiento influenciado por el comportamiento de las variables climáticas de dos años precedentes (t-2), un año precedente (t-1) y el año corriente (t).

Se analiza, además, la correlación para agrupaciones de 4 meses, dado que se observa una respuesta marcada con lo que ocurre en 4 meses contiguos sobre el crecimiento.

En general, *P. elliottii*, se comporta distinto para ambos sitios, notándose una marcada diferencia de respuesta de la especie y un marcado regionalismo, a pesar de que existe una diferencia de 185

kilómetros de distancia y 75m de altitud entre los sitios. Sin embargo, se puede encontrar la similitud de que, en ambos departamentos, el crecimiento de la especie se ve favorecido ante la ocurrencia de primaveras lluviosas.

El clima, y el efecto del cambio climático es diferente para ambos sitios, con una tendencia de la precipitación media de Cerro Largo y Rivera a mantenerse igual, y un aumento de la temperatura media en Cerro Largo (de 0.3°C en el período 1980-1999 y 0.7°C entre 2000-2019).

Mientras que en el año corriente t aparece una respuesta similar a la precipitación de verano, en t-2 y t-1 estas respuestas se vuelven opuestas. En t-1, *P. elliotii* de Cerro Largo responde positivamente a la precipitación de finales de otoño ($r=0,3$), pero, en Rivera, esta respuesta positiva se ve a principios del otoño ($r=0,54$).

En cuanto a la temperatura media máxima, *P. elliotii* de Cerro Largo responde negativamente en el verano de t-2 ($r=-0,39$) y t-1 ($r=-0,41$) y de forma positiva a la temperatura media máxima de primavera en t ($r=0,33$).

Si analizamos la respuesta de *P. elliotii* para meses individuales, vemos que responde negativamente a la precipitación de otoño en t-2 ($r=-0,34$), y a la precipitación de primavera en t-1, centrada en octubre con una correlación de $-0,39$, mientras que en t responde positivamente a la precipitación de enero ($r=0,55$) (Figura 31).

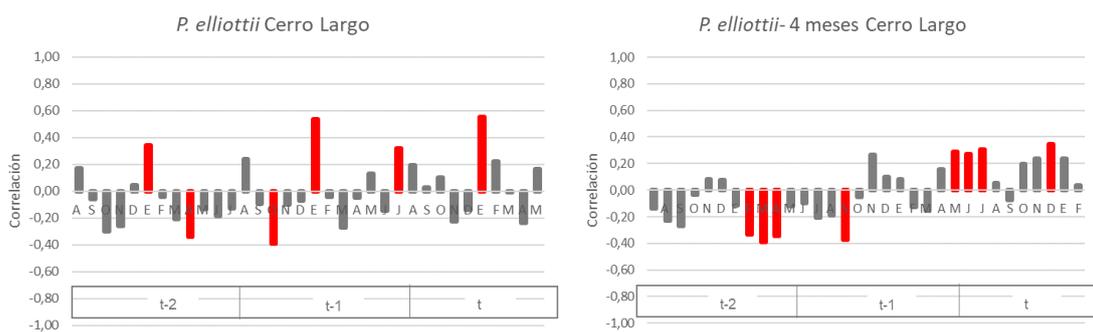


Figura 31. Respuesta a la precipitación para meses individuales y cuatro meses de *P. elliotii* en Cerro Largo.

En t-2, responde negativamente a la temperatura máxima de octubre ($r=-0,40$) y julio ($r=-0,46$), y en t-1 también lo hace de forma negativa a la temperatura máxima de octubre ($r=-0,54$), mientras

que en diciembre responde de forma positiva con una correlación de 0,53. En t responde de forma negativa a la temperatura máxima de febrero ($r=-0,58$) (Figura 32).

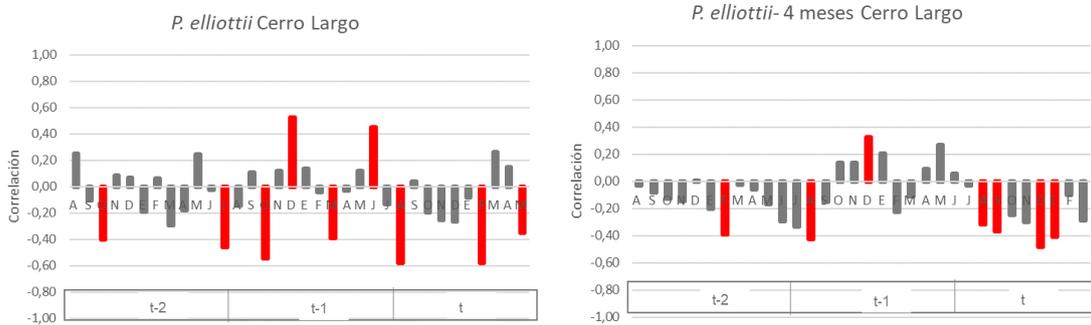


Figura 32. Respuesta a la temperatura máxima para meses individuales y cuatro meses de *P. Elliottii* en Cerro Largo.

La respuesta a la temperatura media es negativa para los meses de octubre ($r=-0,57$), marzo ($r=-0,55$) y abril ($r=-0,40$) y positiva en mayo ($r=0,33$) en t-2. En t-1 responde negativamente a la temperatura media de octubre ($r=-0,55$), marzo ($r=-0,63$) y positivamente en enero ($r=0,40$), febrero ($r=0,30$) y mayo ($r=0,43$). En t se ve una respuesta negativa a la temperatura media de primavera centrada en octubre ($r=-0,55$) y noviembre ($r=-0,33$) (Figura 33).

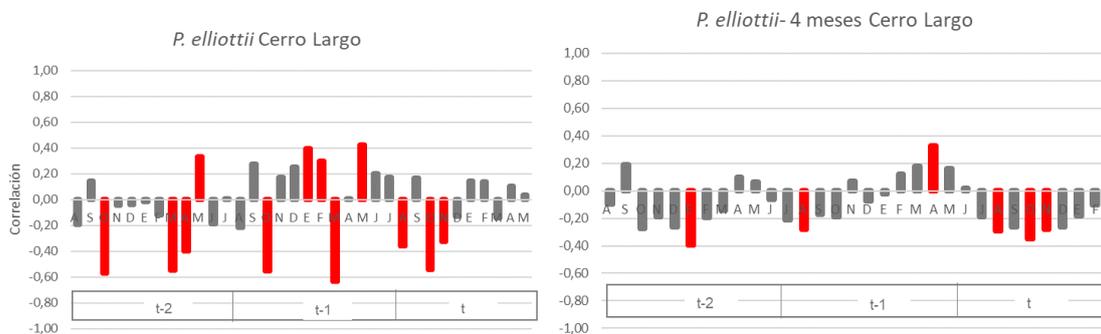


Figura 33. Respuesta a la temperatura media para meses individuales y cuatro meses de *P. Elliottii* en Cerro Largo.

La respuesta a la temperatura mínima, es negativa en octubre ($r=-0,57$) y marzo ($r=-0,52$) y positiva en mayo ($r=0,46$) en t-2, negativa en octubre ($r=-0,62$) y marzo ($r=-0,44$) y positiva en mayo ($r=0,40$) en t-1. En t responde también de forma negativa en octubre ($r=-0,54$) y positivamente en mayo ($r=0,40$) (Figura 34).

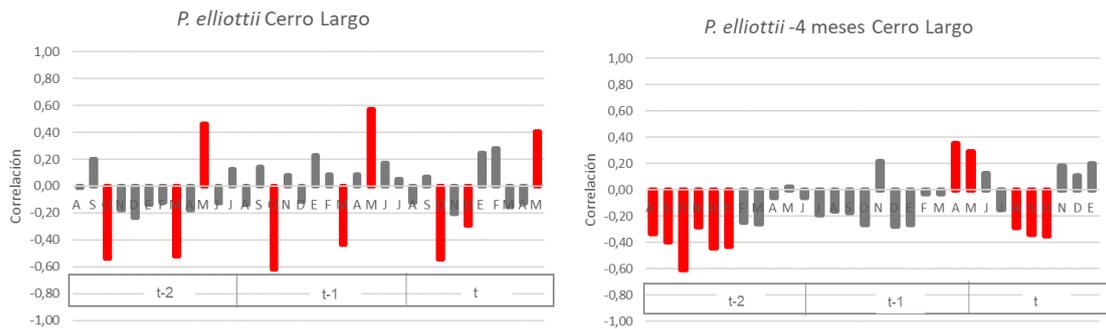


Figura 34. Respuesta a la temperatura mínima para meses individuales y cuatro meses de *P. elliottii* en Cerro Largo.

A partir de esto se puede decir que *P. elliottii* en Cerro Largo aumenta su crecimiento con primaveras lluviosas y frescas, y lo disminuye ante la ocurrencia de veranos muy cálidos. Es importante la correlación positiva con la precipitación de enero de dos años precedentes hasta el año actual (figura 31). Existe una correlación positiva con la temperatura mínima de mayo tanto del año actual como de los dos años precedentes (figura 34). Es probable que en los meses de mayo con ausencia de heladas tempranas el crecimiento se vea favorecido.

En cuanto a *P. elliottii* en Rivera responde de forma positiva a la precipitación de primavera centrada en setiembre ($r=0,33$) y de marzo ($r=0,40$) en t-2, de noviembre ($r=0,46$), marzo ($r=0,31$) y abril ($r=0,60$) en t-1 y de noviembre ($r=0,33$) y abril ($r=0,37$) en t (figura 35).

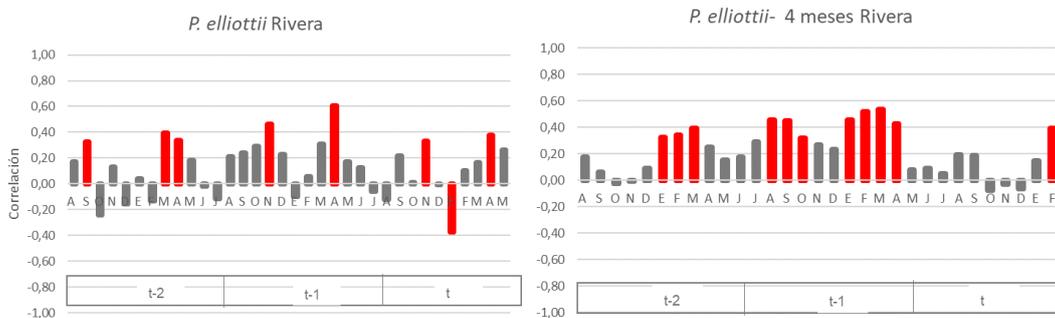


Figura 35. Respuesta a la precipitación para meses individuales y cuatro meses de *P. elliottii* en Rivera.

A su vez, responde positivamente a la temperatura media máxima de octubre del año corriente ($r=0,44$) (Figura 36).

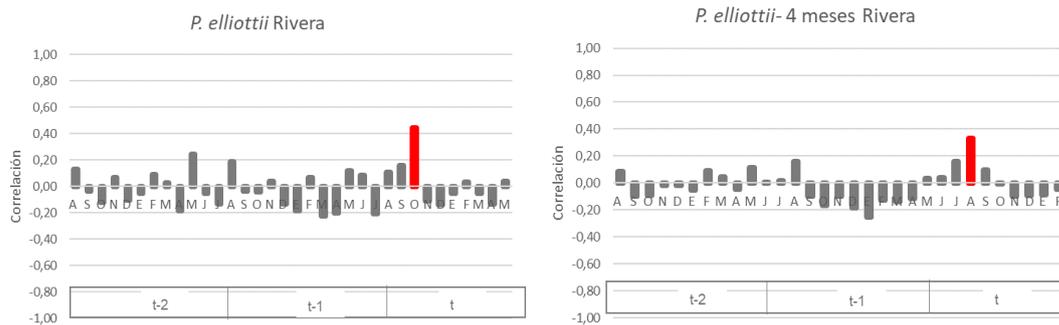


Figura 36. Respuesta a la temperatura máxima para meses individuales y cuatro meses de *P. Elliottii* en Rivera.

En t-2, responde positivamente a la temperatura media de agosto ($r=0,43$) y febrero ($r=0,33$) y negativamente a la de setiembre ($r=-0,34$). En t-1 responde negativamente a la temperatura media en los meses de enero ($r=-0,38$) y julio ($r=-0,30$). En t, responde positivamente en octubre ($r=0,36$) y de forma negativa en noviembre ($r=-0,42$) y diciembre ($r=-0,30$) (Figura 37).

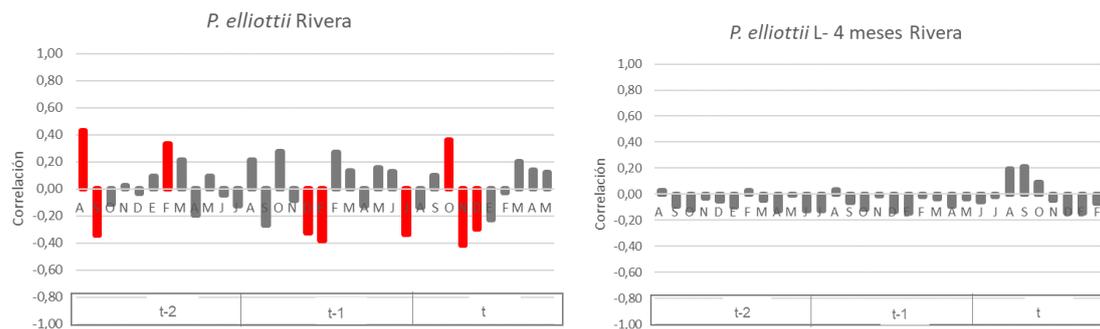


Figura 37. Respuesta a la temperatura media para meses individuales y cuatro meses de *P. Elliottii* en Rivera.

En t-2 responde positivamente a la temperatura mínima de febrero ($r=0,31$), negativamente en julio ($r=-0,30$) de t-1, y positivamente en mayo ($r=0,25$) del año corriente t (Figura 38).

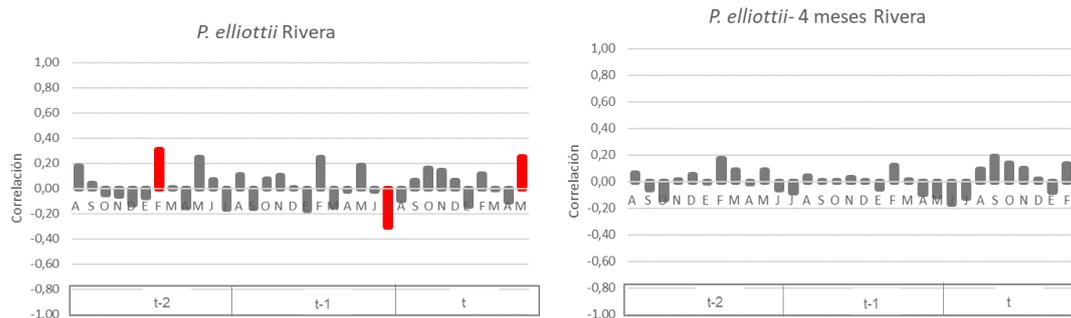


Figura 38. Respuesta a la temperatura mínima para meses individuales y cuatro meses de *P. elliottii* en Rivera.

