



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

EFFECTO DEL RALEO EN EL CRECIMIENTO DE RODALES DE *Eucalyptus grandis* (H.)  
*ex Maiden* PARA LA REGION SUR DE LA MESOPOTAMIA ARGENTINA

ING. FTAL. MSC. BARRIOS, MARIA FERNANDA

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

DIRECTORA: DRA. BALZARINI, MÓNICA.

AÑO 2024

**EFFECTO DEL RALEO EN EL CRECIMIENTO DE RODALES DE *Eucalyptus grandis* (H.)  
ex Maiden PARA LA REGION SUR DE LA MESOPOTAMIA ARGENTINA**

Maria Fernanda Barrios

Ingeniera Forestal - Universidad Nacional de Formosa

Magister en Gestión y Auditoria Ambiental - Universidad de León, España

Diplomada en Bioestadística Básica Aplicada - Universidad Nacional de Córdoba.

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en esta Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en “Efecto del raleo en el crecimiento de rodales de *Eucalyptus grandis* para la Región Sur de la Mesopotamia Argentina”, durante el periodo comprendido entre 2017-2022, bajo la dirección de la Dra. Mónica Balzarini.

Maria Fernanda Barrios

Monica Balzarini

Defendida: 31 de Octubre de 2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a todas las personas que hicieron posible llegue a completar esta instancia, en especial a aquellos que no me soltaron la mano, pero especialmente a Dios por su constante presencia en mi vida.

A mi familia, quienes siempre están. Por acompañarme y animarme en cada momento.

A todos mis amigos, compañeros y colegas con los que compartí en este trayecto.

A mi directora de tesis, Monica, que me brindo su ayuda, por compartir sus conocimientos, su guía, a todo el departamento de Estadística de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Córdoba, como también a otros profesionales que dieron su tiempo en los diversos trabajos presentados.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y la escuela de posgrado, a todos sus docentes, evaluadores y todo el personal por el acompañamiento durante todos estos años.

Sin más que decir, solo compartir una frase de Álvaro Mutis:

“Cuando la gratitud es tan absoluta las palabras sobran”

## DEDICATORIA

Esta Tesis se la dedico a mi Padre "Gregorio Alberto Barrios" mi Tate, Ing. Ftal. que siempre me alentó a seguir a pesar de las dificultades, que desde el cielo hoy me ilumina y nunca me abandona. A mi madre Alicia, ella que, con su compañía, sus palabras, su alegría y siempre alentando estuvo a mi lado.

A mis seres queridos y esos amigos que son más que familia, que gracias a Dios son muchos, entre ellos a la estrella más brillante mi Mamita Lidia Melgratti y al Edgardo mi hermano del corazón....

A todos ellos infinitas gracias por estar presente en mi vida y en mi camino...

Eternamente Gracias...

## PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONGRESOS

- 1- Barrios, M; Hirigoyen, A y García, M. “Modelos de crecimiento para *Eucalyptus grandis* en la región sur de la Mesopotamia Argentina: Avances I”. XXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, 24 y 25 de septiembre de 2015.
- 2- Barrios, M.; García, M. y Balzarini, M. “Modelos de crecimiento para *Eucalyptus grandis* en la región sur de la Mesopotamia Argentina. Avances II: Estructura de la base de datos”. XXX Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, 29 y 30 de septiembre de 2016.
- 3- García, M.; De la Peña, C; Flores, M.; Del Tufo, N; Gowland, A; Barrios, M. y Mastrandrea C. “Ensayo de espaciamiento inicial en tres clones comerciales”. Reunión mensual Consorcio Ftal. Rio Uruguay. Ubajay, Entre Ríos. 28 de abril de 2017.
- 4- García, M.; De la Peña, C.; Caniza, F., Tesón, N.; Ramos, S.; Mastrandrea, C.; Barrios, M.; Martínez, M.; Flores, M. y Alejandro, J. “Silvicultura clonal: espaciamiento inicial, manejo de la densidad y fertilización”. XII Seminario Virtual de Silvicultura de bosques cultivados – PNFOR 1104073. 14 de mayo de 2017.
- 5- Harrand, L.; Obershelp, J.; García, M.; Mastrandrea, C.; De la Peña, C.; Barrios, M.; Martínez, M.; Tesón, N.; Ramos, S.; Flores, M.; Alejandro, J. “Dia de campo Forestal EEA INTA Concordia”. Reunión de Consorcios forestales. EEA INTA. Concordia, Entre Ríos. 19 de mayo de 2017.
- 6- García, M.; De la Peña, C.; Tesón, N.; Mastrandrea, C.; Lupi, A.; Martínez, M. y Barrios, M. “Informe: Ensayo de silvicultura clonal: espaciamiento inicial y manejo de la densidad”. EEA INTA. Concordia, Entre Ríos. 12 y 13 de septiembre de 2017.
- 7- García, M.; Mastrandrea, C.; De la Peña, C; Teson, N; Lupi, A.; Barrios y M.; Martínez. Avances de ensayos de silvicultura clonal: espaciamiento inicial y manejo de la densidad en el noreste de la Argentina. Reunión anual Cooperativa de productividad forestal. Concepción. Chile. 17 al 19 de octubre de 2017.
- 8- Harrand, L.; Tesón, N.; Oberschelp, J.; García, M.; De la Peña, C.; Ramos, S.; Salto, C.; Martínez, M.; Barrios, M. y Sánchez Acosta, M. “Dia de campo para escuelas, Área Forestales”. EEA INTA. Concordia, Entre Ríos. 25 de octubre de 2017.

- 9- García, M; Barrios, M.; Ramos, S.; De la Peña, C.; Lupi, A. y Martínez, M. "Fertilización de clones de *Eucalyptus grandis*". EEA INTA. Concordia, Entre Ríos. 30 de noviembre de 2017.
- 10- Barrios, M. "Buenas Prácticas del manejo forestal". Diario El Heraldo. Concordia, Entre Ríos. 10 de agosto de 2018.
- 11- Barrios, M. "Efecto del raleo en el crecimiento de rodales de *Eucalyptus grandis* para la región sur de la Mesopotamia Argentina, avances". Presentación de avances de investigaciones en el marco de becas de formación posgrado INTA, e INTA-CONICET. EEA INTA. Concordia, Entre Ríos. 13 de diciembre del 2018.
- 12- Barrios, M.; Balzarini, M.; Videla, M. y García, M. ". Modelación matemática del crecimiento del diámetro y altura de rodales sin raleo de *Eucalyptus grandis* en el noreste de Entre Ríos, Argentina". XXV Congreso Mundial IUFRO. Investigación y cooperación forestal para el desarrollo sostenible. Curitiba, Brasil. 29 de septiembre al 5 de octubre de 2019.
- 13- Barrios, M.; Martínez, M.; Neumas, I; Stefan De Betio V.; Dayan Hampel Viera Filho, M.; García, M.; Harrand, L. y Mastrandrea, C. "Número y diámetro de ramas en clones, híbridos y especies de *Eucalyptus sp*". XVIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. El Dorado, Misiones. 17, 18 y 19 de octubre de 2019.
- 14- Ramos, S.; Sánchez Acosta, M.; Martínez, M. y Barrios, M. "En los eucaliptus hay hongos y hongos". Diario El Heraldo. Concordia, Entre Ríos. 11 de junio de 2019.
- 15- Ramos, S.; Martínez, M. y Barrios, M. "INTA advierte sobre hongos tóxicos". Diario El Heraldo. 24 de junio de 2019.
- 16- Sánchez Acosta, M.; Martínez, M.; Barrios, M. "Casas de maderas transportables: una rápida solución para emergencias". Diario El Heraldo. Concordia, Entre Ríos. 04 de julio 2019.
- 17- Barrios, M. "Buenas Prácticas del manejo forestal". Diario El Heraldo. Concordia, Entre Ríos. 10 de agosto de 2018.
- 18- Barrios, M. "Silvicultura de precisión: una herramienta para la gestión forestal". Diario El Heraldo. Concordia, Entre Ríos. 11 de agosto de 2019.

19- Barrios, M.F., Paccioretti, P., Balzarini, M. "Mapeo de variabilidad espacial dasométrica post-raleo diferencial en un rodal de *Eucalyptus grandis*". XXXIV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos. Octubre 2020.

20- Barrios, Maria F., Balzarini, M., Videla, M. E. y García, M. "Modelado del diámetro normal y altura total de rodales no raleados para *Eucalyptus grandis* en la costa del Rio Uruguay". Por publicar. Revista AgriScientia. 2023. Córdoba.

## INDICE GENERAL

<b>ABREVIATURAS Y SIMBOLOS</b> .....	1
<b>RESUMEN</b> .....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>1. INTRODUCCION</b> .....	6
1.1. Rodales forestales implantados .....	6
1.2. Raleo en rodales .....	6
1.3. Raleo y crecimiento .....	7
1.4. Rodales de <i>Eucalyptus</i> y producción .....	10
1.5. Manejo silvícola en la Mesopotamia argentina .....	11
1.6. Crecimiento .....	14
1.7. Tipos de crecimiento .....	14
1.8. Crecimiento de rodales .....	15
1.9. Factores que afectan el crecimiento .....	15
1.10. Modelación del crecimiento .....	16
1.11. Funciones de crecimiento.....	18
1.12. Calidad de sitio en el crecimiento .....	19
1.13. Variabilidad espacial y empleo de la geoestadística en el crecimiento .....	21
1.14. Fundamentación e hipótesis.....	23
1.14.1. Fundamentación.....	23
1.14.2. Hipótesis de Investigación.....	24
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	26
2.1. Objetivo general: .....	26
2.2. Objetivos específicos: .....	26
<b>3. MATERIALES Y METODOS</b> .....	27
3.1. Área de influencia.....	27
3.2. Descripción de los ambientes y los suelos.....	28
3.3. Superficie forestada .....	31
3.4. Manejo silvícola.....	34
3.5. Origen de la información y base de datos.....	35

3.6.	Definiciones de variables observadas y calculadas .....	38
3.6.1.	Variables observadas.....	38
3.6.2.	Variables calculadas .....	39
3.7.	Análisis estadístico de los datos .....	40
3.7.1.	Análisis exploratorio.....	40
3.7.2.	Análisis estadístico de los ajustes.....	40
3.7.3.	Significancia de los parámetros estimados.....	48
3.8.	Mapeos de variabilidad espacial .....	48
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>50</b>
4.1.	Análisis exploratorio de los datos .....	50
4.2.	Rodales sin intervención de raleo .....	62
4.3.	Rodales con intervención de un raleo .....	68
4.3.1.	Mapeo espacial de rodal con una intervención de raleo.....	69
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>80</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>84</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>88</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características climáticas del área de influencia.....	31.
Tabla 2. Resumen de origen e información de datos.....	36.
Tabla 3. Categorización de densidades iniciales (DI) y finales (DF) (pl/ha).....	37.
Tabla 4. Medidas de resumen del DAP para CDI 10 y 11.....	51.
Tabla 5. Medidas de resumen de HT para CDI 10 y 11.....	54.
Tabla 6. Medidas de resumen de DAP (cm) y HT (m) para CDI 8 (801-900 pl/ha).....	57.
Tabla 7. Medidas de resumen de DAP (cm) y HT (m) para CDI 9 (901-1.000 pl/ha).....	57.
Tabla 8. Medidas de resumen de DAP (cm) y HT (m) para CDI 13 (1.301-1.400 pl/ha).....	58.
Tabla 9. Criterios de selección de modelos.....	62.
Tabla 10. Calidades de sitio por BLUP's para sitios sin raleo.....	64.
Tabla 11. Criterios de selección de modelos para sitios con una intervención.....	68.
Tabla 12. Medidas de resumen para las variables DAP (cm) y HT (m) antes (PreR) y después (PostR) de un raleo a distintas intensidades en un rodal de <i>E. grandis</i> .....	70.
Tabla 13. Características de las zonas homogéneas identificadas para el DAP y HT.....	75.

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de influencia del estudio.....	27.
Figura 2. Suelos del Departamento Monte Caseros. Prov. Corrientes.....	28.
Figura 3. Lado izquierdo: Mapa de aptitud de las tierras para cultivo del género Eucalyptus y la superficie comprendida en los departamentos Concordia, Federación y Colon, de la provincia de Entre Ríos. Lado derecho: Ubicación de los lotes (macrositios) donde se encuentran las parcelas en estudio en función de la aptitud forestal para los departamentos mencionados.....	30.
Figura 4. Superficie forestada por especie. Inventario Forestal 2015. Corrientes.....	32.
Figura 5. Superficie forestada por especie. Inventario Forestal 2016. Entre Ríos.....	33.
Figura 6. Porcentaje (%) de parcelas evaluadas en función de la edad de medición (Tm)...	50.
Figura 7. Porcentaje acumulado de parcelas en función de la edad de medición y el manejo.....	51.
Figura 8. Gráfico de densidad de puntos de manejos efectuados para las distintas categorías de densidad inicial y densidad final.....	52.
Figura 9. Dm y HT para CDI 10 (1.001- 1.100 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF.....	55.
Figura 10. Dm y HT para CDI 11 (1.101-1.200 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF.....	55.
Figura 11. Dm para CDI 11 (1.201-1300 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF.....	59.
Figura 12. HT para CDI 11 (1.201-1.300 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF.....	60.
Figura 13. Dm para CDI 15 (1.501-1.600 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF.....	60.
Figura 14. HT para CDI 15 (1.501-1.600 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF.....	61.
Figura 15. Histogramas de BLUP's .....	62.
Figura 16. Altura promedio (HT) en función de la edad y las calidades de sitio.....	66.
Figura 17 DAP promedio en función de la edad y las calidades de sitio.....	67.
Figura 18. Mapeo de variabilidad del macrositio.....	73.
Figura 19. Distribución del DAP y de HT en un rodal post-raleo. Correlación espacial entre variables.....	76.

Figura 20. Mapa de predicción espacial.....	78.
Figura 21. Validación del mapeo.....	79.

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

<b>A</b>	Apto
<b>ADA</b>	Aproximación algebraica diferencial
<b>AIC</b>	Criterio de información de Akaike
<b>AP</b>	Agricultura de precisión
<b>BIC</b>	Criterio de información Bayesiano
<b>BLUP/ BLUPs</b>	Best Linear Unbiased Prediction
<b>CA</b>	Condionalmente apto
<b>CATIE</b>	Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza
<b>CDF</b>	Categoría densidad final
<b>CDI</b>	Categoría densidad inicial
<b>CHA</b>	Cantidad promedio de días de heladas al año
<b>CV</b>	Coefficiente de variación
<b>D0</b>	Diámetro dominante
<b>DAP</b>	Diámetro altura de pecho
<b>dg</b>	Diámetro medio cuadrático
<b>DI</b>	Densidad inicial
<b>Dm</b>	DAP medio
<b>EEA</b>	Estación experimental de agricultura
<b>EMBRAPA</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
<b>G</b>	Área basimétrica
<b>H0</b>	Altura dominante
<b>Hm</b>	Altura media
<b>HT</b>	Altura total
<b>INTA</b>	Instituto nacional de tecnología agropecuaria
<b>IS</b>	Índice de sitio
<b>IUFRO</b>	Unión Internacional de Institutos de Investigación Forestal
<b>M0</b>	Sin raleo
<b>M1</b>	Un raleo
<b>M2</b>	Dos raleos

<b>M3</b>	Tres raleos
<b>MA</b>	Muy apto
<b>MAGyP</b>	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca
<b>MLM</b>	Modelo lineal mixto
<b>MLMh</b>	Modelo lineal mixto heterocedástico
<b>MLMhc</b>	Modelo lineal mixto heterocedástico con correlación espacial
<b>MNLM</b>	Modelo no lineal mixto
<b>MNLMg</b>	Modelo no lineal mixto – Función Gompertz
<b>MSE</b>	manejo sitio-especifico
<b>N</b>	Numero de pies por hectárea
<b>NA</b>	No apto
<b>O</b>	Observaciones
<b>PA</b>	Potencialmente apto
<b>p/ha</b>	Plantas por hectárea
<b>PostR</b>	Post- raleo
<b>ppMA</b>	Precipitación media anual
<b>PreR</b>	Pre- raleo
<b>PROFOSEC</b>	Proyecto Forestal de Desarrollo
<b>REMC</b>	Raíz del error medio cuadrático o error estándar de la estimación
<b>S. A</b>	Sociedad Anónima
<b>SAGPyA</b>	Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y alimentos
<b>s/d</b>	Sin datos
<b>SIG</b>	Sistema de información geográfico
<b>SP</b>	Silvicultura de precisión
<b>Sp</b>	Superficie de parcela
<b>T</b>	Edad
<b>Tm</b>	Edad de medición
<b>TMA</b>	Temperatura media anual
<b>Tr</b>	Edad de raleo

## RESUMEN

En la región Sur de la Mesopotamia Argentina existen plantaciones de *E. grandis* orientadas a la producción maderera o multipropósito, las cuales son sometidas a distintos manejos silvícolas para la obtención de mayores rendimientos productivos. Uno de ellos, es el raleo, actividad que se enfoca en aumentar el crecimiento de los individuos selectos y homogeneizar el rodal en sanidad, calidad y cantidad. El presente estudio tiene como propósito abordar el modelado longitudinal del crecimiento de rodales de *E. grandis* raleados y no raleados. Para ello, se trabajó con parcelas permanentes con dos o más mediciones anuales del diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total (HT) de los árboles, entre otras variables morfométricas y de calidad maderera.

El modelado del crecimiento en DAP y HT, se desarrolló con modelos lineales mixtos teniendo en cuenta la temporalidad de las observaciones y la calidad de sitio bajo distintos manejos respecto al raleo. Se calculó los índices de calidad de sitio empleando la metodología BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) para predecir el efecto de sitio. También se incluyó en el modelado la posible correlación espacial entre datos de crecimiento de árboles vecinos para mejorar la eficiencia de la comparación del crecimiento de rodales con distintas estrategias de manejo. El análisis del efecto de raleo se efectuó en sitios con una sola intervención y densidad inicial de 1.000- 1.100 pl/ha por ser este el tipo de rodal con la mayor cantidad de información para la modelación estadística y la densidad que generalmente se emplea para forestación en la región.

Se empleó la plataforma del software Fastmapping v.2.0, aplicación web interactiva, para caracterizar la variación espacial dentro del rodal para validar el concepto y finalidad del raleo. El marco teórico propuesto para el modelado de los datos de crecimiento de *E. grandis* constituye una herramienta predictiva que puede ser usada en la estimación del crecimiento en plantaciones. El modelo lineal mixto heterocedástico con correlación espacial fue el mejor modelo para estimar promedios poblacionales del DAP y HT, válido para rodales que tengan hasta un raleo. Para su uso en otros sitios, la forma de trabajo o protocolo de análisis de los datos debe ajustarse a variaciones de la densidad y del tratamiento silvícola (cantidad de intervenciones).

Para sitios no raleados se obtuvieron tres clases de sitio: muy buena, buena y regular. En sitios con una intervención silvícola (raleo) se consideró a los valores BLUP's positivos como sitios de crecimiento superior a la media poblacional y a los de signo negativo, un crecimiento inferior para las variables DAP y HT.

Contemplando la variación espacial, se observaron que entre las distintas intensidades de raleo no existen diferencias estadísticamente significativas. Esto valida el concepto y finalidad del raleo: efectuado redistribuye la densidad y espaciamiento para favorecer a los arboles selectos en mayor DAP y HT del turno de corta, mejorar la sanidad y calidad del lote. Los resultados de esta investigación servirán como una herramienta más al momento de evaluar la mejor combinación entre el manejo silvícola de *E. grandis*, el tipo de producto y los volúmenes deseados para alcanzar el o los objetivos productivos en un determinado plazo.

**Palabras clave:** *Eucalyptus*, Manejos silvícolas, efecto de sitio, correlación espacial.

## ABSTRACT

### EFFECT OF RALEO ON GROWTH OF *Eucalyptus grandis* (H.) ex Maiden STANDS FOR THE SOUTHERN REGION OF ARGENTINA MESOPOTAMIA

Has its *E. grandis*. plantations subjected to different forest management to obtain higher productive yields. Thinning is the activity that focuses on increasing the growth of selected individuals and homogenizing the rodal in health, quality and quantity.