En general, se puede decir que *P. elliottii* en Rivera, ve favorecido su crecimiento ante la ocurrencia de primaveras y otoños lluviosos, con una correlación bien marcada con la precipitación de los meses de marzo y abril en el año corriente y los dos años precedentes. Asimismo, se ve favorecido cuando se dan primaveras cálidas.

3.4.2 *Pinus taeda*

Por otra parte, respecto al comportamiento de *P. taeda*, se puede decir que la respuesta también varía entre los departamentos de Rivera y Cerro Largo a pesar de que se encuentran a 175 kilómetros de distancia y 35 metros de diferencia en altitud, pero, en el caso de los árboles de *P. taeda* de Rivera resulta, en algunos casos, muy difícil poder interpretar la respuesta de los mismos frente a las distintas variables climáticas, dado que se encuentran muy enmascarados por el manejo silvicultural intensivo realizado por ambas empresas. A su vez, dentro de cada departamento, la especie se comporta diferente, observándose una clara influencia del sitio en Cerro Largo, donde uno de los rodales se encuentra en una zona baja, y otro en ladera media.

Respecto a la precipitación, *P. taeda 1* de Cerro Largo, responde negativamente ($r=-0,32$) en el mes de junio del año precedente y cuando se trata de agrupación de cuatro meses, se ve que responde negativamente a la precipitación de otoño ($r=-0,32$) en t-2 y también negativamente a la de otoño en t-1 ($r=-0,32$) (Figura 39).

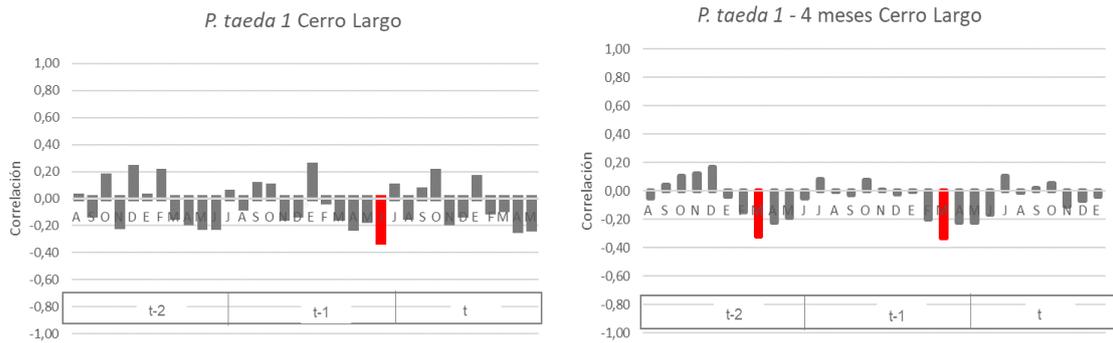


Figura 39. Respuesta a la precipitación para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda 1* en Cerro Largo.

Por otra parte, responde negativamente ($r=-0,34$) a la temperatura máxima de enero de dos años precedentes, de forma positiva ($r=0,31$) en Julio de un año precedente, negativamente ($r=-0,34$) a la temperatura máxima de marzo y positivamente ($r=0,50$) a la de setiembre en el año corriente. Cuando se trata de agrupaciones de cuatro meses, se observa que responde positivamente a la temperatura máxima de invierno ($r=0,51$) y primavera ($r=0,30$) en t-1, y negativamente a la temperatura máxima de verano ($r=-0,30$) (Figura 40).

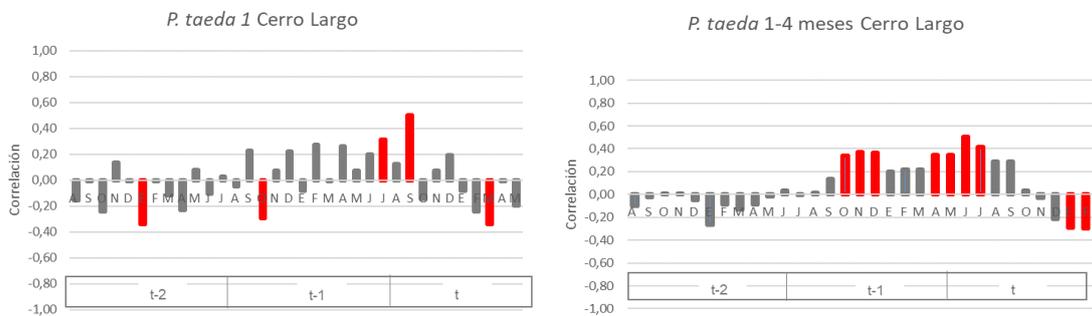


Figura 40. Respuesta a la temperatura máxima para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda 1* en Cerro Largo.

Relacionado a la variable de temperatura media, *P. taeda 1* de Cerro Largo, en t-2, responde negativamente en otoño ($r=-0,38$), también negativamente en octubre ($r=-0,43$) en t-1, positivamente ($r=0,33$) en febrero de t-1, y negativamente en octubre ($r=-0,33$) en el año corriente. Al tratarse de la influencia de cuatro meses consecutivos, se observa que responde positivamente ($r=0,36$) a la temperatura media de primavera en t-2, positivamente en primavera ($r=0,44$) en t-1, y también positivamente en primavera ($r=0,35$) en t (Figura 41).

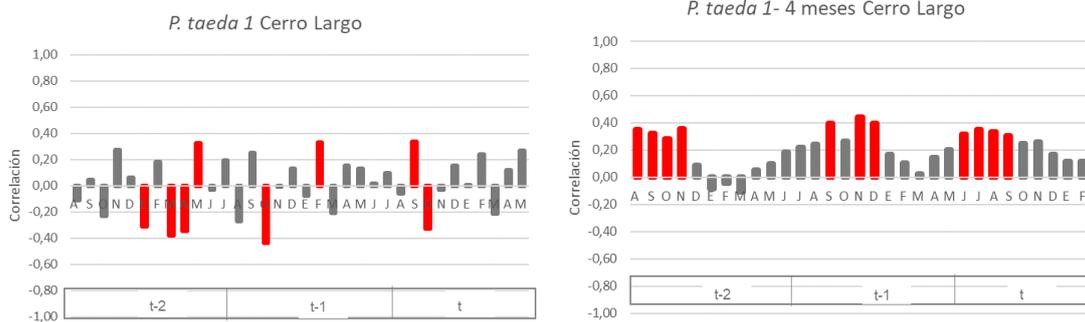


Figura 41. Respuesta a la temperatura media para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda 1* en Cerro Largo.

A su vez, responde negativamente ($r=-0,30$) a la temperatura mínima de marzo en t-2, y positivamente ($r=0,32$) a la de setiembre en el año corriente t. En la respuesta de cuatro meses consecutivos, se observa una respuesta positiva a la temperatura mínima de primavera ($r=0,32$) de dos años precedentes, y a la de invierno ($r=0,31$) en el año t (Figura 42).

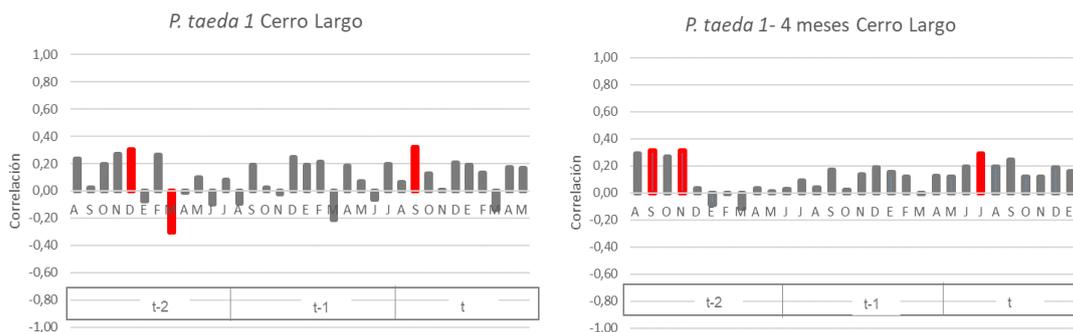


Figura 42. Respuesta a la temperatura mínima para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda 1* en Cerro Largo.

Se puede decir entonces, que *P. taeda 1* de Cerro Largo, ve afectado de forma negativa su crecimiento ante la ocurrencia de otoños lluviosos en los dos años precedentes, mientras que se ve favorecido cuando se dan inviernos y primaveras cálidos. Una hipótesis factible ante la respuesta negativa a las precipitaciones de otoño puede ser que dado que el rodal está instalado en una zona baja donde la acumulación de agua en el perfil es probable que genere hipoxia radical si se satura el suelo por varios días, esto implica que es muy importante el efecto micrositio en la selección de los rodales para armar las cronologías.

Por otro lado, *P. taeda* 2 de Cerro Largo, que se encuentra sobre una posición media de la ladera, se observa que responde positivamente a la precipitación de diciembre ($r=0,37$) y marzo ($r=0,43$) en t-2, también positivamente en diciembre ($r=0,45$) y marzo ($r=0,58$) en t-1, y de igual manera en el año corriente t, donde presenta una correlación de 0,31 en diciembre, y 0,33 en marzo. En cuatro meses consecutivos, también se observa una correlación positiva a la precipitación de otoño en t-2 ($r=0,45$), en t-1 ($r=0,38$) y en t ($r=0,30$) (Figura 43).

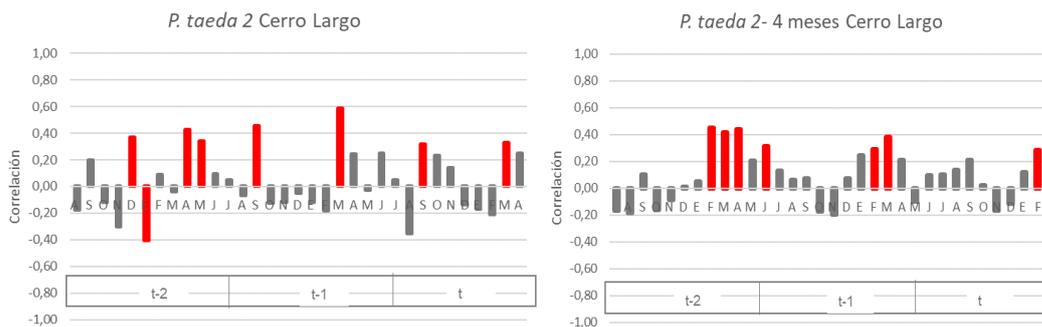


Figura 43. Respuesta a la precipitación para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda* 2 en Cerro Largo.

Relacionado a la temperatura media máxima, responde negativamente en setiembre ($r=-0,51$) en t-2, también negativamente en setiembre ($r=-0,33$) y marzo ($r=-0,48$) en t-1, y en marzo ($r=-0,31$) en el año t. Respecto al efecto de cuatro meses sobre el crecimiento, se ve una correlación negativa en los meses de marzo ($r=-0,34$) y julio ($r=-0,35$) en t-2, y también negativa ($r=-0,33$) en enero de t-1 (Figura 44).

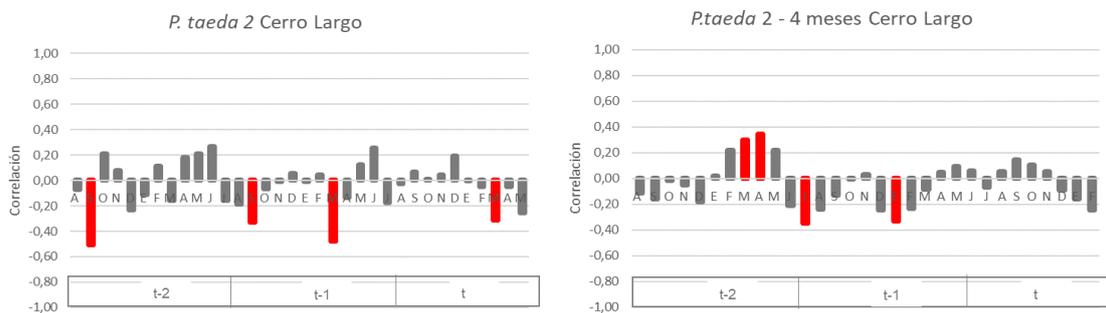


Figura 44. Respuesta a la temperatura máxima para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda* 2 en Cerro Largo.

Responde, además, positivamente a la temperatura media de invierno ($r=0,39$) de t-2, negativamente en septiembre ($r=-0,30$) y noviembre ($r=-0,40$) de t-1, positivamente en el mismo año en los meses de marzo ($r=0,40$) y julio ($r=0,33$), y positivamente en agosto ($r=0,46$) y octubre ($r=0,31$) en el año t. En grupos de cuatro meses, responde positivamente a la precipitación media de verano ($r=0,40$) en t-1, e invierno ($r=0,45$) en t (Figura 45).

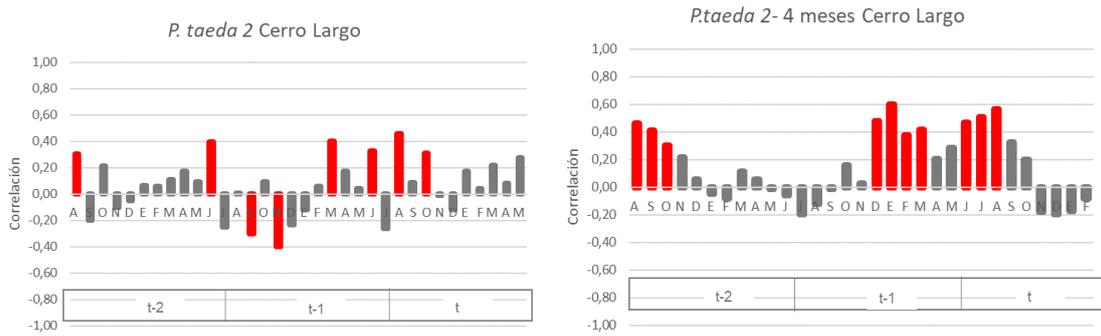


Figura 45. Respuesta a la temperatura media para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda 2* en Cerro Largo.

Frente a la temperatura mínima, se observa que *P. taeda 2*, responde positivamente en los meses de octubre ($r=0,34$) y junio ($r=0,34$) en t-2, positivamente en marzo ($r=0,47$), abril ($r=0,33$) y junio ($r=0,34$) en t-1, y positivamente en octubre ($r=0,49$) en el año corriente. Por otra parte, frente a la temperatura media de cuatro meses continuos, se ve una correlación positiva en el verano ($r=0,58$) de t-1, y en el invierno ($r=0,39$) del año t (Figura 46).

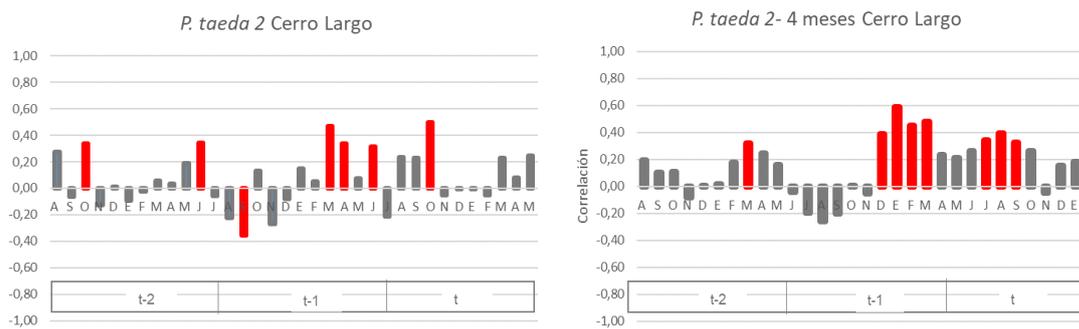


Figura 46. Respuesta a la temperatura mínima para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda 2* en Cerro Largo.

En general, se puede decir entonces, que los árboles de *P. taeda* 2 en Cerro Largo, ven favorecido su crecimiento frente a otoños y primaveras lluviosas y cálidas y ante la ocurrencia de inviernos con temperaturas mínimas más elevadas.

La respuesta a la precipitación de *P. taeda* L de Rivera (Figura 47), resulta difícil de visualizar e interpretar, lo que puede estar dado por la respuesta fuerte frente al manejo silvicultural.

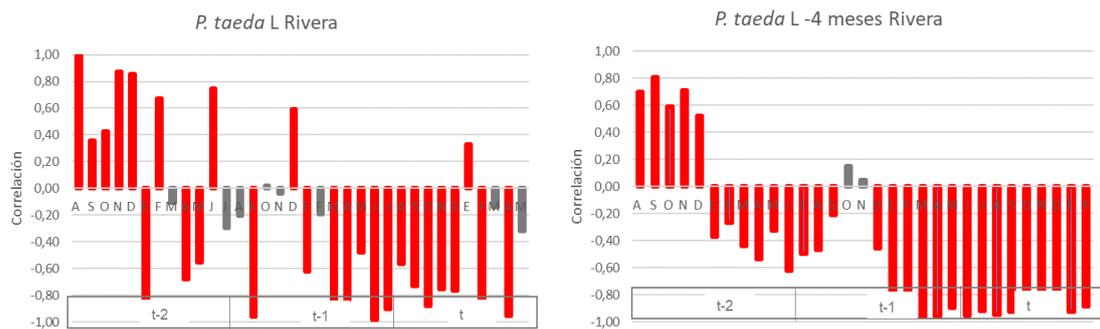


Figura 47. Respuesta a la precipitación para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda* L en Rivera.

En cuanto a la temperatura media máxima responde negativamente ($r=-0,35$) en febrero y marzo ($r=-0,36$) de t-2, y también negativamente en julio ($r=-0,37$). Cuando se trata de cuatro meses consecutivos se observa una respuesta positiva a la temperatura máxima de un año precedente de primavera ($r=0,37$) y otoño-invierno ($r=0,57$) (Figura 48).

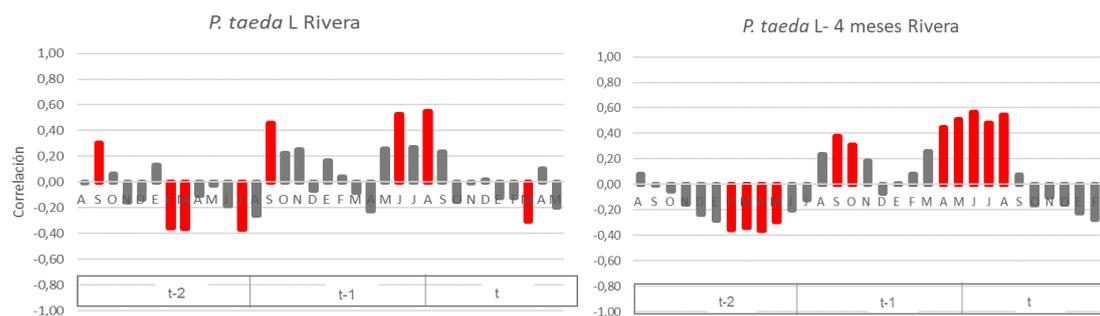


Figura 48. Respuesta a la temperatura máxima para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda* L en Rivera.

Frente a la temperatura media se ven correlaciones significativas negativas en marzo ($r=-0,38$) y julio ($r=-0,35$) de t-2, marzo ($r=-0,47$) de t-1, por otra parte en agosto del año corriente se ve una

correlación significativa positiva de 0,39. En cuatro meses agrupados se ve una correlación negativa de -0,39 frente a la temperatura media de verano en un año precedente, mientras que el otoño de ese año posee una correlación positiva ($r=0,39$).

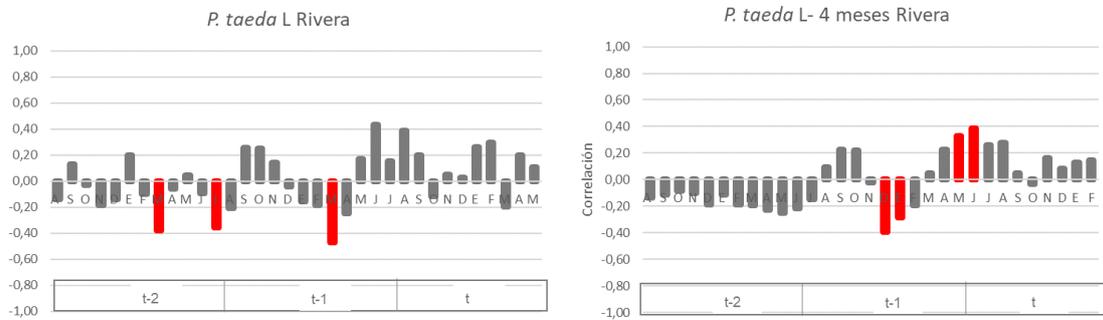


Figura 49. Respuesta a la temperatura media para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda L* en Rivera.

Relacionado a la temperatura mínima, se ve una respuesta positiva en diciembre ($r=0,33$) y negativa en julio ($r=-0,33$) de t-2, también negativa en enero ($r=-0,33$) y marzo ($r=-0,34$) de t-1, positiva en agosto ($r=0,35$) y negativa en marzo ($r=-0,59$) en el año t. En grupos de cuatro meses, se ve una respuesta negativa ($r=-0,35$) a la temperatura mínima de invierno de t-2 y negativa en verano ($r=-0,62$) de t-1 (Figura 50).

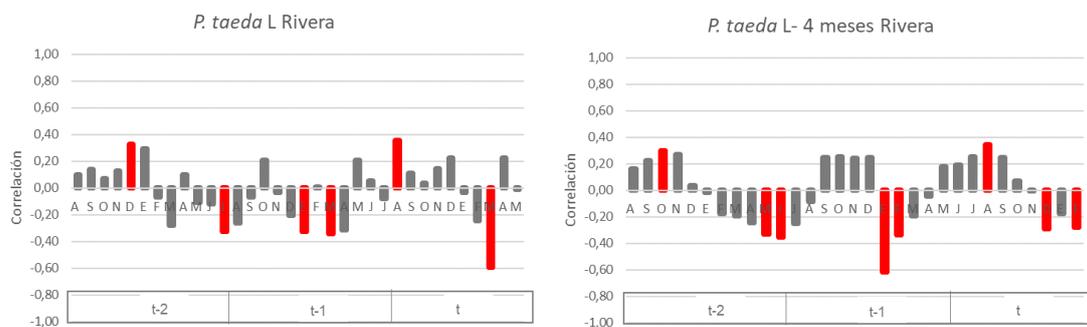


Figura 50. Respuesta a la temperatura mínima para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda L* en Rivera.

Por lo que, en general, *P. taeda L* de Rivera, responde positivamente a los otoños e inviernos donde las temperaturas mínimas no son tan extremas, es decir, que su crecimiento se ve desfavorecido con otoños e inviernos muy fríos, y ante la ocurrencia de veranos muy cálidos.

P. taeda F de Rivera, muestra una respuesta negativa a las primaveras lluviosas ($r=-0,68$) de dos años precedentes, y positiva a la de enero ($r=0,36$). En t-1, también se observa una correlación negativa con la precipitación de primavera ($r=-0,62$) y positiva con la de enero ($r=0,47$). Frente a la precipitación del año corriente t, presenta una respuesta positiva de 0,57 a la precipitación de febrero, y a la de mayo ($r=0,37$). En cuatro meses consecutivos, se ve una respuesta negativa alta a la precipitación de primavera de t-2 ($r=-0,71$), y también a la de t-1 ($r=-0,51$) (Figura 51).

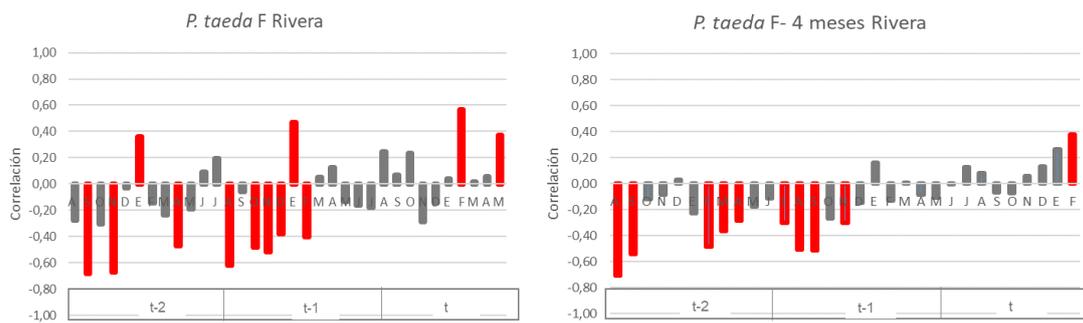


Figura 51. Respuesta a la precipitación para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda* F en Rivera.

La respuesta a la temperatura máxima es positiva ($r=0,35$) en diciembre y negativa en julio ($r=-0,39$) en t-2, mientras que en t-1 se ve una respuesta negativa en abril ($r=-0,31$). En el año t, se ve una respuesta positiva a la temperatura media máxima de agosto ($r=0,33$) y negativa a la de marzo ($r=-0,36$). En cuatro meses agrupados, se ve una respuesta negativa significativa a la temperatura media máxima de primavera tanto de t-2 ($r=0,40$), como de t-1 ($r=0,30$), y una negativa a la de otoño ($r=-0,33$) de dos años precedentes (Figura 52).

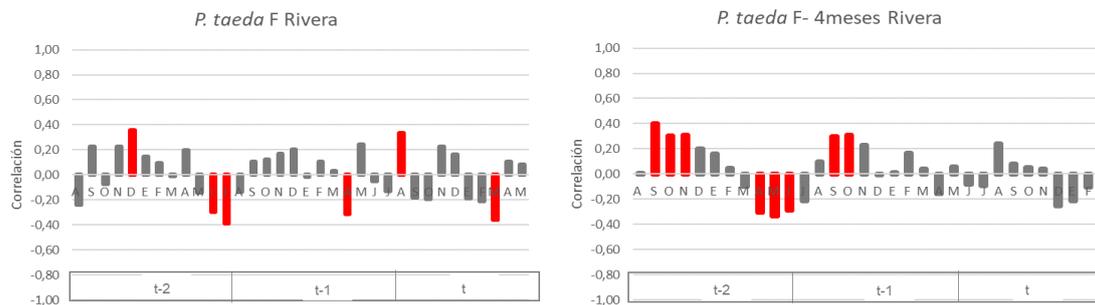


Figura 52. Respuesta a la temperatura máxima para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda* F en Rivera.

Frente a la temperatura media de agosto ($r=-0,57$), octubre ($r=-0,32$), marzo ($r=-0,40$) y mayo ($r=-0,51$) de t-2 se ve una respuesta negativa, al igual que los meses de enero ($r=-0,40$) y abril ($r=-$

0,51) de t-1. Considerando grupos de meses, se ve una respuesta negativa a la temperatura media de primavera ($r=-0,55$) de t-2, y de otoño de t-2 ($r=-0,61$) y otoño de t-1 ($r=-0,42$) (Figura 53).

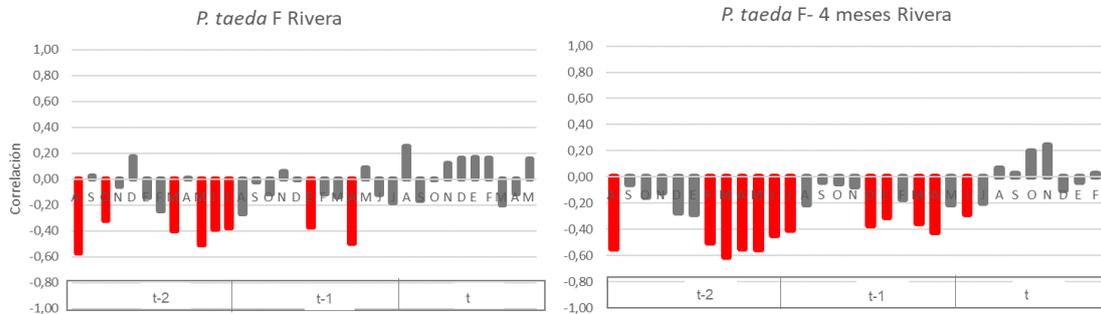


Figura 53. Respuesta a la temperatura media para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda F* en Rivera.

La respuesta a la temperatura mínima para meses individuales es negativa para agosto ($r=-0,30$) y mayo ($r=-0,43$), y positiva para diciembre y enero ($r=0,41$) de t-2. Respecto a la de t-1, la respuesta es positiva en los meses de noviembre ($r=0,31$) y febrero ($r=0,31$) y negativa en abril ($r=-0,41$). Frente a la del año corriente, se ve una correlación positiva con la de diciembre ($r=0,38$), y negativa con la de marzo ($r=-0,34$). En meses agrupados, se puede ver una respuesta negativa a la temperatura media mínima de verano y otoño de t-2 ($r=-0,51$) y también negativa a la de otoño ($r=-0,40$) de t-1, y por otra parte se observa una respuesta positiva a la mínima de primavera con una correlación de 0,52 en t-2 y 0,40 en t-1 (Figura 54).

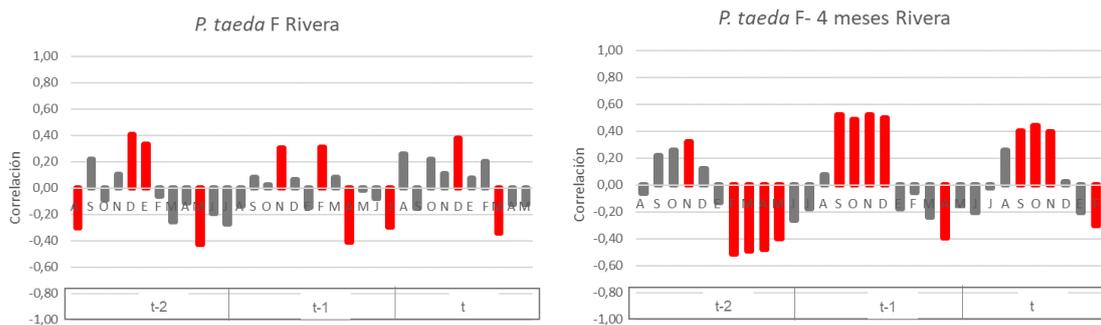


Figura 54. Respuesta a la temperatura mínima para meses individuales y cuatro meses de *P. taeda F* en Rivera.