The purpose of this study is to address the modeling of *E. grandis* growth in thinned and non-thinned stands.

The results of this research will serve as a tool more at the moment of evaluating the best combination between the forestry management, the type of products and the volumes desired to achieve the productive goal (s) within a certain time frame.

The modeling of the growth in height and diameter, was developed with mixed linear models and taking into account the quality of the site in the presence of thinning or not. The site quality indices were calculated using the BLUP methodology for a mixed model with random site effect, then worked with the modeling of the possible spatial correlation of growth to improve the efficiency of the comparison of the growth of stands with different management strategies.

The heterocedastic linear mixed model with spatial correlation is a good estimator of population means of diameter and height, valid for both thinned and unthinned stand sites where data were collected.

The analysis of the effect of thinning was carried out only in the sites with a single intervention, as well as in the data included in the initial density of 1.000-1.100 pl/ha, as it has more information for the study of the models and because it is the density at which afforestation is generally carried out in the region.

In sites without thinning, three site types were obtained: very good, good and fair. In sites with thinning, positive BLUP values were considered as sites with a higher growth than the mean of the population and those with a negative sign were considered as sites with a lower growth for the evaluated variables.

In the analysis of spatial variation, it was observed that there are no statistically significant differences between the different thinning intensities. This validates the concept and purpose of thinning: carried out to redistribute density and spacing to favor selected trees in greater diameter and height at the end of the cutting shift, improve the health and quality of the lot.

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1. Rodales forestales implantados**

Un rodal forestal puede ser comprendido como una unidad de manejo, constituida por un conjunto de árboles con características similares como la especie, edad o estructura. Los rodales se pueden diferenciar entre sí caracterizándolos a través del tiempo mediante observaciones, mediciones y/o inventarios de los árboles, obteniendo información de las variables de interés como la altura, diámetro a la altura de pecho "DAP", presencia de fallas y sanidad (Cancino, 2006). De acuerdo a la clasificación de Donoso Zegers (1998), se puede tener rodales: mixtos o monoespecíficos, coetáneos o multietáneos, intervenidos o no. La rodalización es una herramienta fundamental para la toma de decisiones en la silvicultura de las plantaciones comerciales, permitiendo al productor forestal planificar y cuantificar los recursos necesarios para el manejo de los mismos (Reque y Pérez, 2011).

### **1.2. Raleo en rodales**

El raleo es una intervención silvícola que disminuye la cantidad de árboles de un rodal, favoreciendo el crecimiento de los individuos remanentes para que los mismos desarrollen mayores diámetros medios a un turno de corta menor y, en consecuencia, lograr un retorno anticipado del capital. El raleo también puede mejorar la sanidad rodal, eliminando árboles enfermos, dominados, bifurcados, deformados o torcidos, homogenizar el tamaño y forma del rodal y regular el desarrollo de los individuos para mejorar la calidad de madera destinada a industrias del aserrío y/o debobinado (Bonnin et al., 2015).

Según Gajardo Caviedes (2005), el raleo puede clasificarse: en pre-comerciales o perdidos (eliminan individuos sin valor comercial) y los comerciales en los que se extraen árboles aprovechables para obtener retornos económicos intermedios antes de la corta final. El productor forestal puede optar por realizar: a) raleo por lo bajo (descartar oprimidos y dominados, favoreciendo a las clases superiores), b) raleo por lo alto (remoción de dominantes y codominantes), c) raleo sistemático (extracción de hileras sin importar calidad o sanidad, respondiendo a un ordenamiento a priori para su posterior aprovechamiento), d) raleo

selectivo (selección de árboles de acuerdo a un determinado criterio), o e) raleo libre (combinación de los anteriores) (Reque y Pérez, 2011). Cualquiera sea el tipo de raleo que se realice en los rodales se necesita de una planificación de los recursos dependiendo de los productos finales a obtener; esto también sujeto al momento oportuno de raleo, el que varía de acuerdo a la edad del rodal, sitio y situación del mercado (Aguerre et al., 1995).

### **1.3. Raleo y crecimiento**

El raleo es una intervención silvicultural que reduce gradualmente el número de árboles por hectárea para concentrar el crecimiento en los mejores individuos (Sotomayor Garretón et al., 2002). El empleo del raleo durante la vida de la forestación permite al productor obtener rollos de mayor diámetro medio, homogeneizar el tamaño y la forma de la forestación, mejorar la sanidad del rodal, reducir el turno de corta, y económicamente provee un retorno financiero a mediano plazo de la venta del producto obtenido en el raleo (Archila, 2014). El raleo estimula un efecto de la aceleración del crecimiento, donde los árboles remanentes aumentan en diámetro y altura a consecuencia de un mejor aprovechamiento de los recursos.

En raleos juveniles, se produce un mayor efecto de aceleración del crecimiento antes del punto culminante del incremento corriente en volumen, después pasa a tener tasas decrecientes (Glufke et al., 1997). El momento oportuno de ralear está definido por la dinámica del rodal, principalmente cuando se presenta una fuerte competencia entre los árboles por el entrecruzamiento de las copas y disminución del sotobosque por la escasa luz que llega al suelo (Meza Montoya y Torres Córdoba, 2006). Se recalca que en ninguna parte se establece a modo de receta a qué edad se debe efectuar el raleo, siendo este particular para cada situación (especie implantada, calidad de sitio, recursos económicos y humanos), pero si se mencionan experiencias o recomendaciones realizadas por investigadores. Galloway (1993) expresa que, para especies de rápido crecimiento en plantaciones con una densidad inicial de 1.111 plantas por hectárea (pl/ha), es recomendable ralear el 50% del rodal cuando este alcance 7-9 metros de la altura total promedio.

Uno de los primeros esfuerzos significativos para modelar los efectos del raleo en el crecimiento de los rodales fue llevado a cabo por el investigador noruego Aksel Langsaeter a mediados del siglo XX. Su modelo, conocido como la "ley del crecimiento máximo", establecía que la producción total de madera por hectárea se mantenía relativamente constante

independientemente de la intensidad del raleo, hasta alcanzar un punto crítico. Después de este punto, cualquier incremento en la intensidad del raleo comenzaba a disminuir la producción total de madera (Langsaeter, 1941). Este modelo fue revolucionario en su tiempo y proporcionó una base teórica esencial para entender la relación entre la densidad del rodal y la producción maderera (Assmann, 1970; Zeide, 2001).

Sin embargo, con el avance de la investigación forestal y la creciente comprensión de la complejidad de los ecosistemas, el modelo de Langsaeter ha sido superado por enfoques más sofisticados. Una de las principales limitaciones de este modelo fue su simplificación excesiva, ya que no tiene en cuenta factores críticos como la variabilidad del sitio, las diferencias entre especies, las condiciones climáticas, y la heterogeneidad dentro de los rodales (Pretzsch, 2009). Además, el modelo asume que el crecimiento y la producción se comportan de manera uniforme, lo que no refleja la realidad de los sistemas forestales, donde los árboles responden de manera diferente a las intervenciones silviculturales dependiendo de una multitud de variables (West et al., 2014). En la actualidad, nuevos modelos estadísticos han reemplazado en gran medida al modelo de Langsaeter debido a su capacidad para capturar esta complejidad y variabilidad, ofreciendo un entendimiento más profundo y preciso de los sistemas forestales, lo que permite una gestión más eficaz y sostenible para los silvicultores (Cieszewski, 2002; Robinson & Wykoff, 2004).

Para comprender los cambios de las tasas de producción maderera en rodales raleados o no, se necesita de estimaciones confiables del crecimiento, las mismas deben facilitar la planificación de las tareas silviculturales, la toma de decisiones a nivel empresarial y definición de la corta final (Abellanas et al., 2007). Por ello, desde mediados de 1960 y a lo largo de estos años se han empleado modelos estadísticos a escala rodal para la evaluación del crecimiento que fueron evolucionando, a modo de simular o medir los efectos de distintas estrategias de manejo, empleando relaciones entre variables como la altura total, DAP, área basal y volumen, con un conjunto de variables predictoras, entre las cuales se destacaron la edad y la calidad de sitio (Prodan et al., 1997).

La modelación estadística contemporánea del crecimiento de un rodal se basa en distintos tipos de herramientas, entre los que se encuentran los modelos mixtos, es decir modelos con patrones o tendencias modeladas por efectos fijos y con efectos, usualmente relacionados a las desviaciones individuales respecto al patrón promedio, tratados como aleatorios (West et al., 2014; Stroup et al., 2015). Carrero et al., (2008), usando modelos mixtos desarrolló curvas de índice de sitio para rodales de *Eucalyptus urophilla* en Venezuela, partiendo de datos longitudinales de altura en función de la edad, provenientes de parcelas

permanentes. Jerez et al., (2011) también usaron modelos mixtos para desarrollar curvas de índice de sitio para *Tectona grandis* con datos de parcelas permanentes y temporales. Los resultados mostraron menor sesgo y mayor precisión cuando se usaron modelos mixtos comparados con otros modelos, en este caso la tendencia del crecimiento promedio poblacional fue ajustada con un modelo no lineal. La incorporación de una componente aleatoria para los distintos sitios donde se desarrollan los rodales, permite obtener una curva guía diferente para caracterizar los diferentes patrones de crecimiento a nivel poblacional y predecir los incrementos en plantaciones o rodales no utilizados en el ajuste (Jerez et al., 2011). Si bien los modelos mixtos, ya sean lineales o no lineales, son aplicables a distintos tipos de ecosistemas forestales y a diferentes especies, no existen validaciones de su implementación en rodales de *E grandis*. como los instalados en la Mesopotamia Argentina.

En particular, el crecimiento de *E grandis*. ha sido modelado a partir de ecuaciones empíricas simples que permiten predecir el crecimiento, por ello, Ingaramo y García Maritano (2006) señalaron la necesidad de validar los modelos de producción y crecimiento ya desarrollados para esta especie en la región sur de la Mesopotamia Argentina. Ingaramo y García Maritano (2006) realizaron la validación de distintas funciones de volumen, sitio y forma, incluídas las del simulador SIS eucalipto (desarrollado por EMBRAPA, 2001), con datos de la región mesopotámica provenientes de rodales con distintos manejos, donde los resultados indicaron que para la estimación de volumen la fórmula que mejor respondió a las condiciones de la Cuenca del Río Uruguay fue la de Fassola et al., (2007), mientras que para el índice de sitio la fórmula que mejor se adaptó fue la de Glade (1999). No obstante, la información usada en estos desarrollos proviene de raleos llevados a cabo en la región sur de la Mesopotamia Argentina.

Según Crechi et al., (2011), el efecto del esquema de raleo elegido no podría ser el mismo según la calidad de sitio, siendo importante establecer la calidad de sitio de las plantaciones a fines de expresar la mayor potencialidad productiva y económica. El Índice de Sitio (IS) se define como la altura dominante promedio de un rodal a una edad base o edad índice (Ei) (Crechi et al., 2011). El crecimiento de las plantaciones no solo se ve influenciado por la calidad de sitio, sino que también influye la variabilidad entre individuos dentro de una misma parcela afectando así también su respuesta a los distintos manejos. Cada individuo responde de manera distinta al otro, esas diferencias se encuentran en la información genética contenida en sus células (Sotolongo Sospedra et al., 2000). Además, cada individuo posee una capacidad de crecimiento distinta, la que está condicionada por la disponibilidad espacial en relación a su tamaño, debido a la interacción presente entre árboles vecinos y la calidad del sitio (Bravo, 2008).

#### 1.4. Rodales de *Eucalyptus* y producción

El género *Eucalyptus* pertenece a la familia de las Mirtáceas y es originario de Australia, Tasmania y de las islas indo-malasias. Se lo considera un árbol de gran porte, de rápido crecimiento, pudiendo alcanzar una altura total de hasta cien metros y un diámetro de 2 metros, posee hojas colgantes, lanceoladas, aromáticas, de flores de color blancuzco, cuyos frutos son capsulas con semillas marrones en gran número (FAO, 1981). Según Barreiro Mouriz (2003), el *Eucalyptus* se caracteriza por ser un género multifacético si la gestión forestal es sustentable, brinda beneficios ambientales como: eficiencia en la captura de dióxido de carbono y generación de oxígeno debido a su alta tasa de crecimiento y recuperación de suelos degradados (sus hojas y ramas actúan como nutrientes), sus flores son fuente de polen para las abejas y otros insectos melíferos; además de los beneficios industriales (madera apreciada por sus propiedades mecánicas, físicas y químicas en las industrias celulósicas y en el aserrío).

A nivel mundial el género *Eucalyptus*, es uno de los recursos arbóreos más utilizados para forestar por sus cualidades de crecimiento rápido y turno corto. En Europa y Asia lo emplean principalmente para la industria celulósica; en Sudáfrica el 59% de la producción se destina a minería. Desde la FAO (2002) se registran solo para Latinoamérica casi cinco millones de hectáreas plantadas. En países como Chile, Brasil y Uruguay constituye la base de la industria forestal FAO (2015).

En la Argentina el *Eucalyptus* fue introducido en 1857 solo para fines ornamentales y de protección de los establecimientos agrícolas (cortinas rompeviento y protección de casas). En la región Mesopotámica se reconoce dos vías: en Misiones desde Brasil y en Entre Ríos desde Australia. Las primeras plantaciones industriales realizadas pertenecientes a Celulosa Argentina S.A datan de 1946 (Aguerre et al., 1995). Actualmente en la Argentina hay 255.003 hectáreas forestadas con el género *Eucalyptus*, de las cuales el 88,5 % están localizadas en la Región Mesopotámica: en Entre Ríos, 112.785 ha (Área SIG e Inventarios, Subsecretaría de Desarrollo Foresto Industrial, 2016), en Corrientes, 138.200 ha (Dirección de Recursos Forestales, Provincia de Corrientes, 2016) y en Misiones 10.557 ha (MAGyP, 2015).

La plantación de *Eucalyptus* en la región Mesopotámica se inició a mediados de 1950 de manera de satisfacer la creciente demanda de envases de madera empleados en citricultura e industria celulósica. Años más tarde, en 1998 de manera de promover y aumentar la superficie forestal en Argentina y a su vez en la región Mesopotámica, el Gobierno Nacional sancionó la Ley Nacional de Inversiones para Bosques Cultivados N° 25.080, que otorga

beneficios fiscales y un beneficio económico no reintegrable para las distintas etapas de la plantación hasta la corta final (Aguerre et al., 1995), permitiendo posicionar la madera de *Eucalyptus* en el mercado de postes y madera larga aserrada (Mastrandrea et al., 2016).

En la actualidad, la madera aserrada tiene tres destinos teniendo en cuenta su transformación y posterior uso: a) madera redonda, que es absorbida por el mercado interno para postes, construcción de cabañas de troncos, construcciones rurales, cabreadas de techos, muebles rústicos, tutores y espalderas para cultivos, entre otros, b) Madera para transformación primaria (aserrado, debobinado y faqueado), para la obtención de tablas, tirantes y vigas, y c) Madera para remanufactura empleada para la producción de embalajes, pallets y cajones (Mastrandrea y Baccon, 2011; Mastrandrea et al., 2014).

### **1.5. Manejo silvícola en la Mesopotamia argentina**

Meza Montoya y Torres Córdoba (2006) detallan que desde la implantación *in situ* hasta la corta final de los rodales, las tareas silvícolas que los productores forestales realizan incluyen fertilización, desmalezado, control de hormigas y podas a distintas alturas de acuerdo al objetivo de la plantación, como también lo menciona el Instituto Forestal de Chile (1998). Otra actividad que de a poco se va incorporando para aumentar la cantidad de madera gruesa a obtener al turno de corta es el raleo. Como en párrafos anteriores se mencionó, y lo vuelve a recalcar Meza Montoya y Torres Córdoba (2006), el raleo se puede efectuar en tres tiempos: el primer raleo se realiza cuando hay fuerte competencia de los individuos, manifestándose cierre de las copas del rodal, es decir en sus primeros años de vida, en el que se eliminan aquellos individuos dominados y/o enfermos, donde casi no es posible obtener una productividad comercial a menos que los mismos sean destinados a la industria celulósica; el segundo raleo se efectúa cuando las ramas de los árboles se entrecruzan nuevamente, y el tercero, si fuese necesario, para obtener al final del turno un máximo por hectárea de 200 árboles de buena calidad; estos dos últimos raleos, menos intensos que el primero, generan trozas para aserrío.

En la región noreste de Entre Ríos las plantaciones comerciales de *Eucalyptus* abastecían solo la demanda de envases de madera para citricultura, con altas densidades iniciales (1.600 pl/ha) sin ningún tipo de manejo. A medida que el mercado de aserrío se fue consolidando en la zona, este requería árboles de mayor diámetro, permitiendo al productor

destinar su madera al mercado con un mejor precio al momento de la cosecha (Mastrandrea et al., 2016). La valorización de la madera para uso sólido de alta calidad se sustenta de la dinámica de la demanda y la diferenciación de los productos, convirtiendo al raleo en una de las tareas silviculturales indispensables (Larocca, 2004). A modo de un poco de historia, ya en 1995, Aguerre, et al., (1995), se plantea un esquema de raleo para *E. grandis* destinados a producir madera de gran diámetro para densidades iniciales de 1.000-1.200 pl/ha, en el que las edades de intervención para los raleos son: primer raleo a los 2-3 años, segundo raleo 5-6 años, tercer raleo a los 8-9 años.

En la región Mesopotámica se han realizado diversas experiencias del efecto de los raleos en plantaciones, como los ensayos de raleos tempranos de *E. grandis* (Methol, 2002), donde se observó evidencia de mayor crecimiento diamétrico en las parcelas con raleo más intenso, a siete meses de aplicado el raleo. Asimismo, los resultados experimentales de un raleo en pino, a los 15 años mostraron que a mayor intensidad de raleo resulta en un aumento en el diámetro medio (Crechi et al., 2005). En un ensayo de raleo en pino Crechi et al., (2005) no encontraron diferencias significativas entre las alturas promedio de distintos tratamientos de intensidad y oportunidad de raleo, aunque observaron que la altura tiende a disminuir al aumentar la intensidad de raleo. Al examinar la intensidad y el número de raleos de *E. grandis*, Methol (2002) observó un mayor aumento de altura en las parcelas con raleo intermedio y un aumento menor en las parcelas sin raleo como en aquellas con mayor intensidad de raleo. Sumado a los efectos de los efectos del raleo, es necesario monitorear el crecimiento de cada uno de los individuos y del rodal, dado que la respuesta en crecimiento de los rodales puede variar entre los sitios debido a las características propias de cada uno.

Por otra parte, los resultados de Díaz Bravo et al., (2012) demostraron que en *Eucalyptus nitens* con dos raleos (a los 7 y 9 años), el DAP promedio post-raleo a los 15 años con densidades de 300-400 pl/ha fue significativamente mayor que en los lotes sin intervención silvícola (1.070 pl/ha), observando además que el raleo no afectó la altura de los árboles, aunque para esa variable manifestó una tendencia decreciente a bajas densidades. Un estudio similar para esa especie por Muñoz et al., (2005) detectaron que en tratamientos a densidades residuales de 300-400 pl/ha la altura tiende a ser mayor.

En un ensayo de diferentes esquemas de intensidad y oportunidad de raleo para *E. grandis* en Entre Ríos Mastrandrea et al., (2016) señalan que un único raleo, bajando la densidad de 1.111 a 300 pl/ha, presenta una rentabilidad mayor para los turnos de corta de 10, 12 y 16 años, obteniendo mayor cantidad de trozas de diámetro en punta fina mayores de 26 cm de diámetro, que son las de precio más alto. Además, mencionan que mercados con

tipificación de productos y la disponibilidad de rodales en sitios de alta calidad son algunas de las condiciones que propiciarán el manejo con raleos.

En la actualidad, las forestaciones tienen un objetivo multipropósito, lo que hace que el raleo sea esencial para la diferenciación de productos y la valorización de la madera destinada a usos de alta calidad (Larroca, 2004). Sin embargo, la correcta ejecución del raleo depende de su realización en momentos muy precisos del ciclo de crecimiento del rodal, específicamente cerca del punto de máximo incremento corriente anual (ICA). Este momento es crucial para maximizar el impacto positivo en el crecimiento y la calidad de los árboles remanentes, lo que resulta en un producto final de mayor valor. Si los raleos no se realizan en este momento óptimo, la respuesta al manejo podría no ser la esperada, afectando tanto el volumen de producción como la calidad de la madera (Kolln, 2000; Zeide, 2001).

La posibilidad de reorientar el manejo en función de las fluctuaciones del mercado o los requerimientos de la industria está limitada por la necesidad de llevar a cabo los raleos en el momento adecuado. En nuestro país, la inestabilidad de los mercados forestales puede hacer que la planificación a largo plazo sea un desafío, lo que a su vez dificulta la toma de decisiones estratégicas sobre el momento y la intensidad del raleo (Bertomeu et al., 2011). Además, la falta de mano de obra calificada es un problema recurrente que afecta la correcta ejecución de los raleos. Este déficit en la capacitación y disponibilidad de trabajadores especializados puede llevar a la realización tardía o incorrecta de los raleos, lo que compromete la productividad y la calidad del rodal (Cubbage et al., 2007; Pretzsch, 2009).

Otros factores, como las condiciones climáticas adversas y la falta de recursos técnicos, también pueden influir en la capacidad de realizar los raleos en el momento oportuno. Estas condiciones aumentan el riesgo de que las intervenciones silviculturales no se realicen según lo planificado, lo que tiene un impacto negativo en los resultados esperados (Assmann, 1970). Por lo tanto, aunque existe cierta flexibilidad en la reorientación del manejo para adaptarse a las fluctuaciones del mercado, la precisión temporal en la ejecución de los raleos sigue siendo fundamental para lograr los objetivos deseados en la producción forestal (Cieszewski, 2002; Robinson & Wykoff, 2004). No tener en cuenta estos factores puede resultar en una disminución significativa del valor económico del producto final, afectando la viabilidad económica de las forestaciones en un entorno de mercado ya de por sí volátil (Cubbage et al., 2007).

## **1.6. Crecimiento**

Se define crecimiento forestal como al aumento gradual de tamaño ya sea para un individuo (árbol) o una población (rodal) en un determinado periodo de tiempo medido en años (Loera- Martínez y Sepulveda-Jiménez, 2015).

El crecimiento en el árbol se manifiesta como una elongación y engrosamiento del fuste, ramas, raíces, cambios en el tamaño, forma y otros componentes; en cuanto al crecimiento de un rodal es el resultante del crecimiento experimentado de los individuos por unidad de superficie (hectárea) a través del tiempo, pudiéndose fácilmente extrapolar a la superficie total del rodal. De este último cabe destacar que el número de individuos varía a lo largo del tiempo por factores como mortalidad o raleos planificados, su evaluación se efectúa mediante medidas longitudinales en parcelas permanentes o temporales (Cancino, 2006).

## **1.7. Tipos de crecimiento**

En este trabajo se van a evaluar de acuerdo a lo que enuncia Bancalari y Muñoz Sáez (2005):

- Crecimiento en diámetro: es producto de la actividad del cambium durante el periodo vegetativo. El desarrollo diametral se ve afectado por varios factores como: el ambiente, la calidad de sitio, y el manejo. A mejor calidad de sitio mayor incremento diametral; mediante el manejo (raleos) se regula la densidad del rodal, puesto que este crecimiento es influenciado principalmente por su distribución espacial, a menor densidad mayor crecimiento diametral.
- Crecimiento en altura: es la respuesta de la división celular de la yema apical. Se considera como indicador de rendimiento potencial o productividad de un sitio y estatus competitivo. La altura se ve altamente influenciada por la calidad de sitio, no así por los demás factores como en el crecimiento diametral.

## **1.8. Crecimiento de rodales**

La evaluación de esta investigación se centra en un cultivo forestal monoespecífico implantado en un periodo de tiempo similar, donde los individuos pueden incluirse dentro de una sola clase de edad caracterizando al rodal como regular o basándose en la misma edad como masas coetáneas. Estos rodales tienen una duración determinada en el tiempo y al final del ciclo se recurre a la tala rasa de los arboles remanentes (Iturre y Araujo, 2006).

A medida que el rodal va madurando su estructura va cambiando con la edad, manifestándose una fuerte competencia entre los individuos, favoreciendo una disminución de estos por unidad de superficie sea de manera natural o influenciada por el raleo, además el diámetro medio del rodal aumenta, la reducción de la cantidad de árboles por unidad de superficie denota un cambio brusco en la distribución en el terreno (García Villabrille, 2015).

## **1.9. Factores que afectan el crecimiento**

Los principales factores que influyen el crecimiento de los rodales según Corvalán Vera y Hernández Palma (2006) son:

- Climáticos: viento, precipitaciones, temperatura, humedad, luz.
- Edáficos: características físicas y químicas del suelo, pH, profundidad efectiva, humedad, microorganismos.
- Topográficos: tipo de relieve, pendiente, latitud y altitud.
- Competencia: con otros individuos a su alrededor, otros organismos bióticos (animales, hombre, vegetación menor, entre otros).

De la competencia se puede mencionar que, al comienzo del ciclo del rodal, los individuos son distribuidos de manera uniforme sobre el terreno (marco de plantación, también denominado densidad, concepto anteriormente descrito en parraos anteriores), dado que los arboles compiten por espacio para expandir su crecimiento radicular y aéreo. Esta competencia se presenta a lo largo de toda la vida del rodal, pero a mayor edad aumento de volumen por árbol y mejores respuestas en el incremento en diámetro y altura. Los que tienen menor crecimiento o los más débiles (enfermos, tortuosos, etc.) son removidos mediante el raleo favoreciendo a los individuos remanentes (Masapanta, 2015).

El aumento de diámetro se incrementa a una menor densidad. Esto significa que, rodales con árboles más distanciados entre sí o que hayan sido raleados, tendrán un desarrollo diametral promedio mayor que las masas más densas o no raleadas. La competencia entre los individuos de un rodal afecta el crecimiento en diámetro, y no así el crecimiento en altura, porque se determina por las características propias del sitio en que se encuentra, la profundidad y las propiedades físico-químicas del suelo, precipitaciones, topografía, entre otros (Monserud, y Sterba, 1996; Davel y Ortega, 2003).

### **1.10. Modelación del crecimiento**

Conocer las fluctuaciones del crecimiento en altura y diámetro es fundamental para la toma de decisiones, gestión y planificación de los rodales a lo largo del turno. Por ello la estimación del crecimiento y la combinación de los factores de la producción, productos a obtener a distintas escalas y tratamientos, es una de las principales actividades realizadas del sector forestal Fernández Tschieder et. al, (2013). Ante la necesidad de predecir el crecimiento de los rodales y su respuesta a las intervenciones silviculturales con el ambiente, surgieron los modelos de crecimiento forestal, definidas según Vanclay (1994) como: “abstracción de la dinámica forestal natural de una unidad de estudio (árbol o rodal), abarcando crecimiento, mortalidad y otros cambios en el árbol o en la composición y estructura del rodal, empleando sistemas de ecuaciones que se ajustan a diversas condiciones” (Baluarte Vásquez, 2012).

La modelización forestal se sustenta en un conocimiento minucioso de la información que se pretende modelizar y un establecimiento a priori, y con la mayor exactitud posible, de los objetivos concretos que se intentan alcanzar (IUFRO, 2001).

Diéguez-Aranda et al. (2009) propone una clasificación de cuatro grupos de modelos:

- Grupo 1:
  - o De rodal: estiman la evolución de variables dasométricas, son los modelos más simples y poseen una gran robustez.
  - o De clases dimensionales: estiman el crecimiento por cada clase diametral o en área basal empleando la técnica del árbol representativo por clase.
  - o De árbol individual: estiman el crecimiento de cada individuo teniendo en cuenta la competencia, la cual puede ser dependiente o no de la distancia.

- Grupo 2:
  - o Estáticos: Los modelos no toman en cuenta directamente el incremento individual o del rodal. No evalúan la evolución en el tiempo, solo emplea la información de un solo inventario.
  - o Dinámicos: Tiene en cuenta la variación de las variables descriptivas a nivel rodal e individuo a través del tiempo. Estos modelos se construyen con al menos dos mediciones. Emplea un ajuste estadístico que contemple la evolución del crecimiento.
- Grupo 3:
  - o Determinísticos: generan siempre los mismos resultados ante iguales datos de entrada y funciones.
  - o Estocásticos: por cada simulación realizada se obtiene resultados distintos dado que se introduce un componente aleatorio al modelo.
- Grupo 4:
  - o Empíricos: emplean medidas de longitud, masa y tiempo.
  - o Basados en procesos: adicionan a las mediciones repetidas en el tiempo factores que interpreten la evolución fisiológica y ecológica del crecimiento (luz, índice de área foliar, etc.).
  - o Híbridos: es un modelo que fusiona los dos modelos anteriores.

En este estudio, se realizó un análisis detallado del desarrollo y aplicación de distintos tipos de modelos forestales, incluyendo modelos de rodal, modelos individuales, así como modelos dinámicos y estocásticos. Los modelos de rodal se utilizaron para evaluar el crecimiento y desarrollo de un conjunto de árboles como una unidad homogénea, lo que facilitó la gestión y planificación forestal a gran escala. Por otro lado, los modelos individuales se enfocaron en el análisis del crecimiento de árboles a nivel individual, permitiendo capturar con mayor precisión la variabilidad intrínseca de cada árbol dentro de un rodal.

Asimismo, se emplearon modelos dinámicos que incorporaron la variación temporal, permitiendo simular los cambios en el crecimiento de los árboles a lo largo del tiempo bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo. Los modelos estocásticos, por su parte, integraron elementos de aleatoriedad e incertidumbre, proporcionando estimaciones más robustas y realistas en escenarios de predicción a largo plazo.

En cuanto a las funciones de salida, estas se utilizaron para estimar de manera precisa el crecimiento en diámetro y altura de los árboles, dos de los indicadores más críticos en la

evaluación del rendimiento forestal. Dichas funciones permitieron modelar la relación entre las variables explicativas, como las condiciones ambientales y las prácticas de manejo, y las variables de respuesta, representadas por el crecimiento en diámetro y altura (García et al., 2018; Pukkala, 2019).

La combinación de estos enfoques modelísticos permitió obtener una visión integral del comportamiento de los rodales forestales y de los árboles individuales, contribuyendo a mejorar las estrategias de manejo forestal sostenible (Peng, 2000; Pretzsch, 2010).

### **1.11. Funciones de crecimiento**

El desarrollo y progreso tanto en la tecnología como en la estadística forestal han permitido avances significativos en el procesamiento simultáneo de múltiples variables independientes, lo que ha dado lugar a la creación de modelos de crecimiento forestal más sofisticados. Estos modelos no solo integran diferentes variables que influyen en el crecimiento de los árboles, sino que permiten una representación dinámica del desarrollo forestal a lo largo del tiempo, capturando así la complejidad inherente a los ecosistemas forestales (Castedo-Dorado et al., 2007). En este contexto, las funciones de crecimiento se han convertido en una herramienta esencial para la predicción de variables dasométricas, tales como el diámetro, altura y área basal de los árboles, permitiendo una estimación precisa año por año del crecimiento individual o del rodal completo (García Villabrille, 2015; Pienaar & Turnbull, 1973).

En los rodales coetáneos homogéneos, el crecimiento se suele estimar utilizando factores clave como la densidad, la edad y la calidad de sitio, los cuales son determinantes para proyectar el rendimiento final según los objetivos de producción forestal. Este enfoque se apoya en la teoría de los modelos de producción que correlacionan estas variables con el volumen de madera disponible al final del turno de producción (Clutter et al., 1983). La información requerida para alimentar estos modelos puede ser obtenida de parcelas temporales o permanentes; sin embargo, la mayor precisión en la predicción del crecimiento se logra mediante el uso de inventarios cronológicos completos, que recogen datos de todos los rodales desde el establecimiento de la plantación hasta la tala rasa (García, 2013). Este tipo de monitoreo continuo permite ajustes más finos a los modelos de crecimiento y asegura una mejor planificación a largo plazo (Vanclay, 1994).

En consecuencia, para garantizar la precisión de las predicciones, es crucial implementar un monitoreo continuo y sistemático del o los rodales, lo que incluye la actualización periódica de los inventarios forestales y la incorporación de nuevas tecnologías de análisis espacial, como los sistemas de información geográfica (SIG) y las imágenes satelitales, que mejoran la capacidad de seguimiento y evaluación del crecimiento en rodales forestales (Mora et al., 2006).

### **1.12. Calidad de sitio en el crecimiento**

Se define calidad de sitio a la potencialidad productiva de un determinado sitio en un tiempo dado, reflejada en producción maderera para satisfacer factores económicos y de mercado. Su determinación se puede cuantificar por dos métodos: a. indirectos, emplean estimaciones provenientes de la vegetación que se encuentra por debajo del dosel forestal o de factores topográficos, edáficos y climáticos; b. directos, hacen una clasificación de inventarios históricos de producción, volumen o altura de árboles dominantes y codominantes. Este último, comenzó a emplearse en Alemania en el siglo XVII y es hasta la fecha es el más aceptado y utilizado (Crechi, et al. 2011).

La calidad de sitio está definida cuantitativamente por el índice sitio (IS), como se mencionó anteriormente es una medida de potencial de producción para una determinada especie y sitio, siendo la de mejor calidad de sitio mayor producción. Los modelos IS hacen posible la cuantificación productiva de cada rodal evaluado, establecer sitios excelentes hasta deficientes y efectuar comparaciones entre los mismos (Pezzuti, 2014).

El IS hace empleo directo del crecimiento en altura de los arboles dominantes, dado que no se ve casi afectada por la densidad del rodal y los raleos intermedios, ofreciendo además una correlación elevada con el volumen final. Por otra parte, el IS es una adaptación de las curvas de crecimiento entre la edad y altura dominante del rodal (Contreras, 2007).

En el mundo, las forestaciones con el género *Eucalyptus* han ido en aumento por las cualidades de su madera antes mencionadas, es de conocimiento general que la Mesopotamia argentina es la región con más superficie implantada de esta especie por lo que la determinación del IS es de vital importancia el manejo silvicultural que permita obtener mayores niveles de producción (Crechi et al, 2011).

Las primeras estimaciones de IS para *E. grandis* en Entre Ríos y Corrientes empleando el método de la curva guía (Clutter et al., 1983) dieron como resultado curvas anamórficas que proporcionaron valores estimativos sin tendencia para la altura dominante en las calidades de sitio establecidas dentro del área cubierta por el estudio (Glade, 1999).

Crechi et al., (2011) dividieron a la región Mesopotámica en dos zonas agroecológicas para la correcta aplicación de IS de acuerdo a la base de datos empleada, basándose en el polimorfismo y las alturas invariantes dependientes de la edad índice. El modelo anamórfico basado en el ajuste de la función de Chapman Richards mediante el método de la curva guía se ajustó más apropiadamente para la zona agroecológica Misiones-Noreste de Corrientes; por el contrario, para la zona Concordia-Monte Caseros el modelo de Schumacher ajustado por el método de aproximación algebraica diferencial (ADA) presentó mejor respuesta.

Murillo- Brito et al., (2017), han empleado el modelo Hossfeld IV para el IS de *Cedrela odorata* estableciendo tres calidades de sitio para edades comprendidas entre los 4 y 12 años de plantación, permitiendo a los silvicultores seleccionar mejores condiciones de establecimiento y desarrollo de futuras forestaciones.

El avance de la estadística en los últimos tiempos ha hecho que los modelos puedan adoptar otras formas de calculo que sean más acordes a las características propias de la determinación del IS, como lo demuestra Salgado (2011) creó curvas de IS para plantaciones jóvenes de *Tectona g.* en Guatemala usando de base de datos parcelas permanentes y ajustando el modelo de Schumacher con modelos lineales mixtos que le permitió el análisis de la relación existente entre la altura dominante con la edad.

La introducción de los modelos lineales mixtos tiene en cuenta la estimación de efectos fijos, efectos aleatorios y de predictores lineales. En este estudio se considera a los sitios como efecto aleatorio, por lo que la determinación de la calidad de sitio se desarrolló en el marco de la metodología BLUP (mejor predictor lineal insesgado), pudiendo este minimizar el error cuadrático medio de la predicción dentro del conjunto insesgado de predictores (Gregorie and Schabenberger. 2001; Balzarini et al., 2004).

Con la metodología BLUP para medidas repetidas en el tiempo se eleva la estimación y la exactitud de los valores obtenidos, siendo un proceso más dinámico considerando el efecto del tiempo, siendo las predicciones menos dispersas que las estimaciones debido que se produce un corrimiento de las predicciones hacia la media general de las observaciones (Balzarini et al., 2004).

### 1.13. Variabilidad espacial y empleo de la geoestadística en el crecimiento

El manejo sitio-específico (MSE) o agricultura de precisión (AP) tiene sus comienzos a principios de los años 90, cuyo concepto moderno se refiere a la gestión agrícola y/o forestal de variables georreferenciadas para potenciar el rendimiento de los cultivos, favorecer la sostenibilidad del sistema y mejorar la calidad de la producción (Bedendo, 2013). El conocer la ubicación o coordenadas espaciales de las unidades experimentales, permite modelar las variaciones a nivel local como global (Thomson, 1986; Mora y Ramírez, 2000; Morales et al., 2016). Además, favorece a crear información cartográfica (mapas) que representen de la forma más fiable posible la distribución de la variable experimental en el área de estudio; y posteriormente sea integrada a una base de datos SIG (Rozas y Camarero, 2005).

Para plantaciones forestales con especies de rápido crecimiento como el *E. grandis* solo se ejecutan a una gran escala de paisaje basándose en características sobresalientes del o los rodales sin el conocimiento sitio-específico de cada rodal (Pezzutti, 2014). Una silvicultura sitio específica o silvicultura de precisión (SP) puede mejorar la rentabilidad forestal, la productividad y el valor de las forestaciones, solo es necesario que los silvicultores potencien la información obtenida de cada porción del rodal.

La SP considera, que: la información geoespacial asista a la planificación y gestión forestal, las operaciones o intervenciones a efectuarse como también la aplicación de tecnología sitio-específica sean empleadas para satisfacer la demanda de productos de alto valor (Taylor et al., 2006). Emplear SP sobre cada porción del rodal apunta principalmente a focalizar la producción presente y futura, a fin de mejorar la productividad en la siguiente rotación (Pezzutti, 2014).

El mapeo de la variabilidad espacial de información georreferenciada en la SP mediante un software que integre diversas técnicas geoestadísticas en un solo ambiente de análisis, en un interfaz de usuario amigable, permite un mapeo rápido de las variables, extrapolación a contextos con intervenciones más grandes, obteniendo mapas predicción y error de sitios no medidos (Córdoba et al., 2015, Córdoba et al. 2019, Paccioretti et al., 2020).

Los mapas de variabilidad espacial univariados o multivariados identifican factores directos o indirectos que afecten a las variables de interés, como también señalar áreas o zonas similares para una mejor distribución de los recursos logísticos que se tienen en cuenta en la gestión agrícola sitio-específica (Moral, Terrón y Marques da Silva, 2010).

Para el sur de la Mesopotamia Argentina, se han recopilado electrónicamente los registros de las mediciones de parcelas permanentes y temporarias en rodales de *E. grandis*

que incluyen mediciones de DAP y altura total (HT) de cada árbol, el registro de las fechas (plantación, medición, raleo), como así también la cantidad de fallas, arboles dominados y rebrotes. Por año esta colección de información ha generado un gran volumen de datos, con más de un año de medición por parcela y por individuo.