En general, se observa entonces, que *P. taeda F* de Rivera, responde de forma positiva a la ocurrencia de veranos lluviosos y de forma negativa a primaveras lluviosas de dos y un año

precedente. En cuanto a la temperatura, se nota que responde positivamente a la ocurrencia de primaveras relativamente cálidas, y ve desfavorecido su crecimiento cuando los otoños son fríos.

En definitiva, se ven diferencias y algunas similitudes entre el comportamiento de las especies y los sitios. *P. elliottii* se ve favorecido con primaveras lluviosas en ambos sitios, sin embargo, se comportan diferente ante las temperaturas máximas y mínimas en cada departamento, mientras que en Cerro Largo presenta un aumento del crecimiento cuando las primaveras son frescas, en Rivera el crecimiento aumenta cuando se dan primaveras más cálidas. En cuanto a *P. taeda*, en ambos sitios se ve desfavorecido cuando los otoños e inviernos son muy fríos, pero dentro de un mismo sitio varía la respuesta frente a las precipitaciones, por ejemplo, *P. taeda* 1 de Cerro Largo disminuye su crecimiento ante primaveras muy lluviosas sin embargo *P. taeda* 2 se ve favorecido, por lo que aquí se puede ver un claro efecto del sitio y de las condiciones topográficas sobre el crecimiento, dado que *P. taeda* 1 se encuentra en una posición de ladera baja, por lo que puede verse expuesto a condiciones de suelos con mayor contenido de humedad e incluso anegamiento en casos donde la precipitación supera los valores normales.

3.5 CORRELACIONES CON ENOS

Según Barreiro et al [60], en otoño (marzo-abril-mayo: MAM) mientras que en el norte del país las lluvias medias aumentan durante años Niño, comparados con los neutros y con años La Niña, la amplitud de la distribución no cambia lo cual marca una gran variabilidad en la respuesta del clima sobre Uruguay a ENOS. En el sur del país, en cambio, la señal más notable es la disminución de la varianza en las lluvias trimestrales durante La Niña, comparado con años neutros y años El Niño.

Dado que según los resultados arrojados en este trabajo por el análisis RESPO donde la precipitación genera respuestas con correlaciones significativas en tres periodos, t-2, t-1 y t, generando a su vez respuestas diferenciales de las especies entre Cerro Largo y Rivera. En las figuras 55 a 60 se presentan los efectos del ENOS para las dos especies y para las dos localidades.

Al correlacionarse los índices de ENOS con las cronologías se pudo observar una respuesta diferencial a la ocurrencia de este fenómeno. Para la cronología ARSTAN de *P. elliottii* de Cerro Largo no se vio ninguna correlación significativa con ENOS. Sin embargo, *P. elliottii* de Rivera presentó una correlación significativa positiva ($r=0,31$) en el período comprendido entre los meses de noviembre y mayo del año corriente como se puede ver en la figura 55.

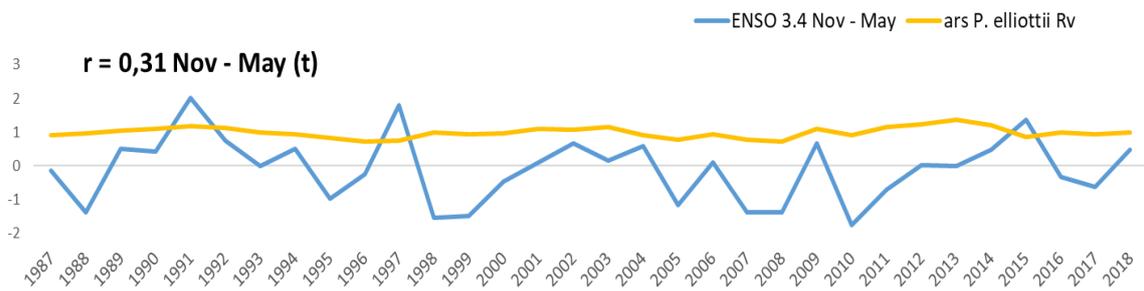


Figura 55. Correlación de cronología ARSTAN de *P. elliottii* de Rivera con ENOS.

Por otra parte, *P. taeda* L de Rivera presentó correlaciones significativas positivas y negativas, siendo positiva ($r=0,33$) para el período comprendido entre marzo de dos años precedentes (t-2) a enero del año precedente (t-1) (figura 56) y negativa ($r=-0,86$) para el período entre noviembre del año precedente (t-1) a mayo del año actual (t) (figura 57).

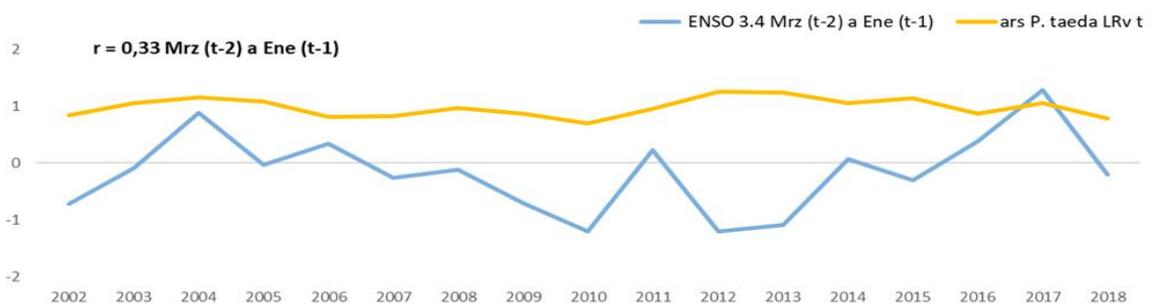


Figura 56. Correlación de segmentos de la cronología ARSTAN de *P. taeda* L de Rivera con ENOS.

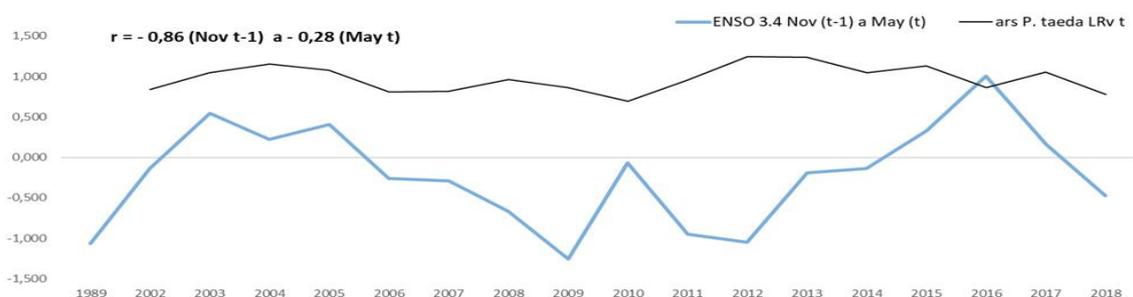


Figura 57. Correlación de segmentos de la cronología ARSTAN de *P. taeda* L de Rivera con ENOS.

En el caso de *P. taeda* F de Rivera se observa una correlación significativa negativa de -0,31 para el período comprendido entre septiembre y junio de t-1 (figura 58).

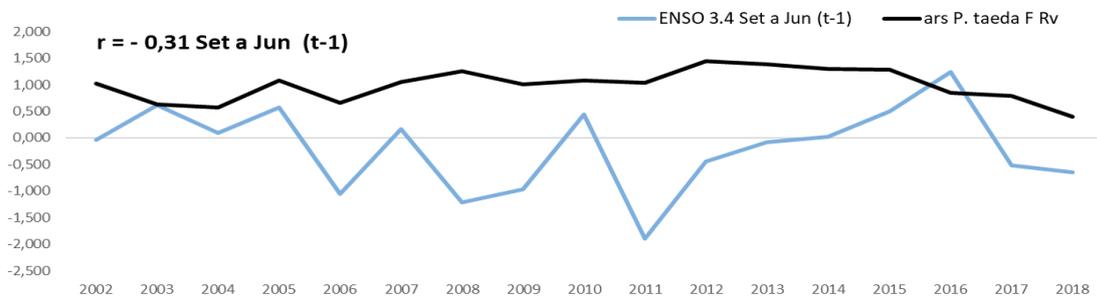


Figura 58. Correlación de cronología ARSTAN de *P. taeda* F de Rivera con ENOS.

Por otro lado, *P. taeda* de Cerro Largo poseen correlaciones significativas negativas, donde *P. taeda* 1 presenta una correlación de -0,31 para el período de septiembre a junio del año precedente (t-1) (figura 59) y *P. taeda* 2 una de -0,28 para el período de noviembre a julio del año precedente (t-1) (figura 60).

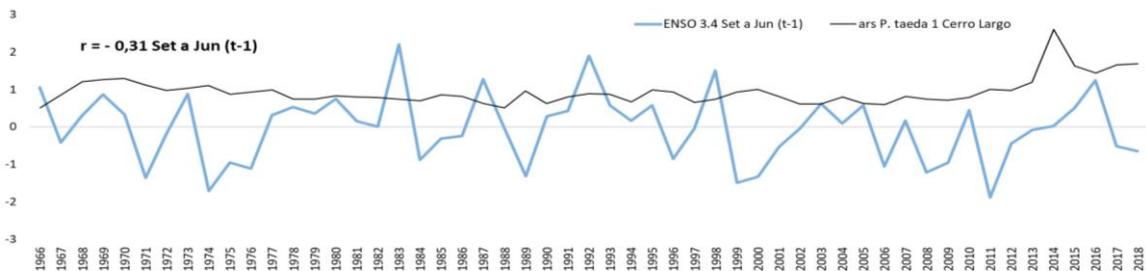


Figura 59. Correlación de cronología ARSTAN de *P. taeda* 1 de Cerro Largo con ENOS.

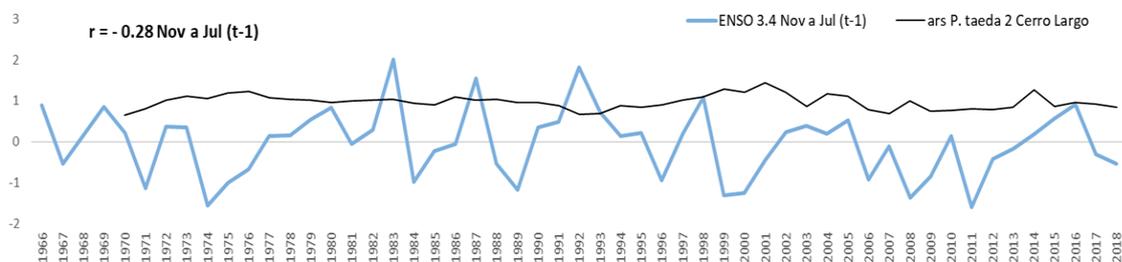


Figura 60. Correlación de cronología ARSTAN de *P. taeda* 2 de Cerro Largo con ENOS.

Los resultados en general muestran efectos negativos a las variaciones del ENOS sobre las anomalías de crecimiento de *P. taeda* en CL, mientras que para Rivera las respuestas son en general positivas.

Para el caso de *P. elliottii* no hubo correlación entre las anomalías de crecimiento y del ENOS en CL, mientras que en Rivera las correlaciones fueron positivas. Confirmando por otro lado, que desde el punto de vista climático que el ENOS se expresa distinto dentro del territorio uruguayo y que, por otra parte, el crecimiento de las especies estudiadas se ve afectado de manera diferencial según la localidad, ya que el ENOS se expresa distinto como ya se ha mencionado, siendo importante fundamentalmente en el caso de *P taeda* y algo menor para *P. elliottii*.

3.6 Análisis de componentes principales de variables ambientales

El análisis de componentes principales (PCA) o análisis factorial realizado en esta oportunidad objetivó mostrar relaciones interesantes que no son obvias cuando las variables fueron analizadas en forma independiente como por ejemplo en el análisis arrojado por la RESPO o aún en una matriz de correlación.

3.6.1 PCA Cerro Largo

Recordando que el análisis de PCA se realizó para cada sitio con todas las variables ambientales excluyendo a las cronologías, se obtuvieron las componentes principales que agrupan la mayor variabilidad, obteniendo un porcentaje acumulado que explica la varianza de las mismas de 51.9% hasta la componente principal 4 (PC4) (Figuras 61 y 62).

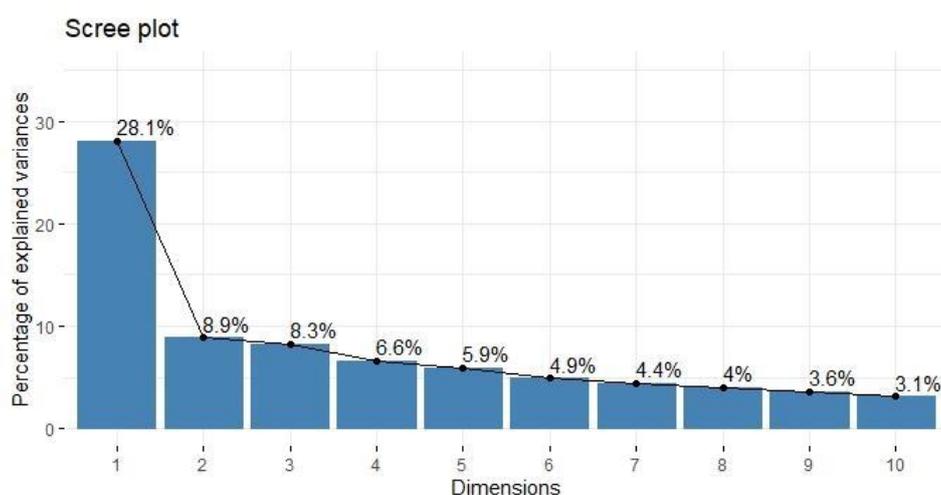


Figura 61. Componentes principales para Cerro Largo y aporte porcentual de cada variable

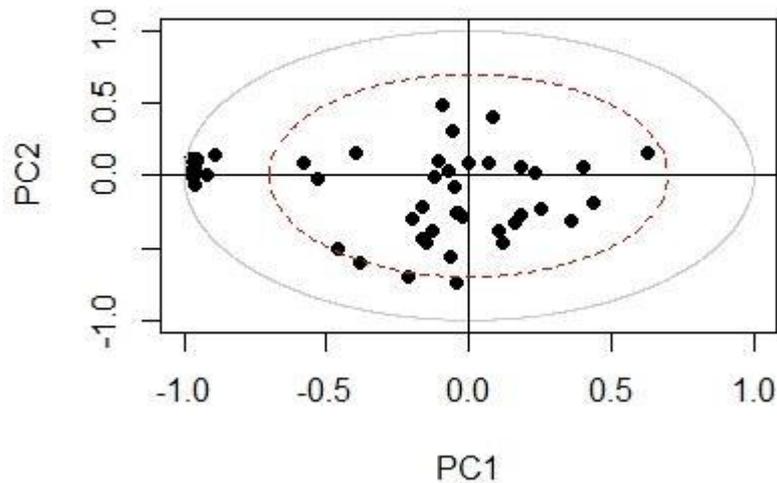


Figura 62. Correlaciones mayores a 0.7 de los componentes principales 1 y 2 para Cerro Largo, representados por aquellos puntos que quedan por fuera del óvalo punteado

Para Cerro Largo según se muestra en la tabla 9, se observa que los componentes principales no incorporan a las variables de precipitación, a excepción de febrero que aparece en la PC4 con un alto valor de correlación y de forma positiva.