El adecuado uso del gran volumen de datos, depende especialmente de la capacidad de exploración y modelación teniendo en cuenta la característica longitudinal de los datos y la presencia o no de interacción entre las variables. Cabe resaltar, que los datos longitudinales o medidas repetidas en el tiempo sobre la misma unidad de estudio presentan además el desafío de la modelación de las correlaciones temporales. Una alternativa para el modelado de este tipo de datos es emplear modelos mixtos, que contemplan las correlaciones entre observaciones provenientes de mediciones repetidas en el tiempo, ya sea con funciones lineales o no lineales para la estructura de las medias (Balzarini et al., 2015). Por otra parte, la introducción de efectos aleatorios en el modelado mixto permite incorporar la alta variabilidad existente entre las parcelas, mejorar no solo la bondad de los ajustes, sino también, las capacidades de las predicciones. En la actualidad, existen diversos softwares estadísticos para el análisis de estos modelos. Infostat (Di Rienzo et al., 2018), es un programa que trabaja con R (R Core Team, 2013), facilitando la estimación de los modelos lineales y no lineales con efectos aleatorios para una o más covariables.

## **1.14. Fundamentación e hipótesis**

### **1.14.1. Fundamentación**

El presente estudio tiene como propósito generar información necesaria para el manejo de plantaciones forestales con fines de producción maderera. El tema de tesis surgió de una demanda específica de los productores de la región. Los resultados de esta investigación servirán como una herramienta más al momento de evaluar la mejor combinación entre el manejo silvícola, el tipo de productos y los volúmenes deseados para alcanzar el o los objetivos productivos en un determinado plazo.

Por ello, este trabajo se centró en el modelado del crecimiento forestal utilizando herramientas contemporáneas, como los modelos lineales mixtos, que permiten capturar la variabilidad tanto entre sitios como dentro de un mismo sitio. Se puso especial atención en la calidad del sitio, un factor crucial en el análisis de crecimiento, especialmente en contextos donde se implementan diferentes regímenes de raleo.

Dada la naturaleza sigmoidea del crecimiento de los rodales, se empleó la función no lineal de Gompertz, ampliamente reconocida por su capacidad para modelar fenómenos de crecimiento en silvicultura. Esta función fue integrada en un enfoque de modelos lineales mixtos, lo que permitió ajustar de manera precisa las curvas de crecimiento, tomando en cuenta tanto efectos fijos como aleatorios asociados a diferentes sitios y tratamientos silvícolas.

Para mejorar la precisión en la evaluación de la calidad del sitio, se calcularon los índices de calidad utilizando la metodología BLUP (Best Linear Unbiased Prediction). Este enfoque permitió obtener estimaciones más confiables al incorporar un modelo mixto con efecto aleatorio de sitio, lo que facilitó la comparación del crecimiento de rodales sometidos a distintas estrategias de manejo. Además, esta metodología ayudó a identificar posibles compensaciones espaciales del crecimiento, optimizando así la eficiencia en el análisis comparativo entre los distintos tratamientos aplicados.

El tema de investigación se insertó en su momento en el marco de los siguientes proyectos INTA:

- Proyecto Regional de Enfoque Territorial Entre Ríos 1263305 “Contribuir al desarrollo socio económico del noreste de Entre Ríos, en un marco de competitividad, salud ambiental y equidad social”.

- Proyecto Nacional Forestal “Bases silvícolas para sustentar la productividad de las plantaciones y los recursos del ambiente”.
- Proyecto Nacional Forestal “Desarrollo de Modelos de Crecimiento y Producción forestal, Caracterización de la Calidad de los productos forestales y Economía Forestal”.

#### **1.14.2. Hipótesis de Investigación**

- Hipótesis 1: “Mayores incrementos en altura y diámetro al final de un turno en arboles remanentes de un rodal son consecuencia de la intervención del raleo”.

La hipótesis de que los mayores incrementos en altura y diámetro al final de un turno en árboles remanentes son consecuencia de la intervención del raleo está respaldada por el principio de acumulación de recursos y por evidencia empírica que demuestra un crecimiento acelerado de los árboles remanentes después del raleo. La intervención del raleo, al reducir la competencia y optimizar el uso de recursos, contribuye a un crecimiento más vigoroso (Sotomayor Garretón et al., 2002; Archila, 2014). El principio de acumulación de recursos sostiene que, al reducir la densidad de árboles, los árboles remanentes tienen acceso a una mayor cantidad de luz, agua y nutrientes, lo que se traduce en un aumento en su crecimiento en diámetro y altura (Glufke et al., 1997; Meza Montoya y Torres Córdoba, 2006).

Además, estudios empíricos han demostrado que el raleo realizado en el momento óptimo, cercano al punto de máximo incremento corriente anual (ICA), tiende a tener un impacto positivo en el crecimiento de los árboles remanentes (Galloway, 1993; Prodan et al., 1997). Sin embargo, para lograr los resultados esperados, es fundamental realizar el raleo en el momento adecuado y considerar factores adicionales que puedan influir en el crecimiento, como la variabilidad del sitio y las condiciones climáticas (Pretzsch, 2009; West et al., 2014).

- Hipótesis 2: “La calidad de la madera es influenciada por la alta variabilidad de sitios y el esquema de raleo elegido”.

La hipótesis de que la calidad de la madera es influenciada por la alta variabilidad de sitios y el esquema de raleo elegido se fundamenta en varias líneas de evidencia. La variabilidad de sitios, que incluye factores como el tipo de suelo, la disponibilidad de nutrientes y las condiciones climáticas, tiene un impacto significativo en el crecimiento y la densidad de los árboles, y por ende en la calidad de la madera producida (Pretzsch, 2009; Stokes & Song, 2013). Por ejemplo, los suelos ricos en nutrientes y las condiciones climáticas favorables suelen promover un mejor crecimiento de los árboles y, por lo tanto, una mayor calidad de la madera (Eberhart & Wood, 2006).

El esquema de raleo también juega un papel crucial en la determinación de la calidad de la madera. El raleo, que puede variar en intensidad y frecuencia, afecta la competencia entre los árboles y su desarrollo. Un raleo inadecuado puede resultar en una madera de menor calidad debido a un desarrollo subóptimo de los árboles restantes, mientras que un raleo bien planificado puede mejorar la calidad de la madera al permitir un crecimiento más vigoroso y uniforme de los árboles individuales (Warren & Halls, 1997; Dabs, 2000; Laroque, 2004). La correcta implementación del raleo asegura que los árboles tengan suficiente espacio y recursos para crecer adecuadamente, lo que se traduce en una mayor calidad de la madera (Cao et al., 2018).

Además, la interacción entre la variabilidad del sitio y el esquema de raleo puede resultar en diferentes resultados para la calidad de la madera. Un raleo que es efectivo en un tipo de suelo puede no ser adecuado en otro debido a las diferencias en la capacidad de crecimiento y la respuesta a las intervenciones silviculturales (Stokes & Song, 2013; Cao et al., 2018).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general:

Modelizar el crecimiento de rodales de *E. grandis* con diferentes esquemas de raleos en el sur de la Mesopotamia Argentina.

### 2.2. Objetivos específicos:

Objetivo 1: Modelar funciones de crecimiento de *E. grandis* en función de calidad de sitio.

Objetivo 2: Ajustar índices de calidad de sitio incluyendo variabilidad espacial intraparcela.

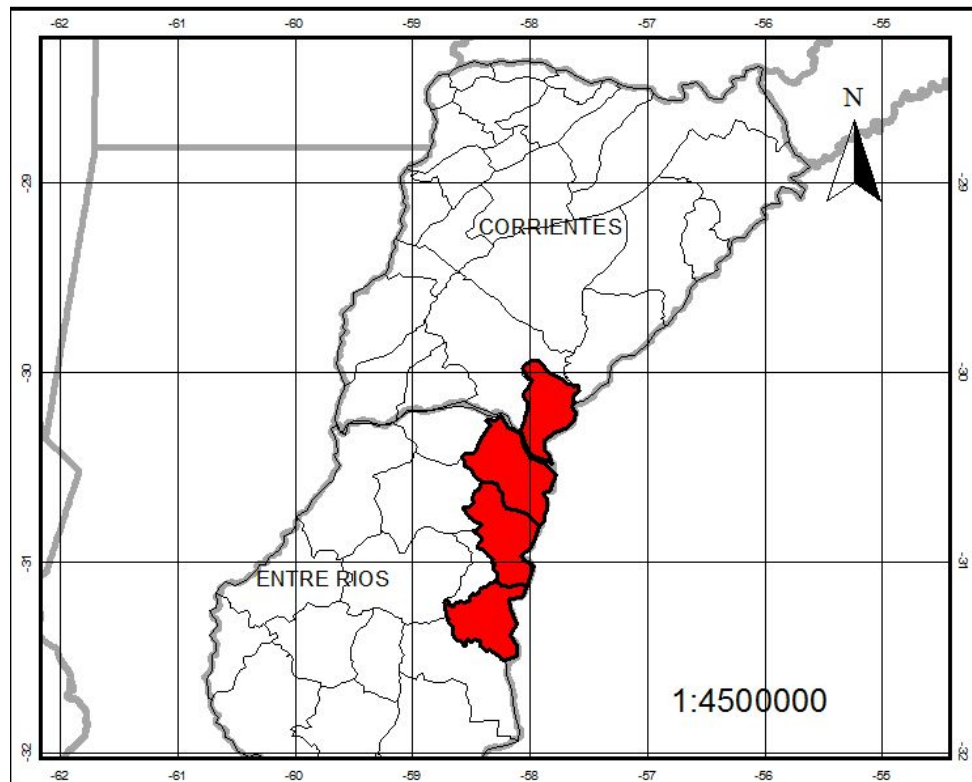
### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. Área de influencia

El área de influencia de este proyecto abarca el Sur de la Mesopotamia Argentina, comprendida por los departamentos Federación, Concordia y Colón, franja noreste de la provincia de Entre Ríos, sobre la costa del Río Uruguay y el departamento Monte Caseros en Corrientes; esto se debe a que, en los mismos se concentran la mayor cantidad de datos para esta evaluación, similares características climáticas, morfométricas y origen geológico de sus suelos, al igual que su cercanía regional. (Figura 1)

**Figura 1**

*Área de influencia del estudio*



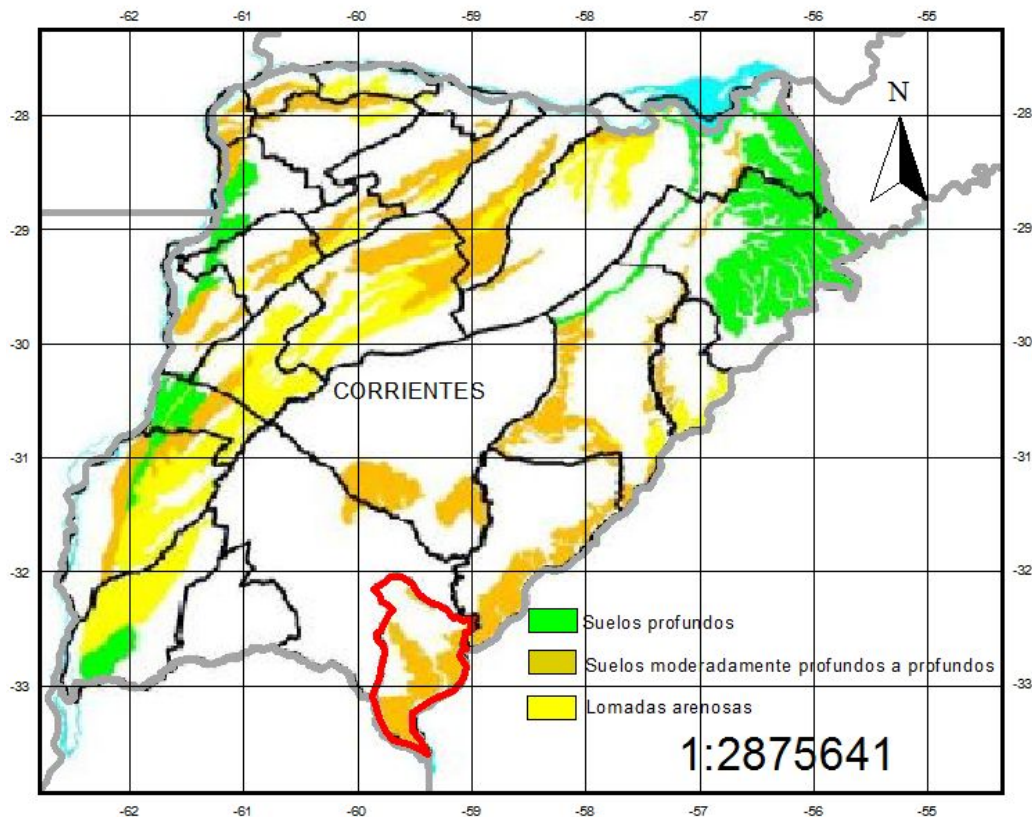
**Nota:** Mapa realizado por elaboración propia en base a shapfiles de Instituto Geográfico Nacional (SIG) en QGIS.

### 3.2. Descripción de los ambientes y los suelos

A nivel macroregión, el área de influencia presenta un clima templado; se encuentra ubicada dentro de la ecorregión del Espinal y Pampas (Dirección de Producción Forestal. MAGyP, 2015). La porción comprendida en Corrientes posee suelos en regiones altas, apropiados para el establecimiento y crecimiento de *Eucalyptus sp.* debido a su cualidad de adaptación a la limitación de drenaje. Presenta suelos bien drenados moderadamente profundos a profundos, con relieves característicos de lomas, cordones arenosos, terrazas a la vera de los arroyos y del Río Uruguay (Figura 2). Existe presencia de erosión moderada y encharcamientos breves (Acosta, et al. 2009; Ligier & Kurtz, 2014).

**Figura 2**

*Suelos del Departamento Monte Caseros. Prov. Corrientes*



**Nota:** Mapa realizado por elaboración propia en base a shapes de Instituto Geográfico Nacional (SIG) en QGis.

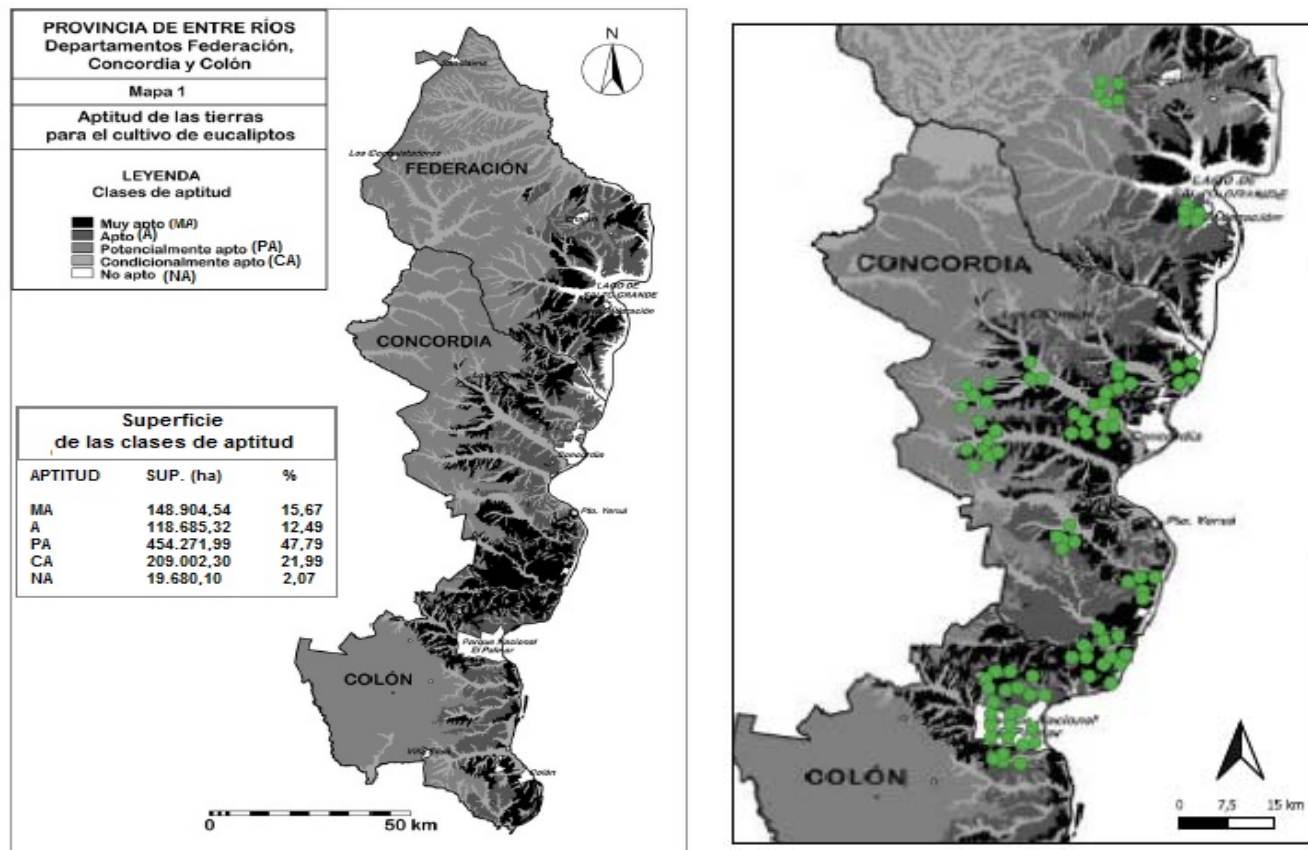
Los departamentos de Federación, Concordia y Colón en Entre Ríos presentan un relieve de planicies onduladas a suavemente onduladas y terrazas aluviales antiguos, de suelos bien drenados profundos a arenosos profundos y mestizos. Ambas porciones son suelos originados por depósitos eólicos y lacustres arcillo-limosos y arcillosos (Cruzate & Panigatti, 2008). Bedendo, (2013) evaluó los suelos de estos tres departamentos, teniendo en cuenta otros aspectos de importancia pudiendo así, caracterizar la aptitud forestal para eucaliptos. En base a ello definió cinco clases de aptitud:

- Muy apto (MA): tierras muy aptas para forestación, sin limitantes para este, o solamente con limitaciones menores que no reducen los niveles productivos, no requiere manejo forestal especial.
- Apto (A): tierras aptas para forestación, con limitaciones leves (presencia de erosión hídrica), que reducen leve o moderadamente los niveles productivos, requieren de prácticas de costos adicionales menores.
- Potencialmente apto (PA): tierras con aptitud restringida, con moderadas a severas limitaciones (elevados contenidos de arcillas expansibles, deficiente drenaje, erosión hídrica y fertilidad reducida), reduciendo los niveles productivos considerablemente, requieren manejos y tecnologías especiales.
- Condicionalmente apto (CA): tierras con limitaciones severas, que pueden ser corregibles a través de obras o mejoras (sistematización de ríos y arroyos, obras de infraestructura en zonas inundables, etc.), pero en sus condiciones actuales no lo son.
- No apto (NA): áreas misceláneas urbanas y otras, cursos de aguas, etc.

En la Figura 3 del lado izquierdo se puede observar las clases de aptitudes forestales, la superficie que representa y el porcentaje para cada una de ellas. En la misma figura del lado derecho, se observa el mismo mapa con la ubicación de los lotes en evaluación (se recuerda que en cada lote "macrositio" se distribuyen cada una de las parcelas en estudio). Como se observa, hay parcelas en todas las aptitudes mencionadas anteriormente.

**Figura 3**

Lado izquierdo: Mapa de aptitud de las tierras para cultivo del género *Eucalyptus* y la superficie comprendida en los departamentos Concordia, Federación y Colón, de la provincia de Entre Ríos. Lado derecho: Ubicación de los lotes (macrositios) donde se encuentran las parcelas en estudio en función de la aptitud forestal para los departamentos mencionados.



En la Tabla 1 se detallan las características climáticas del área de influencia. (Extracto de INTA-AACS-ArgenInta, 2008).

**Tabla 1**

*Características climáticas del área de influencia*

<b>Provincia</b>	<b>Departamento</b>	<b>TMA (°C)</b>	<b>ppMA (mm)</b>	<b>CHA (días)</b>
Corrientes	Monte Caseros	20-21	1400-1500	3
Entre Ríos	Federación-Concordia-Colón	18-19	1100-1300	4,6

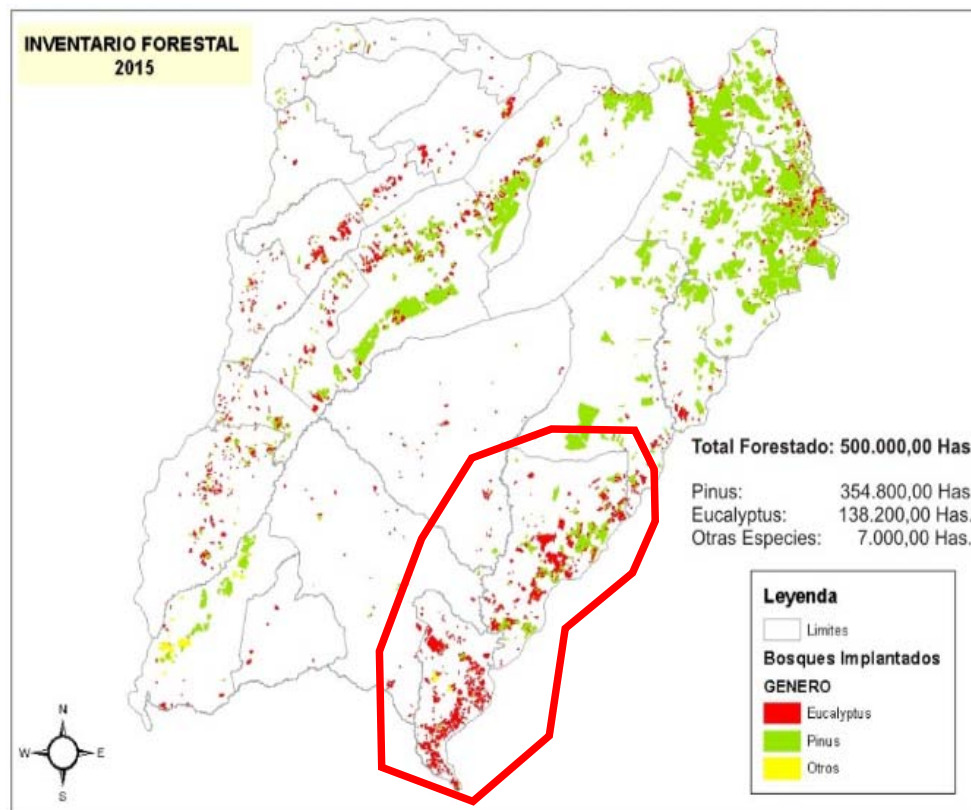
**Nota:** **TMA:** temperatura media anual, **ppMA:** precipitación media anual, **CHA:** cantidad promedio de días con heladas al año

### **3.3. Superficie forestada**

De acuerdo a la última actualización del inventario de bosques cultivados de la provincia de Corrientes (Dirección de Recursos Forestales. Ministerio de Producción. Gobierno de Corrientes, 2015), posee 500.000 ha. forestadas, de las cuales, 138.200 son de *Eucalyptus sp.*, los departamentos con mayor superficie con este género, son Monte Caseros que cuenta con aproximadamente 16.000 ha. junto con Paso de los Libres (30.000 ha), como se puede observar en la Figura 4.

**Figura 4**

*Superficie forestada por especie. Inventario Forestal 2015. Corrientes*

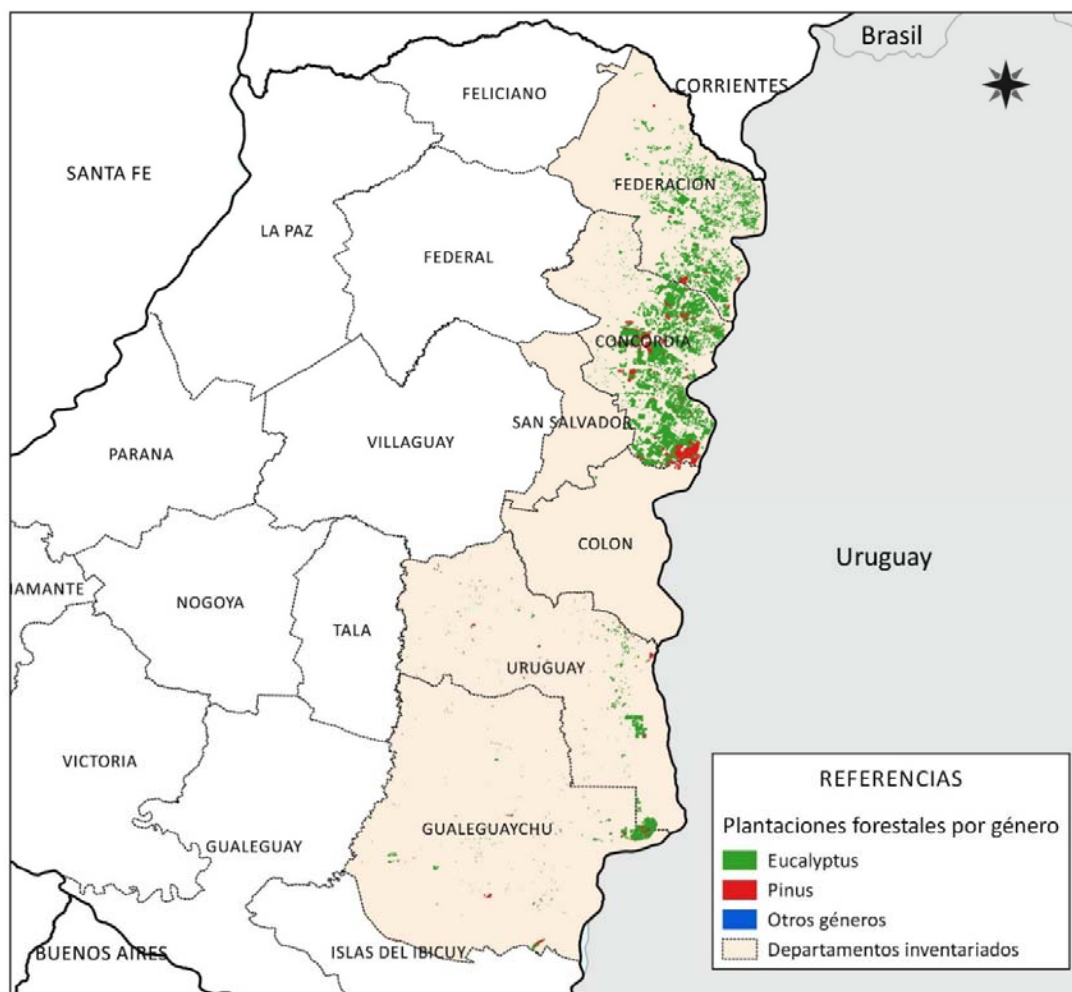


**Nota:** Mapa realizado por elaboración propia en base a shapes de Instituto Geográfico Nacional (SIG) en QGis, en el que se remarca los departamentos de la provincia de Corrientes en los que hay parcelas en estudio.

Para la provincia de Entre Ríos de las 154.000 ha forestadas, 131.600 ha se concentran en los departamentos Federación y Concordia para el género *Eucalyptus sp.* cómo se puede observar en la Figura 5 (área SIG e inventario forestal, Subsecretaría de Desarrollo Foresto Industrial, Ministerio de Agroindustria, 2016).

**Figura 5**

*Superficie forestada por especie. Inventario Forestal 2016. Entre Ríos*



**Nota:** Mapa obtenido del área SIG e inventario forestal, Subsecretaría de Desarrollo Foresto Industrial, Ministerio de Agroindustria, 2016.

### 3.4. Manejo silvícola

El periodo de plantación para *E. grandis* en la región se da principalmente en la primavera, finalizada la época de heladas, comprendida entre los meses de septiembre, octubre y la primera quincena de noviembre (Dirección de Producción Ftal. MAGyP, 2015, Ministerio de Agroindustria, 2020). Brizuela et al., 2004 explica que, las plantaciones se realizan manualmente, con densidades que oscilan entre las 900 a 1.600 pl/ha, cuyos distanciamientos más empleados en la región son 3 x 3, 4 x 2,5 y 4 x 3 m, empleando plantines de 25 a 30 cm de altura rustificados en vivero.

Larroca et al., 2004 explica que una adecuada implantación de la forestación influye positivamente en la futura producción, mejorando la homogeneidad de los rodales como así también que estos sean sustentables; se comprende de tres tareas esenciales:

- Preparación del terreno: tiene como objetivo principal proporcionar las mejores condiciones para el desarrollo óptimo de las plantas. La intensidad con la que se prepare el terreno va a depender de las características de cada sitio, por ejemplo:
  - a. Suelos arenosos sin limitantes con pendiente menor al 10%, consiste en aradas y disqueado, seguidas con una pasada de rastra de dientes (Dalla Tea, 1995).
  - b. Suelos arcillosos sin encharcamiento, se realiza subsolado hasta 40-80 cm de profundidad, requiriendo más fuerza de trabajo por parte de la maquinaria empleada para su realización (Dalla Tea, 2004).
  - c. Suelos bajos con exceso de humedad: se eleva el terreno sobre la línea de plantación (camellones) aumentando el volumen de tierra disponible para el desarrollo del sistema radicular (Aparicio et al., 2005).
  - d. Suelos con un ciclo forestal anterior: se desparraman los residuos en escolleras o sobre todo el terreno dejando limpia la línea de plantación. La descomposición de los residuos favorece a la retención de humedad, materia orgánica, nutrientes y mejores condiciones físicas del suelo; por otra parte, se puede realizar la quema de los mismos, pero en superficies determinadas en condiciones controladas de viento, humedad, etc. (Aparicio et al., 2005).
- Control de malezas: las malezas compiten agresivamente con la plantación por agua, nutrientes, luz, y espacio afectando el desarrollo y crecimiento de la misma, por lo que se realiza carpidas alrededor de las plantas o aplicación de herbicidas pre o post emergentes en la banda de plantación. Algunas empresas realizan el control de

malezas sobre las entrelíneas empleando rastra de disco teniendo cuidado de no cortar raíces, favoreciendo una pronta disponibilidad de nutrientes y humedad; y/o también control químico ofreciendo al suelo una protección. (Larroca et al., 2004). La realización de esta tarea es fundamental para obtener baja mortalidad de plantas, buen desarrollo y uniformidad de la plantación (Dalla Tea, 1995).

- Fertilización: dependiendo de las condiciones del terreno la fertilización puede mejorar el contenido de nutrientes del suelo, estimular un mayor desarrollo de las plantas y mejorar las condiciones del sitio, incrementando al final del ciclo la producción de madera (Dalla Tea y Marco, 1991).

La fertilización es una práctica que se recomienda en sitios con niveles muy bajos de fertilidad o suelos arenosos con niveles de materia orgánica por debajo del 2% y pobres en fósforo (< 10 ppm). Se emplean combinaciones nitrogenadas o fosforadas como fertilizantes, las cuales se pueden aplicar de acuerdo a los recursos con que cuenta el productor (manual o mecánica) durante la primavera-verano, siempre teniendo la precaución que los productos no tengan contacto directo con las raíces (Dalla Tea, 1993).

Otra tarea y no menos importante es el monitoreo y control de plagas o enfermedades, que al afectar a la plantación puedan ocasionar una disminución del crecimiento. También se deberá tener en cuenta durante los primeros meses de la plantación la reposición de fallas.

### **3.5. Origen de la información y base de datos**

Se emplearon datos de diámetro a 1,30 m (DAP, cm) y altura total (HT, m) proveniente de 515 parcelas permanentes con densidades iniciales (DI) comprendidas entre las 600 – 1.600 pl/ha (densidades comúnmente empleadas en la región) que contienen mediciones anuales, bianuales o plurianuales de lotes experimentales de INTA y en plantaciones comerciales con distintos manejos, (sin raleo= M0, 1 raleo= M1, 2 raleos= M2 y 3 raleos= M3) y superficies, facilitadas por empresas y productores forestales del área de influencia, comprendidas en el periodo 1975-2015, a estos lotes se los caracterizó como macrositios. Debido a la diversidad en la estructura y organización digital de los datos disponibles, se construyó una base de datos única que contiene todas las variables medidas y otras calculadas, necesarias para la caracterización de los rodales. Además, se corrigieron errores

de tipeo, se codificaron observaciones, se ordenaron según fechas de mediciones e intervenciones silvícolas realizadas en las parcelas, se identificaron codificando las parcelas, y se agregó toda aquella información que fuese importante. La base de datos fue semestralmente actualizada hasta el mes de Julio del 2017, momento en que se incorporaron las últimas mediciones de DAP y altura total. Los datos disponibles se consolidaron en una base de datos regional que incluye diferentes escenarios a lo largo del tiempo, esto permitió la exploración de los datos (Salvador Figueras y Gargallo, 2003). En la Tabla 2 se resume información clave de lo antes mencionado.

**Tabla 2**

*Resumen de origen e información de los datos*

<b>Aspecto</b>	<b>Descripción</b>
Cantidad de parcelas	515 parcelas permanentes
Periodo de observación	1975-2015. (ultima actualización de datos 2017)
Frecuencia de mediciones	Anuales, bianuales, plurianuales.
Superficie de parcelas	Desde 0,1 a más de 10 ha (dependiendo de la densidad inicial y los objetivos de cada una).
Origen de los datos	Lotes experimentales INTA y plantaciones comerciales bajo distintos regímenes silvícolas (macrositios)
Tratamientos silvícolas	Sin raleo (M0), 1 raleo (M1), 2 raleos (M2), 3 raleos (M3)
Manejo de datos	Integración en una base de datos única, con validación y consolidación de mediciones realizadas en diferentes momentos.

Teniendo en cuenta que la densidad inicial (DI) varía de 600 a 1.600 plantas por hectárea (pl/ha), se optó por clasificar las parcelas en 10 categorías de densidad inicial con intervalos de 100 plantas por hectárea. Esta clasificación permite capturar una variedad de escenarios de manejo desde densidades bajas hasta altas, lo cual es crucial para analizar los efectos del raleo en diferentes condiciones iniciales (Pretzsch, 2009; Warren & Halls, 1997).

De manera similar, se establecieron 15 categorías de densidades finales (DF) para proporcionar una resolución más alta en la evaluación de cómo las diferentes densidades

finales afectan el crecimiento y la calidad de los rodales. Esta mayor granularidad permite una evaluación más precisa y detallada, lo que es esencial para identificar umbrales críticos y rangos óptimos para el manejo forestal (Cao et al., 2018; Stokes & Song, 2013). Además, el uso de 15 categorías de densidad final aborda la variabilidad en el crecimiento de los rodales resultante de diferencias en la calidad del sitio y condiciones climáticas (Eberhart & Wood, 2006). La clasificación detallada facilita la toma de decisiones informadas para optimizar la producción y calidad de la madera, y permite realizar comparaciones finas entre diferentes estrategias de manejo para una planificación efectiva a largo plazo (Dabs, 2000; Laroque, 2004; Galloway, 1993; Prodan et al., 1997). En la Tabla 3 se detalla la categorización de densidades.

**Tabla 3**

*Categorización de densidades iniciales (DI) y finales (DF) (pl/ha)*

DI	DF	Categoría (C) (DI-DF)
	0 -199	1
	200 - 299	2
	300 - 399	3
	400 - 499	4
	500 - 599	5
600 – 700	600 - 700	6
701 – 800	701 - 800	7
801 – 900	801 - 900	8
901 – 1.000	901 – 1.000	9
1.001 – 1.100	1.001 – 1.100	10
1.101 – 1.200	1.101 – 1.200	11
1.201 – 1.300	1.201 – 1.300	12
1.301 – 1.400	1.301 – 1.400	13
1.401 – 1.500	1.401 – 1.500	14
1.501 – 1.600	1.501 – 1.600	15

**Nota:** DI (densidad inicial); DF (densidad final o de medición); C (categoría DI, DF)

### 3.6. Definiciones de variables observadas y calculadas

#### 3.6.1. Variables observadas

De la información obtenida de los inventarios propios de cada una de las parcelas se recogió los valores de las siguientes variables:

- Diámetro a la altura de pecho (DAP): Corresponde a la medición del diámetro del árbol a una altura estandarizada de 1,30 metros del suelo en uno o varios momentos del rodal. Unidad de medida: centímetros (cm). (Cancino, 2006).
- Altura total (HT): Es la distancia vertical comprendida entre el suelo (base del fuste) y el extremo apical del árbol, medida en metros (m). (Cancino, 2006).
- Edad (T): tiempo transcurrido desde la implantación del rodal, medida en años. (Cancino, 2006). Para este estudio se consideran dos edades:
  - a. Edad de medición (Tm): expresada en años, es el tiempo comprendido entre su implantación y la última medición. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_m = \frac{(\text{Fecha de medición} - \text{Fecha de plantación})}{365}$$

- b. Edad de raleo (Tr): expresada en años, es el tiempo comprendido entre la implantación del rodal y ejecución del raleo.

$$T_r = \frac{(\text{Fecha de medición} - \text{Fecha de plantación})}{365}$$

- Superficie de parcela (Sp): área ocupada por los árboles que conforman la parcela, expresada en hectáreas (ha).
- Densidad inicial (DI): cantidad de árboles por unidad de superficie (plantas/hectárea) al momento de la implantación.

- Observaciones (O): aquellas condiciones que indican estado o situación de la planta o el rodal, que al momento de inventariar las parcelas son necesarias anotar. Pueden ser: plantas enfermas, quebradas, fallas, muertas, raleo, incendio, seca, daño por frío, daño por hormigas, etc.

### 3.6.2. Variables calculadas

Teniendo en cuenta las variables anteriores, se originaron para cálculos auxiliares propios del manejo silvícola a fin de seguir en gabinete la historia de las parcelas las siguientes variables:

- DAP medio ( $D_m$ ): corresponde al DAP del promedio aritmético de los diámetros individuales de la parcela.

$$Dm = \frac{\sum_{i=1}^n di}{n}$$

Donde:

$D_m$  es el dap medio (cm)

$d_i$  es dap medido en el  $i$ -ésimo árbol (cm)

$n$  es el número de árboles en los que se midió el dap

- Altura media ( $H_m$ ): corresponde a la altura del promedio aritmético de las alturas totales de los árboles de la parcela.

Donde:

$h_i$  la altura del árbol  $i$  y  $k$  es el número de árboles medidos en la parcela.

$$Hm = \frac{\sum_{i=1}^k hi}{k}$$

- Número de pies por hectárea (N): se calcula a partir de la cantidad de individuos existentes en la parcela ( $N_p$ ) y la superficie de la misma ( $S_p$ ).

$$N = (N_p/S_p) * 10000$$

### **3.7. Análisis estadístico de los datos**

#### **3.7.1. Análisis exploratorio**

Empleando el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2018), se llevó a cabo un análisis exploratorio. En primer lugar, se describieron gráficamente los datos relevados para observar el comportamiento de las variables, la distribución de los datos y su relación a lo largo del tiempo de manera simple y resumida. A través de tablas, se presentaron las estadísticas descriptivas más relevantes para el DAP y HT en función de la CDI, los diferentes manejos, la edad a la que se realizaron los mismos y la densidad final alcanzada. Posteriormente, se realizó el análisis inferencial con un intervalo de confianza del 95%.

#### **3.7.2. Análisis estadístico de los ajustes**

Se utilizaron datos de carácter longitudinal, recolectando observaciones repetidas de las mismas unidades a lo largo del tiempo (Diggle, et al., 2003). En este caso, dichas unidades correspondieron a observaciones realizadas sobre el mismo árbol, considerado como un "individuo". Este enfoque permitió analizar cambios y tendencias dentro de cada unidad, resultando en una estructura de datos en panel o secuencial, donde cada unidad contaba con múltiples mediciones en distintos momentos temporales.