La mayor parte de la variabilidad de las 52 variables utilizadas está en la componente principal 1 (PC1) y con alta relevancia de las temperaturas máximas de todos los meses con valores muy altos y negativos (-0.89 a -0.975); por otra parte las temperaturas mínimas explican en forma importante la varianza y están representadas en todas las PCA relevantes, en la PC1 presenta valores de -0.56 para el mes de marzo y de 0.63 para el mes de mayo; en las demás componentes varía, siendo negativa para el mes de octubre en la PC2 con -0.5; también negativa en PC3 para abril y junio con valores de -0.5 y -0.6, respectivamente y en la PC4 la temperatura media mínima se correlaciona en forma positiva para los meses de enero (0.64) y febrero (0.54), pero en forma negativa para el mes de diciembre con -0.54. Finalmente, la temperatura media sigue una tendencia muy similar a la de las temperaturas medias mínimas, fundamentalmente en lo que respecta a las componentes PCA1, PCA2 y PC3, estando ausente en la PCA4.

	pc1	pc2	pc3	pc4
PPM_02	-0.118044107	-0.010374903	-0.050047446	0.60320651
TMed_02	0.106612939	-0.383523286	-0.541250225	0.31472704
TMed_03	-0.533328642	-0.028077225	-0.273061847	-0.11884084
TMed_04	-0.109447134	0.098077299	-0.611394337	-0.08374394
TMed_06	0.001411175	0.083403319	-0.730124509	-0.19127073
TMed_08	-0.214802807	-0.695152237	-0.144186596	-0.24030937
TMed_10	-0.383739317	-0.595416712	-0.302562988	0.19040045
TMed_11	-0.042430297	-0.736498998	0.109973218	0.03513065
Tmax_01	-0.968994863	0.043904770	-0.004101219	0.07619699
Tmax_02	-0.972121666	0.037199566	-0.045414572	0.05062999
Tmax_03	-0.979165017	0.113009575	0.035829921	0.02064934
Tmax_04	-0.955749617	0.118868636	0.010427245	0.02389382
Tmax_05	-0.890382356	0.145463585	0.014134506	-0.12968907
Tmax_06	-0.952506565	0.100221293	-0.096005928	-0.01043035
Tmax_07	-0.919257399	0.006276819	0.034579580	0.12130362
Tmax_08	-0.959823418	-0.066076111	0.011294003	-0.03018360
Tmax_09	-0.963237106	0.038656097	-0.030502672	-0.02031551
Tmax_10	-0.975256358	0.022377967	0.014434470	0.10040763
Tmax_11	-0.967367801	-0.011275185	0.069010282	0.06820468
Tmax_12	-0.964701909	0.044564394	0.038899667	0.03903400
TMin_01	-0.046909126	-0.259154139	0.093780120	0.65466960
TMin_02	0.253015687	-0.225408502	-0.380102032	0.54132634
TMin_03	-0.579924238	0.085393264	-0.204010777	-0.03144656
TMin_04	-0.074942112	0.026889818	-0.576323761	0.03350990
TMin_05	0.630098281	0.161318296	-0.387463022	-0.26598618
TMin_06	-0.058971214	0.304590611	-0.684997448	-0.16923859
TMin_08	-0.065273807	-0.559105503	-0.049679950	-0.38894806
TMin_10	-0.462572056	-0.506891672	-0.146212785	-0.04609163
TMin_12	-0.164265767	-0.442073842	0.299376989	-0.53903802

Tabla 9. Variables incluidas dentro de cada componente principal para Cerro Largo

En definitiva, las variables de precipitación son las grandes ausentes como resultado de este análisis.

Por otra parte un resultado muy interesante de este análisis es la agrupación por fechas (años) donde se observa claramente dos grupos de variables (Figura 63), donde una vez identificadas las fechas que se agrupan en el óvalo verde de la figura de referencia se destaca que corresponde al período 1966-1979, lo cual desde el punto de vista climático se identifica como el “76 climatic jump” [61], de esta forma se identifica efectivamente este fenómeno en el sitio de Cerro Largo.

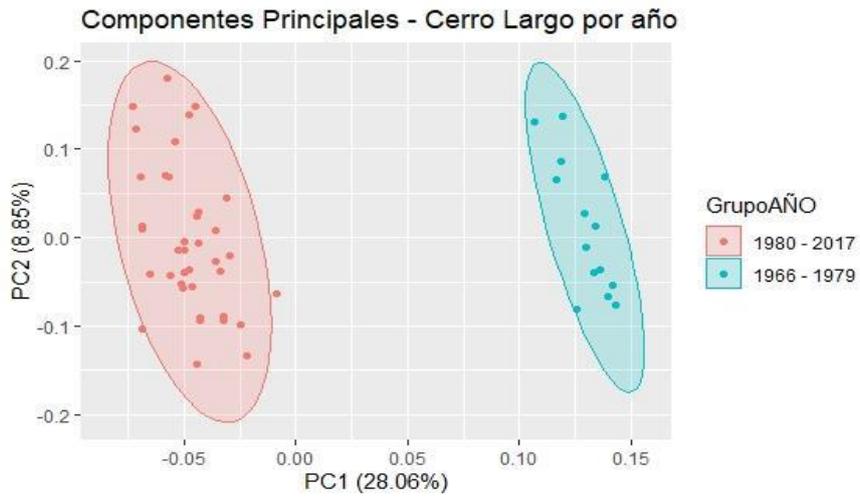


Figura 63. Observaciones agrupadas por años, según PC1 y PC2 para Cerro Largo.

3.6.2 PCA Rivera

Por otra parte, para el departamento de Rivera, se observa un porcentaje explicativo de la varianza de las variables estudiadas del 43% cuando se consideran las primeras 4 componentes principales (Figura 64).

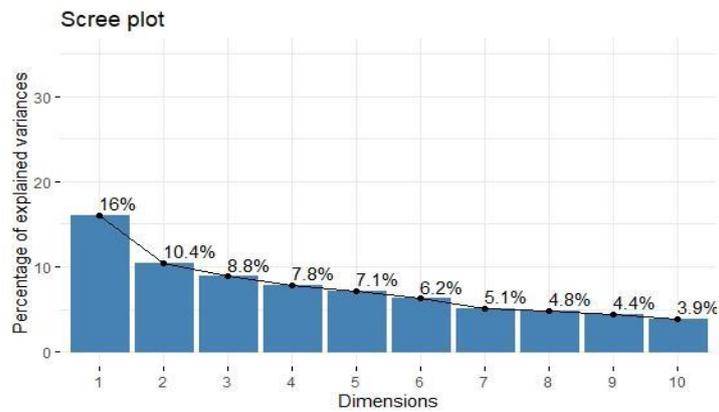


Figura 64. Componentes principales para Rivera y aporte porcentual de cada variable

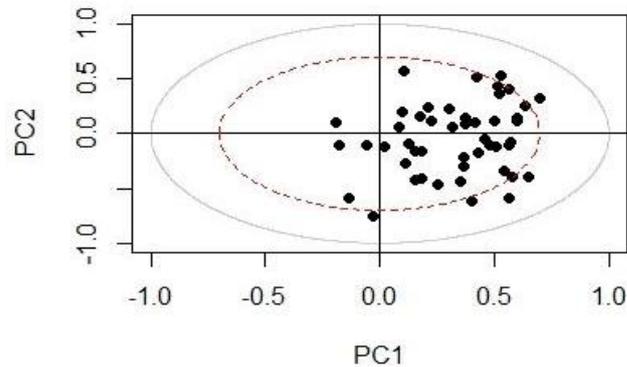


Figura 65. Correlaciones mayores a 0.7 de los componentes principales 1 y 2 para Rivera, representados por aquellos puntos que quedan por fuera del óvalo punteado

En este caso, como se observa en la tabla 10, la precipitación permanece ausente de las componentes que explican la mayor variabilidad, excepto por el mes de marzo ($r=0.55$) en PC3 y los meses de mayo y junio de la PC4 donde presentan correlaciones significativas negativas (-0.60 y -0.55, respectivamente).

La mayor variabilidad de las variables estudiadas está dada en la PC1 (16%), la cual está explicada por la temperatura media de los meses de enero a noviembre, a excepción del mes de julio. En estos meses las correlaciones varían de 0.51 a 0.69. A su vez se observan correlaciones significativas altas y positivas para la temperatura media mínima, por lo que se puede afirmar que la temperatura media se ve afectada por esta última variable. A su vez, la temperatura media presenta significancias altas negativas en PC3 para el mes de julio (-0.58) y PC4 en junio (-0.59), donde en la PC3 esta correlación se ve influenciada por la temperatura media máxima (-0.71), mientras que en la PC4 se explica por la correlación de la temperatura media mínima del mismo mes. En cuanto a la PC2, se observan significancias respecto a la temperatura máxima para los meses de marzo y mayo, con correlaciones de -0.58 y -0.75, y el mes de agosto con una correlación de -0.61 y diciembre con 0.57.

	pc1	pc2	pc3	pc4
PPM_03	0.31511327	0.06390975	0.55151665	-0.10888354
PPM_05	0.01783794	-0.11904169	-0.08428557	-0.60367158
PPM_06	-0.17701506	-0.10828326	0.14113857	-0.55639385
TMed_01	0.63723018	0.25915687	0.01273760	-0.17898358
TMed_02	0.56207937	0.40517561	-0.06224406	-0.14296540
TMed_04	0.51659912	0.42736108	0.22306963	-0.29834734
TMed_05	0.54488494	-0.34145546	-0.22723061	0.14386191
TMed_06	0.57290307	-0.07443231	-0.33782323	-0.59301821
TMed_07	0.37049502	0.14172502	-0.58785895	-0.05292186
TMed_08	0.64924910	-0.39805562	0.03737009	0.10446804
TMed_09	0.51827920	0.36617715	-0.24719132	0.07992514
TMed_10	0.69445787	0.32447631	0.33539934	0.11913404
TMed_11	0.60170035	0.14964624	0.02321360	0.37989382
TMed_12	0.41902694	0.51757189	-0.20236863	0.31717755
Tmax_03	-0.13600338	-0.58883324	-0.10152651	-0.19686418
Tmax_05	-0.03059339	-0.75448940	-0.17666693	0.39279186
Tmax_06	0.18437140	-0.40412492	-0.58623036	-0.31235409
Tmax_07	0.12714466	-0.08575836	-0.71821061	0.08923945
Tmax_08	0.39772724	-0.61472185	-0.06422835	0.24913472
Tmax_12	0.10627716	0.57333721	-0.40369960	0.31344362
TMin_01	0.50075436	0.11617854	0.13536817	-0.07750942
TMin_02	0.59856586	0.10972310	-0.17742604	0.06412098
TMin_04	0.52624084	0.53035550	0.37866918	-0.26344842
TMin_05	0.57910955	-0.39865518	-0.32554003	-0.08853359
TMin_06	0.42785663	-0.16910971	-0.40736499	-0.57581636
TMin_08	0.56519134	-0.59093254	0.12634932	0.01353472
TMin_10	0.56263018	-0.11122332	0.43170274	0.16115341
TMin_12	0.50681836	-0.11265770	0.04542541	0.55037290

Tabla 10. Variables incluidas dentro de cada componente principal para Rivera

Para Rivera hubo una mayor influencia de las rotaciones, donde las variables que explican la PC1 y PC2 presentan una mayor variabilidad respecto a lo ocurrido para Cerro Largo, esto a su vez se puede identificar por períodos de años que son comunes a ambas especies y observándose una variabilidad mayor para la rotación más longeva que corresponde a la rotación de crecimiento de *P. elliottii* (Figura 66). Esto, además, puede ser un indicador de una variabilidad climática interanual mayor, dado que se trata de períodos cortos de tiempo, donde la variación es ampliamente notoria.

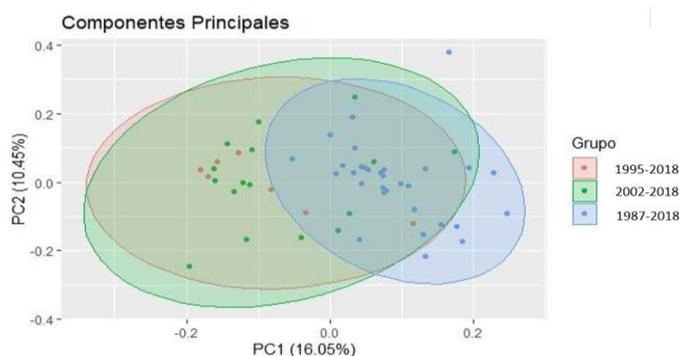


Figura 66. Observaciones agrupadas por años según PC1 y PC2, para Rivera

3.7 Before and After Control Impact (BACI)

El análisis de Before and After Control Impact (BACI) se analizó únicamente para las cronologías de Cerro Largo, donde se consideraron los períodos de tiempo identificados a partir del análisis de componentes principales (PCA), que se dividen en los períodos comprendidos entre 1966-1979 y 1980-2019. Este análisis fue imposible de realizar para el departamento de Rivera, dado que se trata de plantaciones que son posteriores al año 1980, y en consecuencia, plantaciones muy jóvenes que dificultan observar un cambio en el comportamiento de las variables climáticas y por tanto una respuesta de los árboles a estas variaciones.

P. elliotii de Cerro Largo presentó una respuesta alta significativa a la precipitación para el período 1966-1979, con correlaciones significativas altas a las precipitaciones de verano en t-2 ($r=0,48$), t-1 ($r=0,51$) y t ($r=0,92$), y correlaciones significativas negativas para los meses de primavera en t-2 ($r=-0,34$), t-1 ($r=-0,46$) y t ($r=-0,82$), mientras que la respuesta cambia para el período comprendido entre 1980 y 2019, notándose correlaciones significativas negativas en enero de t-2 ($r=-0,30$) y la primavera de t ($r=-0,31$) (figura 67).

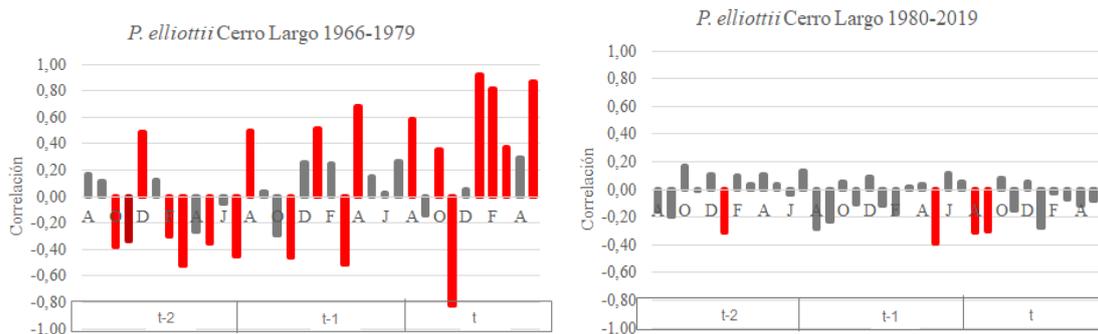


Figura 67. BACI (Before and after control impact) para precipitación de *P. elliotii* de Cerro Largo.