Se realizaron varias pruebas estadísticas clásicas para verificar la normalidad de los datos, entre ellas la prueba de Shapiro-Wilk y la de Kolmogorov-Smirnov, complementadas con un análisis visual a través de histogramas y gráficos Q-Q (Quantile-Quantile) (Balzarini, et al., 2015; Sanchez, 2023). Estas evaluaciones resultaron fundamentales para determinar si los datos seguían una distribución normal. Los resultados obtenidos mostraron un valor p significativo, lo que llevó a la conclusión de que los datos no se ajustaban a una distribución normal, resaltando la importancia de considerar métodos analíticos alternativos que no dependan del supuesto de normalidad.

Además, se tuvo en cuenta que, debido a la naturaleza longitudinal de los datos, existía una dependencia temporal, lo que significaba que las observaciones sucesivas de la misma unidad tendían a estar correlacionadas. Esta dependencia complicaba el cumplimiento del supuesto de independencia, crucial en muchos modelos que asumen normalidad. Asimismo, en los análisis longitudinales, era frecuente observar heterocedasticidad, es decir, varianzas no constantes, y correlación serial entre las observaciones, lo que también podía contradecir

los supuestos de normalidad y afectar la validez de los resultados estadísticos (Diggle, et al. 2002; Singer y Willet 2003; Field, 2013, Balzarini, et al. 2015).

Dado que los datos no habían satisfecho los supuestos de normalidad, se optó por emplear modelos lineales mixtos (MLM) y modelos no lineales mixtos (MNLMM) en el análisis estadístico. Estos modelos resultaron especialmente adecuados para manejar las correlaciones entre observaciones repetidas y capturar la dependencia intrínseca de los datos longitudinales. Además, permitieron explorar tanto la variabilidad dentro de los sujetos como entre ellos, ofreciendo una herramienta robusta para modelar de manera más precisa y adecuada la respuesta de las variables "DAP" y "HT", alineándose con la complejidad y naturaleza de los datos.

Para trabajar dentro del marco de los MLM y MNLMM se establecieron los siguientes efectos:

1. Efectos fijos:

Densidad inicial y de reevaluó: Estas variables fueron consideradas como factores fijos porque representaron condiciones específicas de la gestión de la plantación que se esperó influyan de manera consistente en las respuestas de interés, como es el crecimiento. Al ser características controladas y medibles que afectan directamente a las plantas, es lógico tratarlas como efectos fijos para capturar su impacto sistemático en los datos.

Edad de la plantación: es un factor crítico que generalmente afecta el desarrollo de los árboles de manera predecible a lo largo del tiempo. Dado que esta variable es común a todas las observaciones y su efecto es constante, se justificó su inclusión como un efecto fijo para modelar su influencia directa y específica en las respuestas observadas.

Edad de intervención: Similar a la edad de la plantación, la edad de intervención puede influir significativamente en el crecimiento. Este factor es fijo porque está relacionado con una acción específica "el raleo" que se aplicó en un momento determinado y cuyo efecto sobre el rendimiento de los árboles se pretende evaluar de manera sistemática.

2. Efecto aleatorio:

Parcelas: se incluyeron como un efecto aleatorio porque representaron unidades experimentales o de muestreo que capturan la variabilidad entre los distintos grupos o bloques de observaciones. Las parcelas pueden tener características intrínsecas que afectan las respuestas, pero estas características no son el foco principal del estudio y se asume que su influencia varía de manera aleatoria. Al modelarlas como un efecto aleatorio, se reconoció que existen diferencias no observadas entre parcelas que pueden influir en las respuestas,

permitiendo que el modelo capture esta variabilidad no controlada y mejore la generalización de los resultados.

Por ello, al tomar la densidad inicial, densidad de reevalúo, edad de la plantación y edad de intervención como factores fijos, se modelaron directamente los efectos de estas variables clave, que se esperaba tuvieran un impacto sistemático en las respuestas. Al mismo tiempo, al incluir las parcelas como un efecto aleatorio, se reconoció la variabilidad inherente entre las unidades de muestreo, lo que permitió que el modelo capturará mejor la heterogeneidad en los datos y proporcionará estimaciones más precisas y generalizables de los efectos fijos. Esta combinación de efectos fijos y aleatorios fue esencial en el contexto de modelos lineales mixtos para reflejar adecuadamente tanto los efectos sistemáticos como la variabilidad aleatoria en los datos.

Por otra parte, la inferencia estadística en la estimación de estos modelos se basó en el principio de máxima verosimilitud, lo que permitió obtener estimaciones precisas y eficientes de los parámetros incluso en presencia de datos faltantes o desbalanceados. Este enfoque es particularmente robusto, ya que no requiere la eliminación de observaciones incompletas ni el uso de imputación de datos, lo que podría sesgar los resultados. La verosimilitud máxima facilitó el aprovechamiento de toda la información disponible en los datos, optimizando así la precisión de las estimaciones. Además, este método es capaz de manejar estructuras de datos complejas, como aquellas con medidas repetidas o con desbalanceo en el número de observaciones por unidad experimental, sin comprometer la validez de los resultados (Di Rienzo et al., 2012). Esta capacidad de lidiar con la complejidad inherente de los datos reales es una de las razones por las cuales los modelos lineales mixtos son ampliamente utilizados en estudios donde la estructura de los datos puede ser irregular o incompleta.

La comparación de los modelos se realizó utilizando varios criterios de evaluación descritos por Fallas (2012):

- Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC): Este criterio mide la precisión de las estimaciones generadas por los modelos. La REMC proporciona una medida directa del error promedio de las predicciones, siendo más baja cuando las estimaciones son más precisas.

- Criterio de Información de Akaike (AIC) y Criterio de Información Bayesiano (BIC): Ambos criterios se basan en la máxima verosimilitud para evaluar la bondad de ajuste del modelo, pero también tienen en cuenta la complejidad del modelo. El AIC evalúa la calidad del ajuste del modelo considerando la verosimilitud y penaliza por el número de parámetros utilizados, buscando un equilibrio entre ajuste y simplicidad. Por su parte, el BIC también penaliza la complejidad del modelo, pero lo hace con una penalización más severa en

comparación con el AIC. Esto generalmente lleva al BIC a seleccionar modelos más simples y menos detallados, mientras que el AIC puede preferir modelos más complejos que capturan detalles adicionales en los datos. En resumen, el AIC tiende a favorecer modelos más detallados y específicos dentro de los datos, mientras que el BIC tiende a seleccionar modelos más abstractos y generales.

El modelo que presentó el valor más bajo de estos criterios es el que mejor ajuste presente para cada objetivo. A continuación, se describe resumidamente el análisis estadístico inferencial para cada objetivo:

Objetivo 1:

*“Modelar funciones de crecimiento de *E. grandis* en función de la calidad de sitio”.*

Para modelar las funciones de crecimiento de *E. grandis* en función de la calidad de sitio, se realizó un análisis exhaustivo partiendo de la premisa de que el crecimiento de la especie exhibe un comportamiento no lineal de tipo sigmoideo. En primer lugar, se llevó a cabo un análisis exploratorio para observar gráficamente el comportamiento de las variables y las correlaciones entre las medidas repetidas (Littell et al., 2006). Posteriormente, se realizó un análisis detallado utilizando modelos lineales mixtos, los cuales ofrecieron una solución eficiente y robusta para manejar la variabilidad y la correlación en los datos. Estos modelos demostraron ser rápidos de ajustar, proporcionaron estimadores más estables y precisos, y facilitaron una interpretación clara de los efectos fijos y aleatorios, así como una evaluación más directa del ajuste del modelo (Pinheiro & Bates, 2000; Verbeke & Molenberghs, 2000).

Para complementar el análisis, se compararon los resultados con el modelo no lineal de Gompertz, que se seleccionó debido a su capacidad para capturar el comportamiento sigmoideo del crecimiento (Gompertz, 1825). Sin embargo, el modelo no lineal mixto presentó varias desventajas significativas. La complejidad computacional del modelo Gompertz ralentizó el ajuste, demandó mayores recursos y mostró problemas de convergencia, con una mayor propensión a quedar atrapado en óptimos locales (Bolker et al., 2009). Además, la estimación de parámetros en el modelo no lineal resultó menos precisa y más sensible a valores atípicos, y la interpretación de los resultados fue más complicada debido a la naturaleza compleja de la relación no lineal (McCulloch & Searle, 2001). En contraste, los modelos lineales mixtos ofrecieron una mejor eficiencia computacional, estabilidad en la estimación, y una interpretación más directa y clara, lo que hace que sean una opción preferida para este tipo de análisis (Pinheiro & Bates, 2000; Verbeke & Molenberghs, 2000).

Objetivo 2:

“Ajustar índices de calidad de sitio incluyendo variabilidad espacial intraparcela”.

El ajuste de los índices de sitio se realizó mediante los modelos lineales mixtos para representar apropiadamente la estructura de varianzas y covarianzas asociadas a medidas repetidas. Por otra parte, con las herramientas de la geoestadística se incluyó la variabilidad espacial intraparcela mediante variogramas o semivariogramas, a fin de realizar las interpolaciones espaciales con kriging como método predictivo.

Dado que las parcelas en el área de estudio también presentaron arreglos espaciales sobre el terreno (coordenadas bidimensionales en valores X e Y, expresadas en metros, es decir el marco de plantación o distancia entre individuos), se manifestó el fenómeno de variabilidad espacial dentro de una misma parcela y entre parcelas, pudiéndose explorar la estructura de correlación la estructura de correlación y modelar la heterogeneidad de varianza residual (Di Rienzo et al., 2012). Aclaración: se toma a la parcela como sitio.

Para la modelación del crecimiento de *E. grandis* en función de la calidad de sitio y el ajuste de índices de calidad de sitio incluyendo variabilidad espacial intraparcela se ajustaron los siguientes modelos:

a. Modelo lineal mixto (MLM)

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * DI + \beta_2 * edad + \beta_3 * edad^2 + \beta_4 * D_{ij} + PC_j + e_{ij}$$

$Y_{ij}$  es el DAP o HT en el sitio (PC) j a la edad i.

- Efectos fijos:

Densidad (DI= densidad inicial, D= densidad de revalúo).

edad (edad de la parcela).

edad<sup>2</sup> (edad de raleo).

- Efectos aleatorios:

Parcelas (PC).

- Errores (e): normales y homocedásticos. Hace referencia a que los residuos del modelo se distribuyen de manera normal, lo cual es fundamental para la validez de las

inferencias estadísticas (Kutner et al., 2004). Además, implica que la varianza de los errores es constante a lo largo de todas las observaciones, asegurando que la dispersión de los errores no varíe con el nivel de las variables independientes, lo que es crucial para la precisión de los estimadores y la validez de los intervalos de confianza y las pruebas de hipótesis (Weisberg, 2005).

Aclaración: Los subíndices *i* y *j* indican que *i* corresponde a la edad del árbol en la que se realizan las mediciones y *j* hace referencia a la parcela específica en la que se lleva a cabo la observación.

b. Modelo lineal mixto heterocedástico (MLMh)

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * DI + \beta_2 * edad + \beta_3 * edad^2 + \beta_4 * D_{ij} + PC_j + e_{ij}$$

$Y_{ij}$  es el DAP o HT en el sitio (PC) *j* a la edad *i*.

- Efectos fijos:

Densidad (DI= densidad inicial, D= densidad de revalúo).

edad (edad de la parcela).

edad<sup>2</sup> (edad de raleo).

- Efectos aleatorios:

Parcelas (PC).

- Errores (e): heterocedásticos. La variabilidad de los errores cambia con el nivel de las variables independientes, lo que puede comprometer la precisión de las estimaciones y la validez de las pruebas estadísticas (Wooldridge, 2019). Para abordar este problema y mejorar la validez de las inferencias, se aplicó una función potencia para ajustar los datos y estabilizar la varianza de los errores, una técnica que puede ayudar a corregir la heterocedasticidad y mejorar la precisión del modelo (Osborne et al., 2012).

Aclaración: Los subíndices *i* y *j* indican que *i* corresponde a la edad del árbol en la que se realizan las mediciones y *j* hace referencia a la parcela específica en la que se lleva a cabo la observación.

c. Modelo lineal mixto heterocedástico con correlación espacial (MLMhc)

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * DI + \beta_2 * edad + \beta_3 * edad^2 + \beta_4 * D_{ij} + PC_j + e_{ij}$$

$Y_{ij}$  es el DAP o HT en el sitio (PC)  $j$  a la edad  $i$ .

- Efectos fijos:

Densidad (DI= densidad inicial, D= densidad de revalúo).

edad (edad de la parcela).

edad2 (edad de raleo).

- Efectos aleatorios:

Parcelas (PC).

- Errores (e): heterocedasticos. La variabilidad de los errores cambia con el nivel de las variables independientes, lo que puede comprometer la precisión de las estimaciones y la validez de las pruebas estadísticas (Mills & Zervou, 2019). Para abordar este problema y mejorar la validez de las inferencias, se aplicó una función potencia para ajustar los datos y estabilizar la varianza de los errores, una técnica que es eficaz para corregir la heterocedasticidad y mejorar la precisión del modelo (Osborne et al., 2012). Además, considerando la correlación espacial, se utilizó una función exponencial para abordar las posibles estructuras de dependencia espacial en los datos, lo cual es crucial para obtener estimaciones robustas en presencia de autocorrelación espacial (Legendre, 1993; Cressie, 1993).

Aclaración: Los subíndices  $i$  y  $j$  indican que  $i$  corresponde a la edad del árbol en la que se realizan las mediciones y  $j$  hace referencia a la parcela específica en la que se lleva a cabo la observación.

A modo de contrastar:

d. Modelo no lineal mixto – Función Gompertz (MNLG)

$$Y_{ij} = \alpha * \exp[-\beta * \exp(\gamma * edad_i)] + e_{ij}$$

Los valores de los estimadores fueron calculados de acuerdo a los establecidos para el correcto funcionamiento de la función.

Al ajustar los modelos a una misma base de datos, fue necesario utilizar criterios para la comparación de los ajustes como para la selección del mejor modelo. Para ello, se emplearon los indicadores del criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de Schwarz (BIC), (Casanoves et al., 2005)

Para seleccionar y evaluar el modelo adecuado, se utilizaron los criterios AIC (Criterio de Información de Akaike) y BIC (Criterio de Información Bayesiano), eligiendo el modelo que presentó los valores más bajos en ambos criterios. Con este modelo, se calculó el Mejor Predictor Lineal Insesgado (BLUP, por sus siglas en inglés) para minimizar el error cuadrático medio de la predicción. El BLUP es una técnica estadística que proporciona estimaciones precisas de efectos aleatorios en modelos mixtos, basándose en el principio de que estos estimadores son insesgados y lineales en relación con los efectos aleatorios del modelo (Castrignanò et al., 2006; Robinson, 1991).

El cálculo del BLUP permitió evaluar la distribución de los crecimientos promedio poblacionales del Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y la Altura Total (HT) para cada parcela, mejorando la exactitud de los valores predichos al considerar tanto los efectos fijos como los aleatorios del modelo. Este enfoque es útil para proporcionar estimaciones precisas en presencia de variabilidad no explicada por los efectos fijos, lo que resulta en una mejor representación del crecimiento real en cada parcela (Casanoves y Balzarini, 2002).

Dado que los valores BLUP se interpretan como estimaciones de tasas de crecimiento, las parcelas se clasificaron en función de estos valores. Aquellas con BLUP positivos se consideraron sitios con crecimiento superior a la media, mientras que las parcelas con BLUP negativos se clasificaron como sitios con crecimiento inferior. Con base en estas estimaciones, los sitios (parcelas) fueron categorizados en tres calidades simples: muy buenos, buenos y regulares. Esta clasificación proporciona una forma práctica y efectiva de evaluar la calidad del crecimiento en función de los datos obtenidos, facilitando la toma de decisiones en la gestión y planificación forestal (Castrignanò et al., 2006; Robinson, 1991).

### **3.7.3. Significancia de los parámetros estimados**

Los valores de AIC (Criterio de Información de Akaike) y BIC (Criterio de Información Bayesiano) se utilizaron como indicadores de la calidad del ajuste de los modelos estimados. Estos criterios permitieron evaluar la adecuación de los modelos ajustados, considerando tanto el ajuste a los datos como la penalización por complejidad del modelo. Un menor valor de AIC y BIC indicaba un mejor ajuste del modelo ajustado por complejidad, lo cual fue consistente con la elección del modelo más adecuado (Burnham y Anderson, 2004).

En los modelos de regresión para DAP (diámetro a la altura del pecho) y HT (altura), se incluyeron los términos densidad inicial, edad de la parcela, edad de raleo y densidad de revalúo. Sin embargo, los valores de AIC y BIC no indicaron directamente la significancia de los parámetros individuales, lo cual requería una evaluación adicional a través de los valores  $p$  asociados a cada uno de los coeficientes estimados (Schwarz, 1978).

Para determinar la significancia estadística de los parámetros, se revisaron los valores  $p$  obtenidos en el proceso de estimación. Todos los valores  $p$  asociados a los coeficientes fueron menores a 0,05, lo que permitió concluir que cada uno de los parámetros incluidos en los modelos de DAP y HT resultó estadísticamente significativo. Este hallazgo indicó que cada una de las variables independientes (DI, edad, edad<sup>2</sup>) mencionadas tuvieron un efecto significativo sobre las variables dependientes (DAP y HT), reforzando así la validez de las ecuaciones presentadas para describir dichas relaciones (Draper y Smith, 1998).

### **3.8. Mapeos de variabilidad espacial**

Se trabajó en la plataforma del software Fastmapping v.2.0, aplicación web interactiva desarrollada en lenguaje R, que presenta una interfaz amigable para los usuarios sin necesidad de manipular códigos de programación (<http://fastmapping.psi.unc.edu.ar>) (Paccioretti et al., 2020). Usando las técnicas embebidas en el software se realizó un análisis de observaciones raras o outliers para DAP y para HT.

Se compararon tres modelos espaciales teóricos de semivariogramas (exponencial, esférico y gaussiano) tanto para DAP como para HT, seleccionando al de mejor ajuste en función de la minimización del error cuadrático medio de predicción. El modelo fue usado para medir la variabilidad y covariabilidad dasométrica en el lote y para mapear la variabilidad

espacial, en el mismo software. Usando el algoritmo de cluster fuzzy k-means sobre los datos de ambas variables y una métrica de distancia Euclídea entre sitios dentro del rodal, se delimitaron zonas homogéneas o clústers. Finalmente, se compararon estadísticamente las medias de cada zona en términos de DAP y H. De este último análisis se hizo un mapa espacial multivariado y se observó las medias de las variables. Aclaración: para cada macrositio (conjunto de parcelas de un mismo ensayo o lugar donde fueron tomados los datos) se efectuó el mapeo espacial.

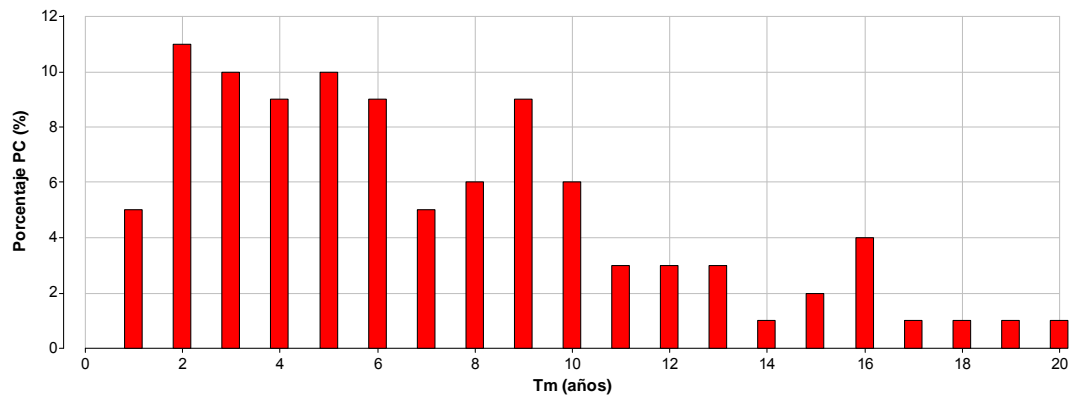
## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análisis exploratorio de los datos

Se evaluaron un total de 515 parcelas a lo largo de todos los años de medición (1 a 20 años) para todos los manejos. En la Figura 6 se observa el porcentaje de parcelas evaluadas según la edad de medición.