En cuanto a la temperatura media máxima, se ve una respuesta negativa significativa en la primavera centrada en el mes de octubre tanto en t-2, t-1 y t para el período 1966-1979 y correlaciones significativas en invierno de t-2 ($r=-0,49$) y t ($r=-0,52$), a su vez se ven correlaciones positivas con la temperatura máxima de verano para t-2 ($r=0,38$), t-1 ($r=0,52$) y t ($r=0,49$), mientras que para el período posterior a la fecha solo se ve una respuesta significativa negativa a la temperatura máxima de t-1 de enero ($r=-0,47$) (figura 68).

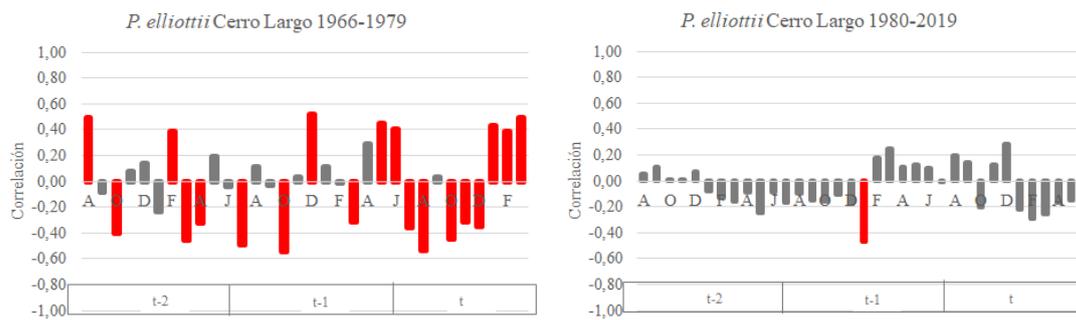


Figura 68. BACI (Before and after control impact) para temperatura máxima de *P. Elliottii* de Cerro Largo.

La respuesta a la temperatura media para el período 1966-1979 sigue el mismo patrón que la respuesta a la temperatura máxima, con respuestas significativas negativas en la primavera de t-2, t-1 y t, y positivas en los veranos de t-1 y t, mientras que para el período 1980-2019, la respuesta cambia para los veranos de t-1 y t con correlaciones significativas negativas ($r = -0,56$ y $r = -0,35$) (figura 69).

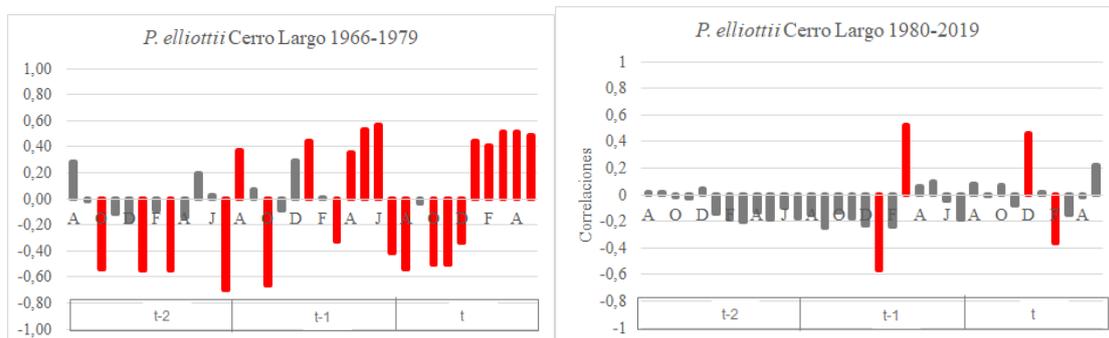


Figura 69. BACI (Before and after control impact) para temperatura media de *P. Elliottii* de Cerro Largo.

Frente a la temperatura mínima en el período 1966-1979 se ve una respuesta negativa alta en la primavera de t-2 ($r = -0,64$), t-1 ($r = -0,67$) y t ($r = -0,54$), negativa al verano de t-2 ($r = -0,62$) y positiva en t-1 ($r = 0,43$) y t ($r = 0,56$), además de una correlación negativa a la temperatura mínima de julio de t-2 ($r = -0,75$), pero por otra parte, en el período 1980-2019 sólo se ve una respuesta significativa negativa en los meses de febrero ($r = -0,46$) y julio ($r = -0,37$) de t-1 (figura 70).

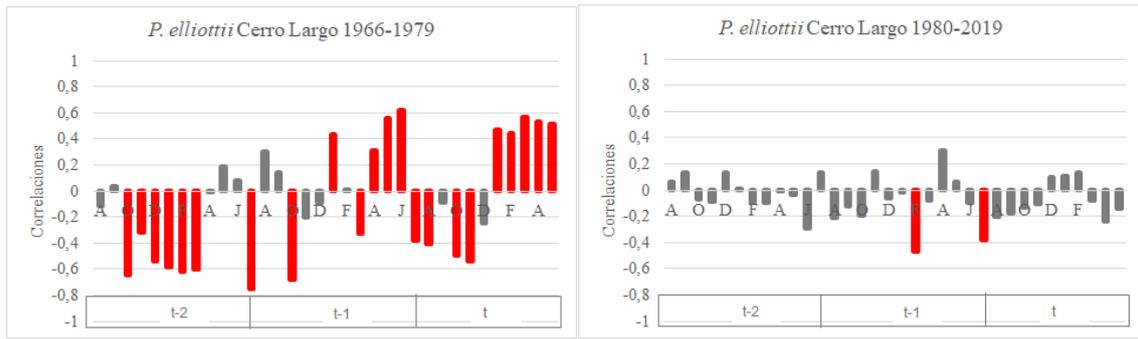


Figura 70. BACI (Before and after control impact) para temperatura mínima de *P. elliottii* de Cerro Largo.

Por otro lado, *P. taeda 1* presentó en el período 1979-1980 una respuesta significativa positiva a la precipitación de los veranos de t-1 ($r=0,35$) y t ($r=0,49$) y negativa a los meses de julio en t-2 ($r=-0,44$) y t-1 ($r=-0,30$). Sin embargo, en el período posterior al 1979 se ve una respuesta negativa en junio de t-2 ($r=-0,33$) y positiva en la primavera del año t ($r=0,30$) (figura 71). En este sentido, cabe la hipótesis de que al tener 14 años ya poseen un sistema radical de la raíz pivotante central que accede a la napa por lo que se vuelven más independientes del agua de lluvia.

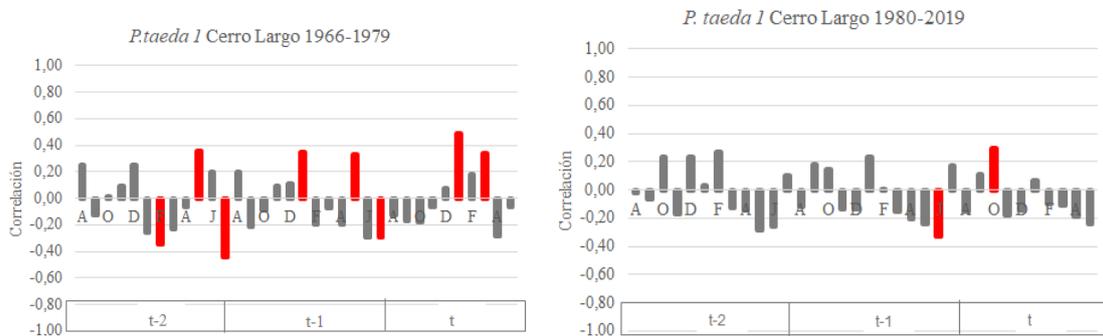


Figura 71. BACI (Before and after control impact) para precipitación de *P. taeda 1* de Cerro Largo.

Cuando se trata de la respuesta a la temperatura media máxima, para el período 1966-1979 se ve una respuesta significativa negativa para las primaveras de t-2 ($r=-0,43$) y t-1 ($r=-0,41$) y positiva en t ($r=0,40$), además de una correlación significativa positiva para el verano de t-2 ($r=0,58$), t-1 ($r=0,32$) y t ($r=0,32$), mientras que para el período a partir de 1980 se destaca sólo una respuesta positiva a los otoños de t-1 ($r=0,35$) y t ($r=0,50$), y la primavera del año corriente t ($r=0,37$) (figura 72).

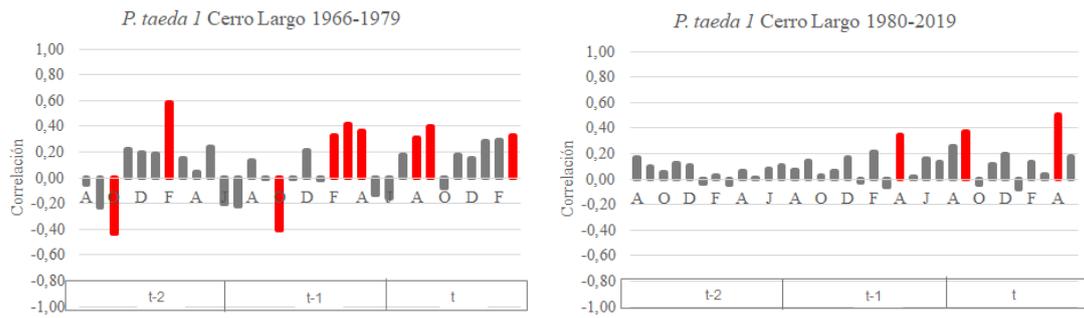


Figura 72. BACI (Before and after control impact) para temperatura máxima de *P. taeda I* de Cerro Largo.

Con relación a la temperatura media, para el primer período estudiado, se ve una respuesta significativa positiva en los meses de febrero de t-2 ($r=0,46$), t-1 ($r=0,47$) y t ($r=0,3$), positiva en la primavera de t-2 ($r=0,39$) pero negativa en t-1 ($r=-0,35$), pero sin embargo posteriormente a 1980, se observa tan solo una respuesta positiva a la temperatura media abril del año precedente ($r=0,41$) y negativa a julio de t-1 ($r=-0,35$) (figura 73).

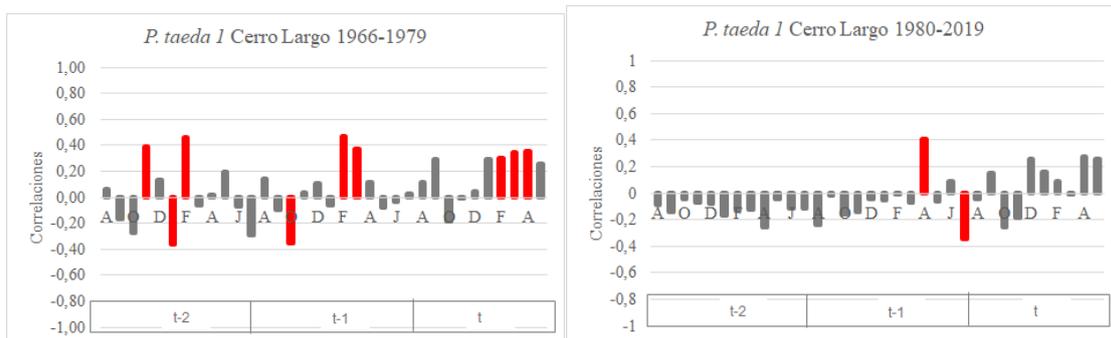


Figura 73. BACI (Before and after control impact) para temperatura media de *P. taeda I* de Cerro Largo.

La respuesta significativa a la temperatura media mínima se ve en los veranos de t-2 ($r=-0,57$), t-1 ($r=0,52$) y t ($r=0,39$) y la primavera de t-2 ($r=0,49$) para el período 1966-1979, y posterior a este se ve únicamente una correlación significativa positiva con la temperatura media mínima de setiembre ($r=0,33$) en el año corriente t (figura 74).

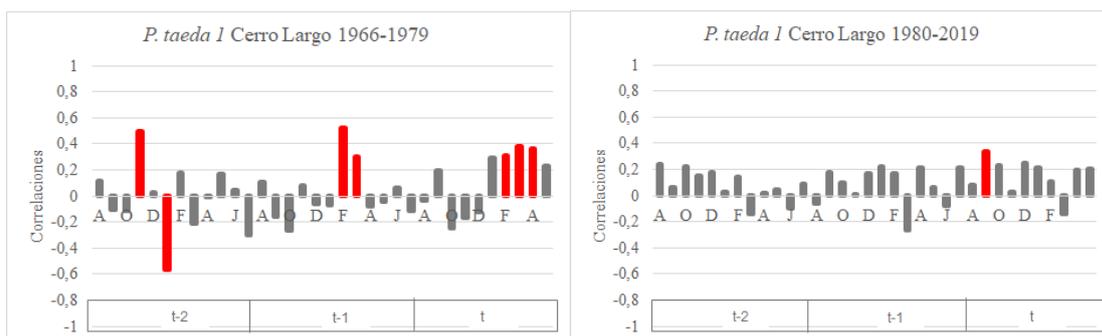


Figura 74. BACI (Before and after control impact) para temperatura mínima de *P. taeda 1* de Cerro Largo.

P. taeda 2 de Cerro Largo, presenta una respuesta significativa positiva a la precipitación de setiembre en t-2 ($r=0,62$) y t-1 ($r=0,83$) y negativa en t ($r=-0,38$), y negativa en los veranos de t-2 ($r=0,45$) y t-1 ($r=-0,53$), aunque positiva con la precipitación de enero ($r=0,38$) del año t en el período 1966-1979, posterior a este período, se ve una respuesta positiva a la precipitación de otoño tanto en t-2 ($r=0,37$), t-1 ($r=0,35$) como t ($r=0,40$) y a la precipitación de primavera con correlaciones de 0,38 y 0,41 en t-1 y t respectivamente (figura 75).

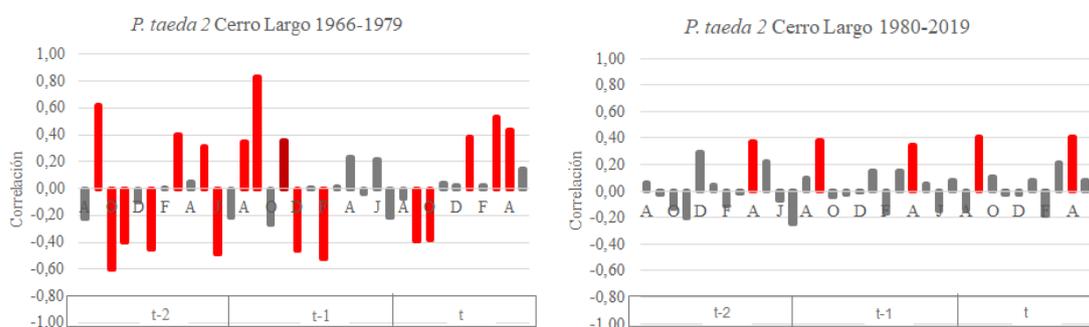


Figura 75. BACI (Before and after control impact) para precipitación de *P. taeda 2* de Cerro Largo.