**Figura 6**

*Porcentaje (%) de parcelas evaluadas en función de la edad de medición ( $T_m$ )*

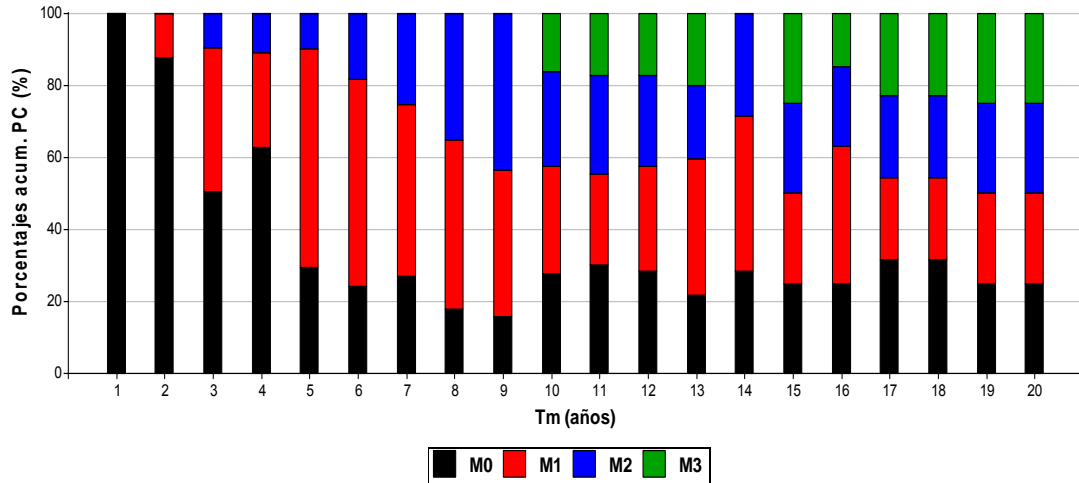


En términos de distribución de edades y como muestra la Figura 6, prácticamente toda la información se concentra entre los 10 primeros años de edad de la plantación (aproximadamente un 80%). Esto lógicamente puede limitar el rango de validez de los modelos que se obtengan.

En la Figura 7 se puede observar el porcentaje acumulado de las parcelas de acuerdo al manejo efectuado para las distintas edades de medición.

**Figura 7**

*Porcentaje acumulado de parcelas en función de la edad de medición y el manejo*



**Nota:** M0: parcelas sin raleo; M1: parcelas con 1 raleo; M2: parcelas con 2 raleos; M3: parcelas con 3 raleos.

De acuerdo a la Figura 7 se puede observar que existen parcelas sin manejo a lo largo de las edades de medición (0 a 20 años). Para el primer raleo se muestran porcentajes variables, como por ejemplo en el segundo año del total de parcelas evaluadas menos del 20% recibe este manejo, en años posteriores se presentan valores por encima del mismo porcentaje, de igual manera, para aquellas que tienen dos raleos a excepción que se manifiestan a partir del tercer año. A partir de los 10 años de medición aparecen las parcelas con tres raleos, siendo el año 14 el único en el que no hay parcelas evaluadas.

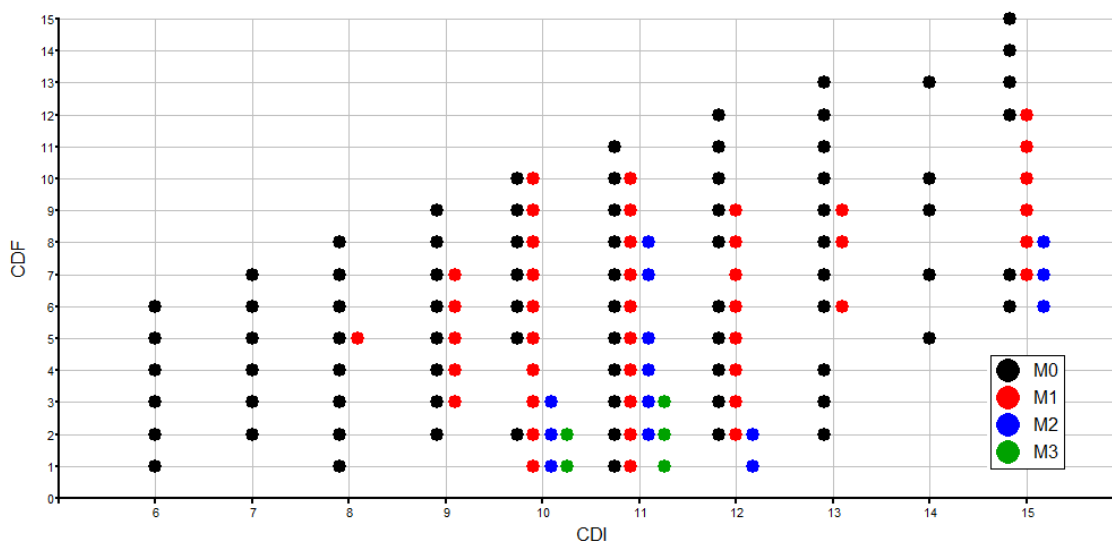
En la Figura 8, a modo representativo en el siguiente gráfico de densidad de puntos se puede observar de manera directa donde están las categorías de densidad inicial y a la densidad final a la que llegan para cada manejo. En todas las categorías de densidad inicial hay parcelas sin manejo, por otra parte, las CDI 8 a la 15 presentan 1 manejo a excepción de la CDI 14, con dos manejos encontramos en las CDI 10, 11, 12 y 15 respectivamente. Por último, con tres manejos solo se presentan en las CDI 10 y 11.

También se observa que para densidades iniciales hasta 900 plantas/ha (CDI 6-8) no se efectúan raleos a excepción de un porcentaje pequeño (<10%) en el que solo reciben el primer raleo. Además, hay parcelas sin raleo (M0) con densidades iniciales en las que llegan a densidades finales o de medición por debajo de lo tolerable por muerte natural, esto se debe

al alto porcentaje de fallas en las mismas, plantas heladas, etc., por lo que se tendrá especial cuidado para posteriores análisis. En esta figura no se contempla la edad de las mismas ni los sitios donde se encuentran las mismas.

**Figura 8**

*Gráfico de densidad de puntos de manejos efectuados para las distintas categorías de densidad inicial y densidad final.*



**Nota:** CDI: Categoría densidad inicial (pl/ha); CDF: Categoría densidad final; M0: parcelas sin raleo; M1: parcelas con 1 raleo; M2: parcelas con 2 raleos; M3: parcelas con 3 raleos.

Teniendo en cuenta que las categorías de densidad inicial CDI 10 y 11 presentan los tres manejos, en la Tabla 4 y 5 se detallan las medidas de resumen para DAP y HT para las CDI 10 y 11, de acuerdo a los manejos efectuados (con o sin raleos), la edad de raleo y la densidad final para una edad de medición de 10 años.

**Tabla 4***Medidas de resumen del DAP para CDI 10 y 11*

DAP (cm) para Tm = 10 años									
M	Tr	CDF (pl/ha)	CDI 10 (1.001-1.100 pl/ha)			CDI 11 (1.101-1.200 pl/ha)			
			Media	Max	Min	Media	Max	Min	
0		8 (801-900)	23,4	35,2	11,0	17,7	26,5	7,3	
		7 (701-800)	22,9	32,9	11,7	20,1	31,1	10,7	
		5 (500-599)	16,0	20,2	10,4	17,1	19,7	13,6	
1	2	2 (200-299)	31,6	39,3	18,2	s/d	s/d	s/d	
		3 (300-399)	29,1	37,6	19,5	s/d	s/d	s/d	
		4 (400-499)	28,2	41,9	19,5	s/d	s/d	s/d	
	3	6 (600-700)	25,3	37,7	11,7	21,1	31,8	12,5	
		4	2 (200-299)	s/d	s/d	s/d	27,9	30,2	24,7
			3 (300-399)	s/d	s/d	s/d	27,4	32,0	20,4
4 (400-499)	s/d		s/d	s/d	24,1	29,3	17,0		
6 (600-700)	s/d		s/d	s/d	22,0	30,2	15,2		
2	2 y 5	2 (200-299)	s/d	s/d	s/d	33,6	42,7	24,5	
		1 (0-199)	s/d	s/d	s/d	34,4	41,6	29,1	
	3 y 6	4 (400-499)	s/d	s/d	s/d	24,0	29,4	17,0	
		4 y 6	4 (400-499)	s/d	s/d	s/d	23,2	30,0	15,9
	4 y 9	3 (300-399)	s/d	s/d	s/d	26,8	39,5	19,5	
		2 (200-299)	s/d	s/d	s/d	27,3	32,3	24,1	
3	2, 5 y 9	2 (200-299)	35,1	44,9	30,1	s/d	s/d	s/d	
		1 (0-199)	35,9	41,5	30,9	s/d	s/d	s/d	
	3, 6 y 9	4 (400-499)	s/d	s/d	s/d	24,7	30,5	18,8	
		3 (300-399)	s/d	s/d	s/d	24,7	31,0	19,1	

**Nota:** M (manejo: sin raleo, 1 raleo, 2 raleos, 3 raleos); Tr (edad del raleo, en años); CDI (categoría densidad inicial); Tm (edad de medición, en años); CDF (categoría de densidad final); s/d: sin datos.

**Tabla 5**

Medidas de resumen de HT para CDI 10 y 11

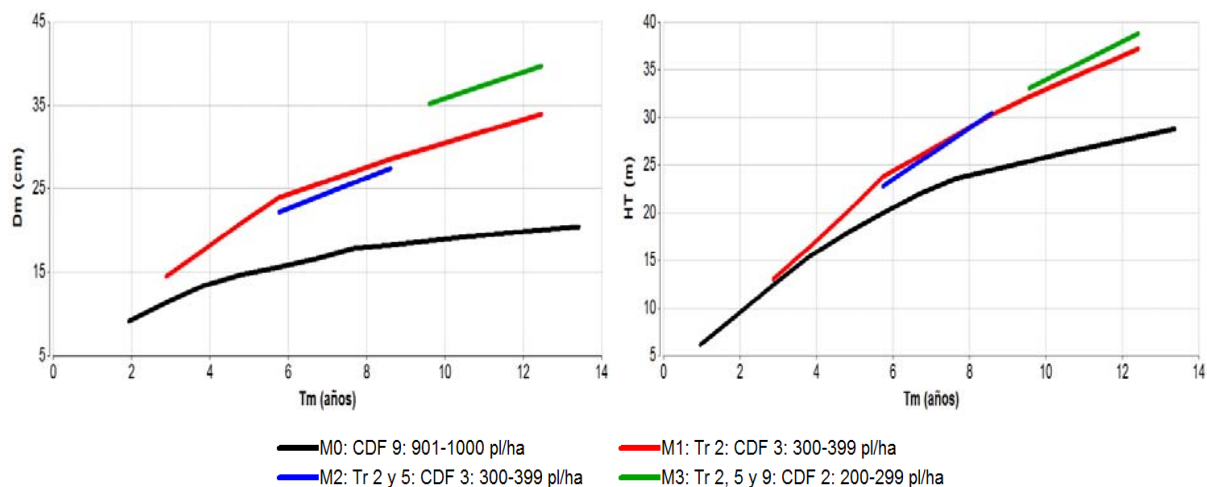
HT (m) para Tm = 10 años										
M	Tr (años)	CDF (pl/ha)	CDI 10 (1.001-1.100 pl/ha)				CDI 11 (1.101-1.200 pl/ha)			
			Media	Max	Min	H0	Media	Max	Min	H0
0		8 (801-900)	30,2	37,6	16,2	34,7	22,1	27,5	12,0	26,0
		7 (701-800)	28,4	34,8	15,3	32,6	26,2	31,8	17,0	29,9
		5 (500-599)	17,0	19,0	15,0	s/d	18,7	21,0	17,0	s/d
1	2	2 (200-299)	33,1	35,5	26,2	34,3	27,5	30,7	23,4	30,1
		3 (300-399)	32,6	38,8	23,3	34,8	29,4	32,3	26,2	30,8
		4 (400-499)	31,8	35,9	18,7	34,0	28,0	31,1	24,3	29,8
		6 (600-700)	30,3	35,0	15,9	33,1	27,5	30,7	23,4	30,1
	2 y 5	2 (200-299)	33,3	36,6	29,7	34,3	s/d	s/d	s/d	s/d
		1 (0-199)	33,8	35,8	31,9	34,1	s/d	s/d	s/d	s/d
2	3 y 6 4 y 6	4 (400-499)	s/d	s/d	s/d	s/d	27,4	30,0	22,5	28,6
		4 (400-499)	s/d	s/d	s/d	s/d	25,6	28,5	21,0	27,2
	4 y 9	3 (200-299)	s/d	s/d	s/d	s/d	29,5	31,7	26,0	30,5
		2 (300-399)	s/d	s/d	s/d	s/d	30,5	32,3	28,2	31,1
3	2, 5 y 9	2 (200-299)	32,8	35,4	29,8	33,3	s/d	s/d	s/d	s/d
		1 (0-199)	33,9	39,2	31,4	34,0	s/d	s/d	s/d	s/d
	3, 6 y 9 4, 6 y 9	3 (200-299)	s/d	s/d	s/d	s/d	26,3	29,0	24,5	27,3
			s/d	s/d	s/d	s/d	25,5	27,5	23,0	24,1

**Nota:** M (manejo: sin raleo, 1 raleo, 2 raleos, 3 raleos); Tr (edad del raleo); CDI (categoría densidad inicial); CDF (categoría de densidad final); H0 (altura dominante).

En las Figuras 9 y 10 se puede ver el comportamiento de las medias de estas variables para las categorías de densidad inicial antes mencionadas, en función de la edad de medición (Tm).

**Figura 9**

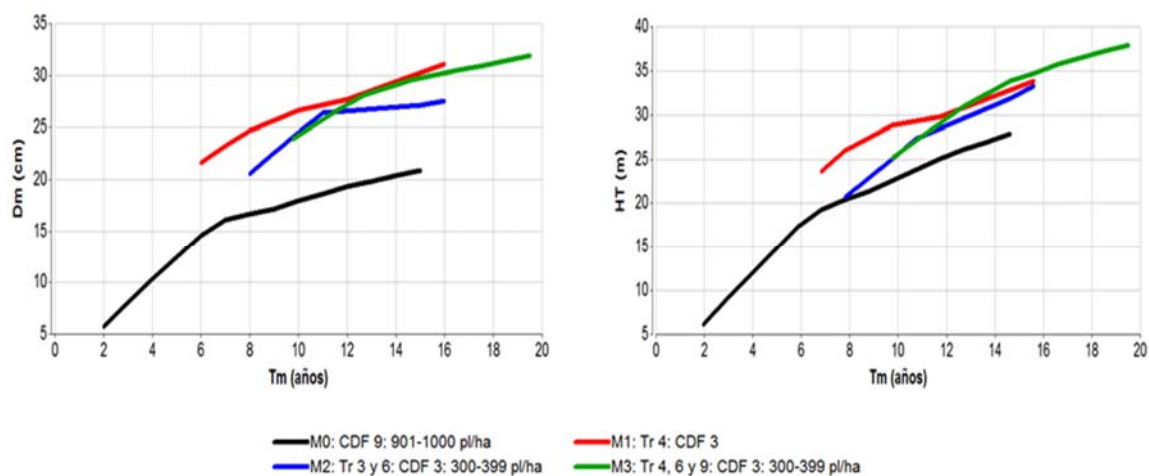
*Dm y HT para CDI 10 (1.001- 1.100 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF*



**Nota:** Los distintos colores representan a los manejos (negro: sin raleos; rojo: un raleo; azul: dos raleos; verde: tres raleos. Dm: DAP medio. HT: altura total.

**Figura 10**

*Dm y HT para CDI 11 (1.101-1.200 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF*



**Nota:** Los distintos colores representan a los manejos (negro: sin raleos; rojo: un raleo; azul: dos raleos; verde: tres raleos. Dm: DAP medio. HT: altura total.

En la Figura 10 se observa que el diámetro y la altura total media para rodales con 2 o 3 manejos no presentan valores a lo largo del tiempo, para esta densidad inicial (1.001-1.100 pl/ha) solo se cuenta información de datos desde los 6 a 8 años para rodales con 2 manejos y en rodales con 3 manejos de 10 a 12 años respectivamente. En el caso de rodales con densidad inicial de 1.101-1.200 pl/ha (Figura 10), no se cuenta con datos a edades de medición menores a los 6 años para rodales con 1, 2 o 3 raleos. Por el contrario, los rodales sin raleo (rodales testigos) presentan información a lo largo del tiempo para las dos densidades iniciales.

En ambas figuras, a medida que aumenta la edad de la plantación se incrementa la diferencia del diámetro medio entre los rodales con y sin raleo, y varía según número, edad de aplicación y densidad final a la que se desea llegar. Esto coincide con los resultados en ensayos de raleos tempranos de *E. grandis*, efectuados por Methol (2002) en el que se evidencia mayor crecimiento diamétrico en las parcelas con raleo más intenso, a siete meses de aplicado el raleo. Otros resultados obtenidos de un ensayo de raleo en pino, a los 15 años muestran que el aumento de la intensidad de raleo produjo el aumento del diámetro medio del tratamiento (Crechi et al., 2005).

Por otra parte, diversos estudios muestran que la respuesta del crecimiento en altura se manifiesta diferente para distintos escenarios, por ejemplo: Methol (2002) plantea que la respuesta en crecimiento de rodales a distintos manejos puede variar entre sitios. Pueden no presentarse diferencias significativas entre las alturas promedios de distintos tratamientos de intensidad y oportunidad de raleo para un ensayo de raleo en pino (Crechi et al., 2005). El crecimiento en altura puede ser mayor en parcelas con raleos intermedios, y menor en las que no tienen o presentan mayor intensidad de raleo en ensayos de intensidad y número de raleos en eucalipto (Methol, 2002). Por otro lado, los resultados de Díaz Bravo et al., (2012) mostraron que los raleos no afectaron la altura de los árboles, presentándose además una tendencia decreciente con la densidad final en un ensayo raleado a los 7 y 9 años de *Eucalyptus nitens*.

A continuación, se detallan en Tablas y Figuras los comportamientos de las demás categorías de densidad inicial en cuanto a las medidas de resumen para los diámetros y alturas de las parcelas involucradas en el análisis:

- Medidas de resumen CDI 8 (801-900 pl/ha). Tabla 6.

**Tabla 6**

*Medidas de resumen de DAP (cm) y HT (m) para CDI 8 (801-900 pl/ha)*

M	Tr	Tm	CDF (pl/ha)	DAP (cm)			HT (m)			
				Media	Max	Min	Media	Max	Min	H0
0		5	6 (600-700)	16,2	18,7	12,2	18,7	18,0	15,5	17,3
			7 (701-799)	17,0	21,2	10,2	18,4	21,3	15,3	19,7
1	4	5	5	16,4	21,9	7,0	17,5	21,6	11,2	19,7
			6	18,9	26,7	7,0	20,4	23,8	11,9	22,7

**Nota:** M (manejo: sin raleo, 1 raleo, 2 raleos, 3 raleos); Tr (edad del raleo); Tm (edad de medición) CDI (categoría densidad inicial); CDF (categoría de densidad final); H0 (altura dominante). Las edades están en años.

Como se observa en la Tabla 5, a una misma edad de medición y densidades finales iguales (CDF 6), se destacan y aprecian valores superiores para las variables de DAP y HT para parcelas con densidades iniciales de 801-900 pl/ha que reciben un raleo a los 4 años.

- Medidas de resumen CDI 9 (901-1.000 pl/ha). Tabla 7.