Frente a la temperatura media máxima, se ve una respuesta negativa en las primaveras de t-2 ($r=-0,78$) y t-1 ($r=-0,64$), enero de t-1 ($r=-0,49$) y julio de t-1 ($r=-0,46$), y respuesta positiva a la temperatura máxima en abril de t-2 ($r=0,63$) y enero de t ($r=0,40$) del período 1966-1979, aunque después de este período se ve una respuesta positiva solo al mes de agosto del año corriente t con una correlación de 0,32 (figura 76), dejando en evidencia la ocurrencia de un corrimiento de la autocorrelación y una disminución de la fuerza de las correlaciones positivas y negativas.

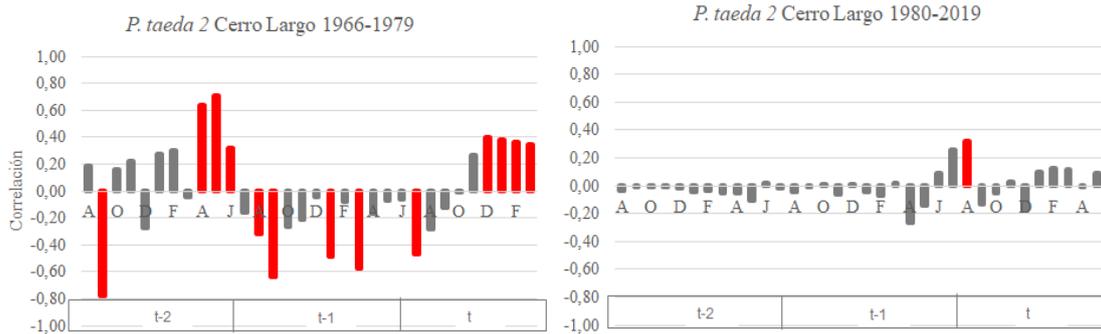


Figura 76. BACI (Before and after control impact) para temperatura máxima de *P. taeda 2* de Cerro Largo.

Para el período 1966-1979, se presenta una respuesta significativa a la temperatura media de primavera de t-2 ($r=-0,70$) y t-1 ($r=-0,53$) y al otoño de t-2 ($r=0,77$) y t-1 ($r=0,38$), además de una respuesta negativa a la temperatura media de julio del año precedente ($r=-0,58$), sin embargo, en el período 1980-2019, se respuestas positivas al invierno ($r=0,58$) y al verano ($r=0,36$) del año actual (figura 77).

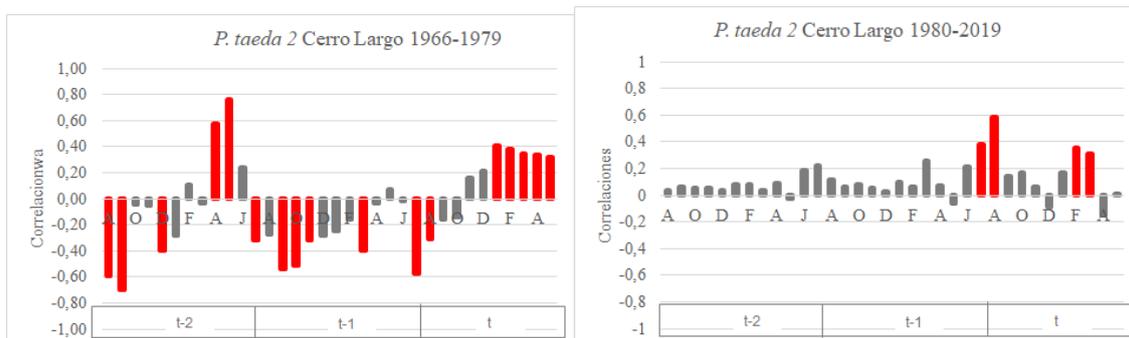


Figura 77. BACI (Before and after control impact) para temperatura media de *P. taeda 2* de Cerro Largo

Por último, para el período 1966-1979 se ve una respuesta negativa a la temperatura mínima de primavera en t-2 ($r=-0,78$) y t-1 ($r=-0,63$) y de los inviernos de t-2 ($r=-0,40$) y t-1 ($r=-0,57$), mientras que se ve una respuesta significativa positiva al otoño de t-2 ($r=0,79$) y el verano de t ($r=0,45$). En el período posterior, se ve una respuesta positiva a la temperatura mínima de primavera de t-2 ($r=0,41$), y la de t ($r=0,61$), además del otoño de t-1 ($r=0,55$) y el año corriente ($r=0,64$) (figura 78).

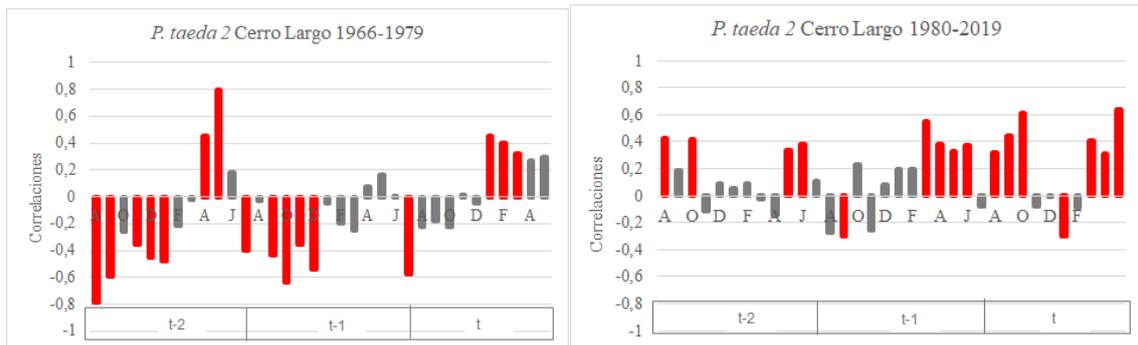


Figura 78. BACI (Before and after control impact) para temperatura mínima de *P. taeda 2* de Cerro Largo

3.8 Análisis de variables climáticas más influyentes

Con el fin de analizar cuáles fueron las variables más influyentes que explican las anomalías recogidas en las cronologías ARSTAN, se crearon modelos a partir de un análisis de regresión de múltiples variables, que contemplaban las componentes principales obtenidas en el PCA para cada sitio.

Para ambos sitios se propuso el siguiente modelo:

$$\text{Arstan} \sim \text{AÑO} + \text{PPA} + \text{PPA}_1 + \text{PPA}_2 + \text{PC1} + \text{PC2} + \text{PC3} + \text{PC4}$$

Donde PPA es la precipitación anual acumulada para el período de crecimiento de los árboles (agosto a julio), PPA₁ y PPA₂ corresponden a la precipitación anual acumulada para el período de crecimiento de t-1 y t-2 respectivamente, y PC1, PC2, PC3 y PC4, las cuatro componentes principales obtenidas del PCA.

En Cerro Largo hay correlación significativa con PC2, explicada por una correlación alta y negativa de la temperatura media de los meses de agosto, octubre y noviembre, y la temperatura media mínima del mes de octubre (tabla 11).

Residuals					
Min	1Q	Median	3Q	Max	
-0.4016	-0.1822	-0.0230	0.1139		14.047
Coefficients					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
AÑO	4,99E-01	2,35E-01	2.123	0.0394*	
PPA	-1,04E-01	1,74E-01	-0.594	0.5557	
PPA_1	9,98E-02	1,60E-01	0.622	0.5369	
PPA_2	-5,15E-02	1,57E-01	-0.328	0.7444	
PC1	8,58E+00	1,28E+01	0.671	0.5060	
PC2	-5,70E+01	2,41E+01	-2.367	0.0224*	
PC3	-3,47E+01	2,49E+01	-1.395	0.1701	
PC4	3,66E+01	2,70E+01	1.358	0.1813	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Tabla 11. ANOVA de modelo de regresión múltiple para CERRO LARGO

En el caso de Rivera, el análisis de varianza muestra significancia de la PC4, conformada por la precipitación media de los meses de mayo y junio, con una correlación alta y negativa, y la temperatura mínima de junio (correlación negativa) y diciembre (correlación positiva) (tabla 12).

Residuals					
Min	1Q	Median	3Q	Max	
-0.34688	-0.10867	0.00002	0.14352	0.33841	
Coefficients					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-5,94E+03	6,28E+03	-0.946	0.3481	
AÑO	3,43E+00	3,12E+00	1.101	0.2753	
PPA	4,61E-02	6,09E-02	0.758	0.4517	
PPA_1	1,54E-02	4,51E-02	0.340	0.7348	
PPA_2	-1,52E-02	2,88E-02	-0.529	0.5989	
PC1	1,10E+00	1,13E+01	0.097	0.9231	
PC2	-1,45E+01	1,02E+01	-1.418	0.1615	
PC3	-2,57E-01	1,16E+01	-0.022	0.9823	
PC4	2,91E+01	1,18E+01	2.470	0.0164*	
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Tabla 12. ANOVA de modelo de regresión múltiple para RIVERA

4. CONCLUSIONES

La variable precipitación no cambia para el periodo observado en ninguna de las dos localidades, por lo que no se observa efecto del cambio climático en la precipitación, aunque su influencia anual sobre el crecimiento de los árboles de las especies estudiadas es altamente significativa.

Las variables de temperatura media presentan una tendencia al aumento tanto para el período común, como para el período más largo en Cerro Largo, pudiéndose considerar como un efecto local del cambio climático.

El aumento de la temperatura en Cerro Largo, para la estación de crecimiento, afecta de manera negativa al crecimiento de *P. elliotii* y de *P. taeda*, mientras que en Rivera el aumento de temperatura media no afecta al crecimiento de *P. elliotii* y si afecta de forma negativa al crecimiento de *P. taeda*., concentrada en los meses de febrero a marzo y expresados en todos los casos por los valores del análisis de componentes principales y en el RESPO.

El factor suelo resultó significativo cuando para *P. taeda* en Cerro Largo una de las dos cronologías respondió de forma opuesta con relación al aumento de la precipitación a inicios del invierno. Destacando la importancia de la relación suelo/topografía como una variable significativa a considerar, más allá de las variables climáticas.

El salto climático del 76 se observa en todas las variables estudiadas para Cerro Largo, donde se cuenta con cronologías de 53 años, por lo que se pudo evaluar el comportamiento de los árboles frente a las variables climáticas antes y después de la ocurrencia del salto climático de 1976. Después del salto climático del 76 las temperaturas aumentan en relación a la media, y como en general previo a ese período las anomalías en el crecimiento son del tipo negativo, se terminan por generar aún más anomalías negativas en el crecimiento

A nivel anual se identifica el carácter espacial tipo El Niño expresado en los valores de las variables climáticas, generando grupos distintos que responden a las fechas en las que se plantaron los rodales.

La variación conjunta del ENOS y el cambio climático en el mismo período de tiempo actuando sobre los árboles genera un efecto conjunto difícil de dilucidar en las anomalías del crecimiento de la especies estudiadas, sin embargo y a pesar de ese efecto conjunto, fue posible concluir que

para Cerro Largo hay afectación por parte del cambio climático, dado por el aumento del 4% de la temperatura media (1980-2019), generando anomalías negativas en el crecimiento de *P. elliottii* y *P. taeda*. Este impacto del CC no ocurre sobre la precipitación.

En Rivera no se puede concluir nada relacionado al efecto conjunto del ENOS y el cambio climático dado que las cronologías son muy cortas. Sin embargo, sí se pudo encontrar un impacto del ENOS sobre las anomalías en el crecimiento, dependiente del período de tiempo considerado Niño/Niña.

Para poder concluir respecto al efecto del CC en Rivera son necesarias muestras más longevas que permitan separar las variaciones periódicas, intra e inter decadales, de los efectos puramente derivados del cambio climático. En tal sentido queda planteado el próximo objetivo, el de obtener árboles de *P. taeda* y de *P. elliottii* plantados antes de 1959 para obtener datos de anomalías en el crecimiento para dos períodos consecutivos de por lo menos 30 años: (30+30) 1959-1989 y 1990-2020; ajustándose a la base mínima climática de 30 años.

Desde el punto de vista climático para avanzar sobre las fronteras de lo que en el país se necesita comprender a los efectos de la mitigación del CC, se sugiere enfocar futuros trabajos que evalúen la frecuencia e intensidad de ocurrencia de eventos climáticos extremos, sobre todo asociados a la precipitación y a temperaturas máximas y mínimas absolutas, con el objetivo de entender la respuesta de los árboles a esos eventos.

Se concluye, además, que herramientas como las utilizadas en el presente trabajo pueden ser de especial utilidad tanto para empresas como productores forestales porque generan insumos para la toma de decisiones sobre el período óptimo de corta de rodales.

5.BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Arriaga, “Resultados de la Cartografía Forestal Nacional” 2018. [Online]. Available: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/informe-resultados-cartografia-forestal-nacional-2018>.
- [2] J. Morales, C. Carneiro, and S. Olman, “Información para el Desarrollo Forestal Sostenible,” *Desarro. For. Sosten.*, p. 1, 2001, [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/ad406s/ad406s.pdf>.
- [3] J. A. Giraldo Jiménez, “Dendrocronología en el trópico: aplicaciones actuales y potenciales dendrocronology in the tropics : current and potential applications,” *Colomb. For.*, vol. 14, no. 1, pp. 97–111, 2011. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/4239/423939614009.pdf>
- [4] R. C. Reedy, J. R. Arnold, and D. Lal, “Cosmic-ray record in solar system matter,” *Science*, vol. 219, no. 4581, pp. 127–135, 1983, doi: 10.1126/science.219.4581.127.
- [5] M. Cattaneo and R. Methol, Desarrollo de una raza local de *Pinus taeda* : avances en investigación, 2004. [Online]. Available: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807150103.pdf>
- [6] J. B. Baker and O. G. Langdon, “Pinus taeda L. Loblolly Pine,” *Silvics North Am.*, vol. 1, pp. 497–512, 1990. [Online]. Available: <http://dendro.cnre.vt.edu/dendrology/USDAFSSilvics/34.pdf>.
- [7] S. L. Rebottaro and D. A. Cabrelli, “Regeneración natural de Pinus elliottii en claros silvícolas: dinámica poblacional durante siete años,” *Madera y Bosques*, vol. 17, no. 1, pp. 49–70, 2016, doi: 10.21829/myb.2011.1711154.
- [8] E. G. Merino, “La dendrocronología : métodos y aplicaciones,” *Arqueologia nàutica mediterrània*, pp.309-322, 2009. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/286242799_La_dendrocronologia_metodos_y_aplicaciones
- [9] L. Shigo, “Tree defects: a photo guide,” *Gen. Tech. Report, Northeast. For. Exp. Station. USDA For. Serv.*, no. E-82, p. ii + 167 pp., 1983. [Online]. Available: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/4096>
- [10] F. A. Bazzaz, “The response of natural ecosystems to the rising global CO2 levels,” *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 167–196, 1990, doi:

- 10.1146/annurev.es.21.110190.001123.
- [11] G. R. Walther *et al.*, “Ecological responses to recent climate change,” *Nature*, vol. 416, no. 6879, pp. 389–395, 2002, doi: 10.1038/416389a.
- [12] P. D. Jones, T. J. Osborn, and K. R. Briffa, “The evolution of climate over the last millennium”, *Science.*, vol. 292, no. 5517, pp. 662–667, 2001, doi: 10.1126/science.1059126.
- [13] A. V. Fedorov and S. G. Philander, “Is El Nino changing?,” *Science (80-.)*, vol. 288, no. 5473, pp. 1997–2002, 2000, doi: 10.1126/science.288.5473.1997.
- [14] H. Spiecker, “Overview of recent growth trends in European forests,” *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 116, no. 1–2, pp. 33–46, 1999, doi: 10.1023/A:1005205515952.
- [15] D. A. Graybill, "Detecting the aerial fertilization effect of atmospheric CO₂ enrichment in tree-ring cronologies", *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 7, no. 1, pp. 81-95, 1993. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/92GB02533>
- [16] S. E. Curtis and K. J. Oven, “Geographies of health and climate change,” *Prog. Hum. Geogr.*, vol. 36, no. 5, pp. 654–666, 2012, doi: 10.1177/0309132511423350.
- [17] T. Randle, "Forest and timber quality in Europe: modelling and forecasting yield and quality in Europe", *Mafyque: Final Report*, 2005. [Online]. Available: https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/projects/mefyque_finalpublication_mainv2.pdf
- [18] F. W. Telewski, R. T. Swanson, B. R. Strain, and J. M. Burns, “Wood properties and ring width responses to long-term atmospheric CO₂ enrichment in field-grown loblolly pine (*Pinus taeda* L.),” *Plant, Cell Environ.*, vol. 22, no. 2, pp. 213–219, 1999, doi: 10.1046/j.1365-3040.1999.00392.x.
- [19] E. R. Cook, L. A. Kairiukstis. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Enviromental Sciences*. The Neederlands: Kluwer Academic Publishers, 1989. [Online]. Available:http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/3354/1/Methods_of_Dendrochronology_Applications.pdf
- [20] F. D. J. Rodríguez Flores, M. Pompa-García, C. Mallén Rivera, and R. Goche Télles, “Modelos dendroclimáticos para crecimiento radial forestal,” *Rev. Mex. Ciencias For.*, vol. 5, no. 26, pp. 30–37, 2018, doi: 10.29298/rmcf.v5i26.288.
- [21] R. Studhalter, “Early History of Crossdating,” *Tree-Ring Bulletin*, vol. 21, pp. 31-35, 1956. [Online]. Available: <https://docplayer.net/79203263-Early-history-of-crossdating.html>

- [22] B. Neuwirth and M. Winiger, "NAO and Tree Rings - A dendroclimatological network analyses of Central European chronologies," *Tree Rings Archaeol. Climatol.* vol. 2, no. January, pp. 58–66, 2003. [Online]. Available: http://treering.de/sites/default/files/TRACE_pdf/Volume_2/Neuwirth_Winiger_TraceVol_2.pdf.
- [23] S. E. Nash, "Fundamentals of tree-ring research. James H. Speer.," *Geoarchaeology*, vol. 26, no. 3, pp. 453–455, 2011, doi: 10.1002/gea.20357.
- [24] H. a Rowland, "Early Journal Content on JSTOR, Free to Anyone in the World (mortality of Diabetes)," *Science (80-)*, vol. 2, no. 29, pp. 242–250, 1883. [Online]. Available: <https://archive.org/details/jstor-4576614>.
- [25] D. M. A. Rozendaal and P. A. Zuidema, "Dendroecology in the tropics: A review," *Trees - Struct. Funct.*, vol. 25, no. 1, pp. 3–16, 2011, doi: 10.1007/s00468-010-0480-3.
- [26] M. Tomazello Fo, F. Roig Juñent, and P. Zevallos Pollito, "Dendrocronología y dendroecología tropical: marco histórico y experiencias exitosas en los países de América Latina," *Ecol. en Boliv. Rev. del Inst. Ecol.*, vol. 44, no. 2, pp. 73–82, 2009. [Online]. Available: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282009000200001
- [27] R. J. W. Brienen and P. A. Zuidema, "Anillos de crecimiento de árboles maderables en Bolivia: su potencial para el manejo de bosques y una guía metodológica", *Informe técnico*, no. 7, 2003. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/46644577_Anillos_de_crecimiento_de_arboles_maderables_en_Bolivia_su_potencial_para_el_manejo_de_bosques_y_una_guia_metodologica
- [28] J. Villanueva-díaz, J. C. Paredes, D. W. Stahle, and M. D. Therrel, "Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México", *Folleto técnico*, no. 2, 2004. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/236649253_Elementos_basicos_de_la_dendrocronologia_y_sus_aplicaciones_en_Mexico
- [29] D. Stuart, "Dendrochronology in Mexico," *Hisp. Am. Hist. Rev.*, vol. 48, no. 2, pp. 349–349, 1968, doi: 10.1215/00182168-48.2.349.
- [30] M. Jesús, P. Espinoza, G. Janet, I. Guillen, M. S. Morales, and R. R. Arisméndiz, "Potencialidad de *Cedrela odorata* (Meliaceae) para estudios dendrocronológicos en la selva central del Perú", *Revista de biología vegetal*, vol. 62, no. 2, pp. 783–793, 2014. [Online]. Available: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-

77442014000100031

- [31] J. A. Boninsegna, R. Villalba, L. Amarilla, and J. Ocampo, “Studies on tree rings, growth rates and age-size relationships of tropical tree species in Misiones, Argentina,” *IAWA J.*, vol. 10, no. 2, pp. 161–169, 1989, doi: 10.1163/22941932-90000484.
- [32] R. Villalba, J. A. Boninsegna, and R. L. Holmes, “*Cedrela angustifolia* and *Juglans australis*: two new tropical species useful in dendrochronology,” *Tree Ring Bull.*, vol. 45, pp. 25–35, 1985. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.852.4150&rep=rep1&type=pdf>
- [33] J. A. Jiménez Giraldo, “Dendrocronología En El Trópico : Aplicaciones Actuales Y Potenciales,” *Colomb. For.*, vol. 14, no. 1, pp. 97–111, 2011. [Online]. Available: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/3554>
- [34] J. A. G. Jiménez and J. I. del Valle Arango, “Estudio del crecimiento de *prioria copaifera* (Caesalpinaceae) mediante técnicas dendrocronológicas,” *Rev. Biol. Trop.*, vol. 59, no. 4, pp. 1813–1831, 2011. [Online]. Available: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442011000400032
- [35] K. H. Wang, A. A. A. Azim, and M. H. Sahri, “Cambial activity of *Dipterocarpus costulatus* in relation to different stem diameters and climate factors,” *J. Trop. For. Sci.*, vol. 26, no. 4, pp. 581–588, 2014.
- [36] L. Profumo, “Estudo de anéis de crescimento de espécies arbóreas de ambientes fluviais da bacia do Rio Tucuaembó, Uruguai”, tesis doctoral, Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, 2010. [Online]. Available: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/43958>
- [37] C. Lucas, P. Puchi, and A. Ferreira, “Tasa de incremento anual de *Coronilla* (*Scutia buxifolia*) y *Espinillo* (*Vachellia caven*) en Uruguay”, *Libro de resúmenes*, pp. 18-20, . [Online]. Available: http://aia.org.uy/sites/default/files/seminario_investigaciones.pdf
- [38] L. Profumo, I. Mieres, and M. Portillo, “Crecimiento de *Sebastiania commersoniana* – blanquillo y *Lithraea molleoides* – aruera en distintas eco-regiones del Uruguay,” 2017. [Online]. Available: https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/2-ludmila_crecimiento_de_sebastiania_commersoniana_-_blanquillo_y_lithraea.pdf
- [39] A. Ferreira, “Potencial de *Scutia buxifolia* para estudios dendrocronológicos en Uruguay”, 2016. [Online]. Available: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/8408/1/uy24-18125.pdf>

- [40] C. Lucas, P. Puchi, L. Profumo, A. Ferreira, and A. Muñoz, “Effect of climate on tree growth in the Pampa biome of Southeastern South America: First tree-ring chronologies from Uruguay,” *Dendrochronologia*, vol. 52, no. July 2020, pp. 113–122, 2018, doi: 10.1016/j.dendro.2018.10.004.
- [41] R. L. Holmes., “Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement”, *Tree-ring bullets*, vol. 43, pp. 69-74, 1983. [Online]. Available: <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/261223/trb-43-069-078.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [42] R. Villalba and V. Moyano, “Dendroecología y Dendroclimatología con especies del género *Prosopis* en Argentina,” *Multequina*, vol. 9, no. 2, pp. 01–18, 2000. [Online]. Available: https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal//multequina/indice/pdf/09_02/9_2_1.pdf
- [43] K. L. Gage, T. R. Burkot, R. J. Eisen, and E. B. Hayes, “Climate and Vectorborne Diseases,” *Am. J. Prev. Med.*, vol. 35, no. 5, pp. 436–450, 2008, doi: 10.1016/j.amepre.2008.08.030.
- [44] C. Allende, “Dendrochronology in Latin America , state of the art and contributions for understanding climate variation,” no. March 2021, 2020, doi: 10.20944/preprints202012.0748.v1.
- [45] A. Hanslmeier, “The Sun and Climate,” *Sun Sp. Weather*, no. August, pp. 111–153, 2004, doi: 10.1007/0-306-48211-8_7.
- [46] J. A. Eddy, J. A. Eddy, G. C. Bond, R. S. Bradley, and W. S. Broecker, “Sun-Climate Connections,” *SpringerReference*, 2012, doi: 10.1007/springerreference_77481.
- [47] M. Stuiver, P. D. Quay, "Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun", *Science*, vol. 207, pp. 11-19, 1980. [Online]. Available: <https://science.sciencemag.org/content/207/4426/11>
- [48] N. R. Rigozo *et al.*, “Solar-Terrestrial Signal Record in Tree Ring Width Time Series from Brazil,” *Pure Appl. Geophys.*, vol. 169, no. 12, pp. 2181–2191, 2012, doi: 10.1007/s00024-012-0480-x.
- [49] E. R. Cook, J. G. Palmer, and R. D. D’Arrigo, “Evidence for a ‘Medieval Warm Period’ in a 1,100 year tree-ring reconstruction of past austral summer temperatures in New Zealand,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, no. 14, pp. 14–17, 2002, doi: 10.1029/2001GL014580.
- [50] M. Kaennel and F. Schweingruber, *Multilingual glossary of dendrochronology*, 1995. [Online]. Available:

- https://www.researchgate.net/publication/259810249_Multilingual_Glossary_of_Dendrochronology_Terms_and_definitions_in_English
- [51] J. Cabris, “Evaluación de un ensayo de orígenes de *Pinus taeda* L. :variables dendrométricas y propiedades de la madera”, Tesis, Universidad de la República, Montevideo, 2004.
- [52] M. L. Kirwan, J. L. Kirwan, and C. A. Copenheaver, “Dynamics of an estuarine forest and its response to rising sea level,” *J. Coast. Res.*, vol. 23, no. 2, pp. 457–463, 2007, doi: 10.2112/04-0211.1.
- [53] S. Do Amaral Machado, N. T. Zamin, R. G. M. Nascimento, and A. A. P. Dos Santos, “Efeito de variáveis climáticas no crescimento mensal de *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia* em fase juvenil,” *Floresta e Ambient.*, vol. 21, no. 2, pp. 170–181, 2014, doi: 10.4322/floram.2014.015.
- [54] P. R. Schneider, L. E. G. Elesbão, P. S. P. Schneider, and R. V. Longhi, “Crescimento em volume de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em áreas arenizadas e degradadas no Oeste do Rio Grande do Sul,” *Sci. For. Sci.*, vol. 42, no. 102, pp. 181–189, 2014. [Online]. Available: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr102/cap02.pdf>
- [55] D. R. Butler, H. D. Grissino-Mayer, M. S. Rosenberger, and D. R. Butler, “Climatic patterns in tree rings of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) from north Georgia”, *Physical Geography*, no. October, 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/260192034_Grissino-Mayer_Henri_D_M_Shawn_Rosenberger_and_David_R_Butler_1989_Climatic_patterns_in_tree_rings_of_loblolly_pine_Pinus_taeda_L_from_north_Georgia_Physical_Geography_101_32-43
- [56] D. R. Ortega Rodriguez, H. W. P. de Carvalho, and M. Tomazello-Filho, “Nutrient concentrations of 17- year-old *Pinus taeda* annual tree-rings analyzed by X-ray fluorescence microanalysis,” *Dendrochronologia*, vol. 52, no. August, pp. 67–79, 2018, doi: 10.1016/j.dendro.2018.09.009.
- [57] M. Dobner, O. C. Campoe, “Meteorological effects on 30-years-grown *Pinus taeda* under a gradient of crown thinning intensities in southern Brazil”, *Forest Ecology Management*, vol. 453, no. 1, pp. 12-14, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112719311119>
- [58] G. L. Harley, J. T. Maxwell, and G. T. Raber, “Elevation promotes long-term survival of *Pinus elliottii* var. *densa*, a foundation species of the endangered pine rockland ecosystem in the Florida Keys,” *Endanger. Species Res.*, vol. 29, no. 2, pp. 117–130,

- 2016, doi: 10.3354/esr00707.
- [59] C. P. Anderson, G. A. Carter, and W. R. Funderburk, "The use of aerial RGB imagery and LIDAR in comparing ecological habitats and geomorphic features on a natural versus man-made barrier island," *Remote Sens.*, vol. 8, no. 7, 2016, doi: 10.3390/rs8070602.
- [60] MVOTMA, "Plan Nacional de Adaptación Costera de Uruguay Variabilidad observada del clima en Uruguay," 2019. [Online]. Available: [https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2020-08/Variabilidad observada del clima en Uruguay 0320.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2020-08/Variabilidad%20observada%20del%20clima%20en%20Uruguay%200320.pdf).
- [61] M. Renom, "Temperaturas extremas en Uruguay. Análisis de la variabilidad temporal de baja frecuencia y su relación con la circulación de gran escala", tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales., 2009. [Online]. Available: https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n4449_RenomMolina
- [62] K. E. Trenbeth, J. M. Caron, D. P. Stepaniak, and S. Worley, "Evolution of El Niño-Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures," *J. Geophys. Res. D Atmos.*, vol. 107, no. 7–8, pp. 5–1, 2002, doi: 10.1029/2000jd000298.
- [63] S. do Amaral Machado, L. C. Rodrigues da Silva, E. Jaskiu, and R. Cavalheiro, "Comparação entre análise de tronco digital e convencional em árvores de *Mimosa scabrella* bentham e *Pinus taeda* L.," *Rev. Arvore*, vol. 37, no. 2, pp. 329–337, 2013, doi: 10.1590/S0100-67622013000200014.
- [64] H. D. Grissino-Mayer, "Evaluating Crossdating Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA", *Tree-ring research*. Vol. 57, no. 2, pp. 205 -221, 2001. [Online]. Available: <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/251654/trr-57-02-205-221.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [65] F. Biondi and K. Waikul, "DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies," *Comput. Geosci.*, vol. 30, no. 3, pp. 303–311, 2004, doi: 10.1016/j.cageo.2003.11.004.
- [66] E. P. Smith, " BACI Design ," *Wiley StatsRef Stat. Ref. Online*, vol. 1, pp. 141–148, 2014, doi: 10.1002/9781118445112.stat07659.
- [67] A. E. Douglass, "A method of estimating rainfall", *Bulletin of the American Geographical Society*, vol. 46, no. 5, pp. 321–336, 1914. [Online]. Available:

https://www.jstor.org/stable/201814?seq=1#metadata_info_tab_contents