**Tabla 7**

*Medidas de resumen de DAP (cm) y HT (m) para CDI 9 (901-1.000 pl/ha)*

M	Tr	Tm	CDF (pl/ha)	DAP (cm)			HT (m)			
				Media	Max	Min	Media	Max	Min	H0
0		6	8 (801-900)	16,3	22,6	6,3	18,7	22,5	8,9	21,6
			9	15,7	22,3	7,3	19,0	22,7	11,1	21,3
		11	8	18,1	31,7	4,0	25,0	34,6	8,7	30,0
			9	18,7	30,8	3,8	24,5	32,4	8,0	31,4
1	6	7	6 (600-700)	19,0	27,3	13,1	23,2	28,1	11,9	24,5
			3 (300-399)	23,0	32,8	15,0	25,5	29,6	20,8	27,8
	8	9	4 (400-499)	21,6	32,3	8,6	24,0	28,4	14,8	27,4
			5 (500-599)	20,1	31,7	6,1	22,6	28,8	9,3	27,6
			6 (600-700)	20,4	32,4	6,6	22,4	30,3	8,5	27,7
			7 (701-800)	21,1	30,7	11,7	23,9	32,5	15,7	28,1

**Nota:** M (manejo: sin raleo, 1 raleo, 2 raleos, 3 raleos); Tr (edad del raleo); Tm: edad de medición; CDI (categoría densidad inicial); CDF (categoría de densidad final); H0 (altura dominante). Las edades están expresadas en años.

El análisis de la tabla anterior se observa varios comportamientos:

- Para las parcelas que no poseen manejo, a iguales densidades finales teniendo en cuenta la edad de medición (6 y 11 años), el DAP y HT son mayores para el segundo grupo, esto es evidente por la misma evolución en el tiempo.
- Además, se describen dos edades en el que se efectúa un raleo (6 y 8 años) cuyas variables se midieron posteriormente a los 7 y 9 años, claramente con respecto a las parcelas sin manejo, los valores de DAP y HT son superiores a edades similares y densidades finales menores. Dentro de las parcelas con un manejo, medidas a los 9 años, se destacan aquellas que alcanzan una densidad final de 300-399 pl/ha por encima de todas las demás.
- Medidas de resumen de DAP (cm) y HT (m) para las densidades iniciales de 1.301-1.400 pl/ha (CDI 13). Tabla 8.

**Tabla 8**

*Medidas de resumen de DAP (cm) y HT (m) para CDI 13 (1.301-1.400 pl/ha)*

M	Tr	Tm	CDF (pl/ha)	DAP (cm)			HT (m)			H0
				Media	Max	Min	Media	Max	Min	
0		4	13 (1.301-1.400)	10,0	14,0	4,3	9,9	12,5	5,1	11,0
			11 (1.101-1.200)	12,0	18,2	2,6	12,5	16,8	3,1	15,3
		5	12 (1.201-1.300)	11,4	16,2	4,8	12,6	16,3	6,5	14,2
1	4	5	9 (901-1.000)	15,6	21,5	8,2	18,3	22,0	14,1	20,0
		6	8 (801-900)	17,7	24,5	8,7	21,8	26,5	14,6	24,0
	5	6	6 (600-700)	15,7	23,7	3,0	17,2	21,9	6,5	19,5
			9 (901-1.000)	13,8	19,5	8,5	15,6	20,1	11,8	17,1

**Nota:** M (manejo: sin raleo, 1 raleo, 2 raleos, 3 raleos); Tr (edad del raleo); Tm (edad de medición); CDI (categoría densidad inicial); CDF (categoría de densidad final); H0 (altura dominante). Las edades se expresan en años.

De acuerdo a lo detallado en la Tabla 8 se puede observar en primera instancia, como el crecimiento en DAP y HT es mayor en las parcelas que presentan raleo.

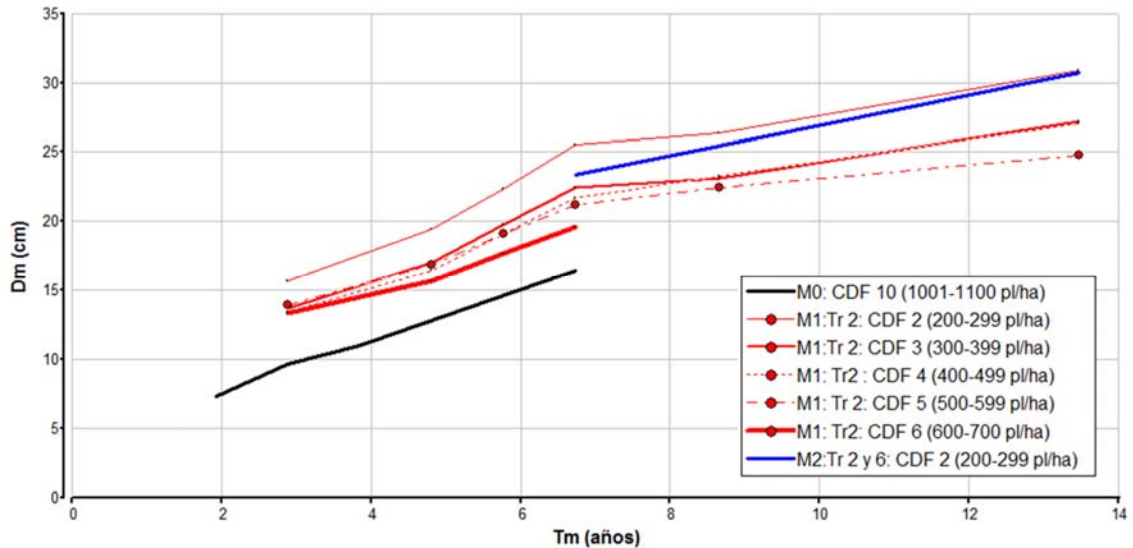
Para parcelas con un raleo realizado a los 4 años de edad y densidades finales 800-1.000 pl/ha presentan mayores valores en crecimiento de las variables evaluadas que aquellas que lo recibieron un año después.

En la Figura 11 y 12 se puede observar el comportamiento de las variables Dm y Hm para las parcelas que se encuentran con una densidad inicial de 1.201-1.300 pl/ha (CDI 12)

sometidas a uno y dos raleos en contraste a las que no tienen raleo. Y en la Figura 13 y 14 se observa los diámetros y alturas medias de las parcelas con M0, M1, M2 en función de la edad de medición para parcelas con densidades iniciales de 1.501-1.600 pl/ha (CDI 15).

**Figura 11**

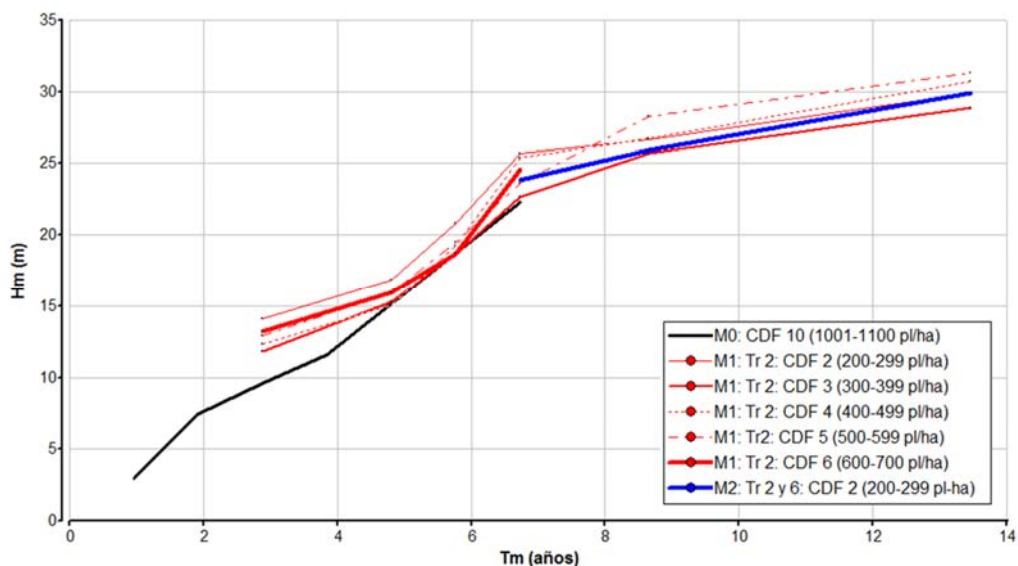
*Dm para CDI 11 (1.201-1.300 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF*



**Nota:** Los distintos colores representan a los manejos (negro: sin raleos; rojo: un raleo; azul: dos raleos). Dm: DAP medio. HT: altura total. Tr: edad de raleo (años). M0: parcelas sin raleo. M1: parcelas con un raleo, M2: parcelas con 2 raleos.

**Figura 12**

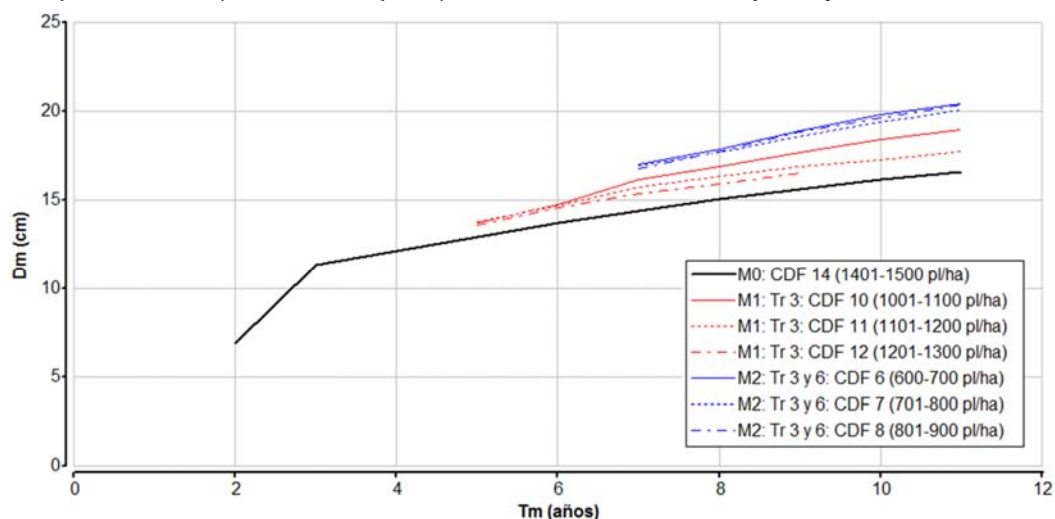
*HT para CDI 11 (1.201-1.300 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF*



**Nota:** Los distintos colores representan a los manejos (negro: sin raleos; rojo: un raleo; azul: dos raleos). Dm: DAP medio. HT: altura total. Tr: edad de raleo (años). M0: parcelas sin raleo. M1: parcelas con un raleo, M2: parcelas con 2 raleos.

**Figura 13**

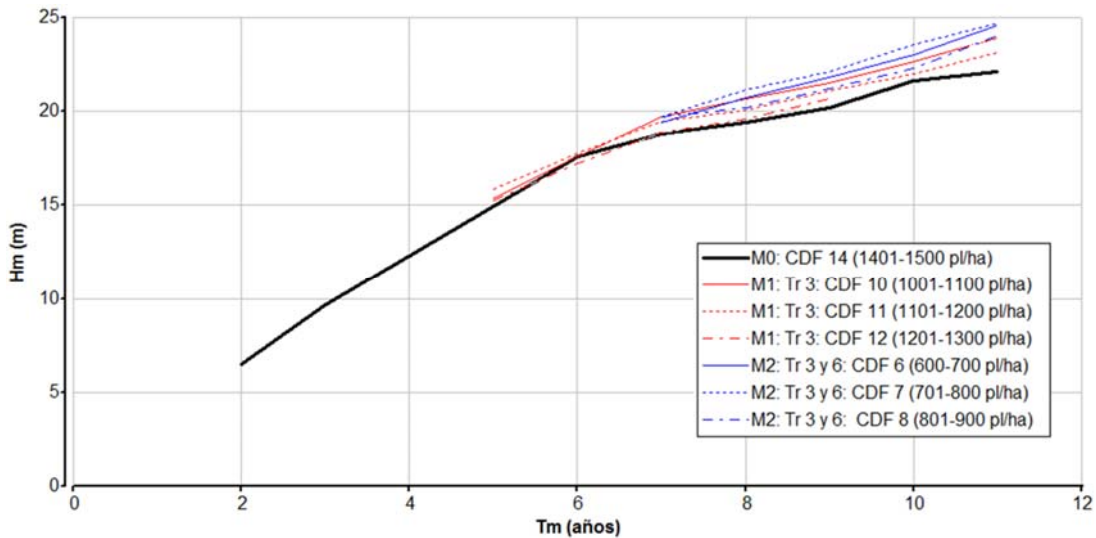
*Dm para CDI 15 (1.501-1.600 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF*



**Nota:** Los distintos colores representan a los manejos (negro: sin raleos; rojo: un raleo; azul: dos raleos). Dm: DAP medio. HT: altura total. Tr: edad de raleo (años). M0: parcelas sin raleo. M1: parcelas con un raleo, M2: parcelas con 2 raleos.

**Figura 14**

*HT para CDI 15 (1.501-1.600 pl/ha) en función de Tm, manejo, Tr y CDF*



**Nota:** Los distintos colores representan a los manejos (negro: sin raleos; rojo: un raleo; azul: dos raleos). Dm: DAP medio. HT: altura total. Tr: edad de raleo (años). M0: parcelas sin raleo. M1: parcelas con un raleo, M2: parcelas con 2 raleos.

En las Figuras 11, 12, 13 y 14 se observa una tendencia similar a la registrada en las Figuras 10 y 11, pero en este caso asociada a densidades iniciales comprendidas entre 1.201-1.300 y 1.501-1.600 pl/ha. A medida que aumenta la edad de la plantación, se evidencia un mayor incremento en el diámetro medio de los rodales sometidos a manejo en comparación con aquellos sin intervención. Este incremento varía en función de la edad en la que se realiza el raleo y la densidad final deseada, lo que sugiere que el manejo oportuno y adecuado del rodal tiene un impacto significativo en el crecimiento diametral, especialmente en etapas avanzadas de desarrollo.

En lo que respecta a la altura media total (Hm), si bien las diferencias en el incremento no son tan pronunciadas como en el caso del diámetro, los rodales que han sido ralados muestran consistentemente valores superiores. Esto refleja que, aunque el manejo forestal a través del raleo afecta más notablemente el diámetro, también contribuye a una mayor eficiencia en el crecimiento vertical. La relación entre raleo, densidad inicial y resultados en crecimiento apunta a la importancia de ajustar las prácticas de manejo según los objetivos de producción y conservación.

#### 4.2. Rodales sin intervención de raleo

En la tabla 9 se detallan los criterios de selección de modelos, en el que se puede observar que el modelo lineal mixto heterocedástico con correlación espacial es el que presenta mejor ajuste, comprobándose además que existe correlación espacial intraparcela.

**Tabla 9**

*Criterios de selección de modelos para sitios sin raleo.*

Modelos	DAP (cm)		HT (m)	
	AIC	BIC	AIC	BIC
MLM	186156	186215	166370	166428
MLMh	171669	171736	152609	152676
<b>MLMhc</b>	<b>67692</b>	<b>67760</b>	<b>64608</b>	<b>64675</b>
MNLMg	185322	185364	165764	165806

**Nota:** AIC y BIC más bajos mejor ajuste.

Teniendo en cuenta que el tercer modelo (MLMhc) tiene los valores más bajos de AIC y BIC como se observa en la tabla 1, se obtuvo la siguiente ecuación de predicción para rodales sin manejo con densidades iniciales de 600- 1.600 pl/ha hasta 20 años de edad.

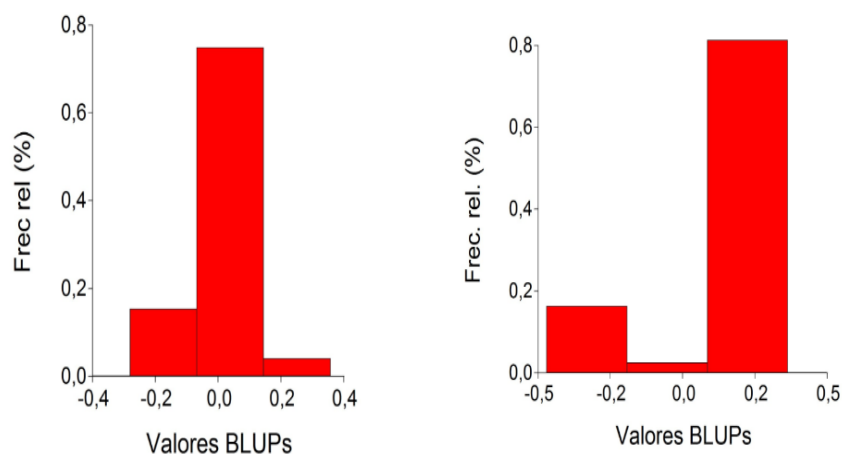
$$DAP_{(cm)} = 5,45 - 7,00^{-4} * DI + 2,15 * edad - 0,06 * edad^2 - 5,2^{-4} * DM$$

$$HT_{(m)} = 3,54 - 3,3^{-3} * DI + 3,14 * edad - 0,09 * edad^2 - 1,8^{-3} * DM$$

A este modelo se le pidió los BLUP's (Best Linear Unbiased Predictor) del efecto aleatorio de parcela para las dos variables en estudio, las mismas se grafican en un histograma como muestra la Figura 15.

**Figura 15**

*Histogramas de BLUP's*



**Nota:** figura de la izquierda: BLUPs en referencia al DAP; figura de la derecha: BLUPs en referencia a HT.

En la Figura 15, se muestran los histogramas de los estimadores BLUP's (Best Linear Unbiased Predictors) para el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total (HT).

Una vez calculados los valores BLUP's para las variables de estudio, se pudo clasificar de manera sencilla para esta base de datos, las calidades de sitio. En la Tabla 10 se detallan las mismas.

Para el DAP (gráfico de la izquierda), los valores de BLUP se distribuyen en un rango estrecho, desde -0,3 hasta 0,3, lo que indica que las predicciones ajustadas de DAP no muestran grandes desviaciones respecto al valor promedio. La mayor concentración de valores BLUP (alrededor del 70%) se encuentra en la clase central del histograma. Esta concentración sugiere una baja variabilidad entre los individuos en términos de DAP, lo que puede reflejar uniformidad en el crecimiento diamétrico bajo las condiciones evaluadas (White et al., 2020). Este tipo de análisis es útil en estudios forestales porque permite identificar si las diferencias entre individuos son atribuibles principalmente a efectos genéticos o ambientales (Piepho et al., 2008).

En contraste, para la altura (HT) (gráfico de la derecha), los valores BLUP varían en un rango más amplio, de -0,5 a 0,5, lo que refleja mayor dispersión en las predicciones ajustadas de altura en comparación con el DAP. En este caso, un mayor porcentaje de los valores BLUP se concentra en la última clase del histograma, lo que sugiere una mayor

proporción de individuos con alturas significativamente diferentes del promedio estimado. Esta variabilidad puede deberse a diferencias genéticas o a una respuesta diferenciada de los árboles a factores ambientales (Resende et al., 2014). Las estimaciones BLUP son particularmente útiles en la mejora genética forestal, ya que permiten ajustar los datos para efectos ambientales no medidos y enfocarse en la variabilidad genética real (Henderson, 1975).

En el análisis, se complementó la interpretación de los histogramas mediante la elaboración de una tabla que clasifica los valores de BLUP's para la altura total (HT) en tres categorías, de acuerdo a su rendimiento en diferentes ambientes. Los tres ambientes considerados fueron muy buenos, buenos y regulares, lo que permitió realizar una comparación detallada de la variabilidad entre los árboles en función de las condiciones del sitio, como se detalla en la tabla 10.

Esta tabla proporciona una herramienta valiosa para la mejora genética forestal al permitir la selección de individuos que no solo tienen un buen rendimiento en condiciones óptimas, sino que también muestran capacidad de adaptación a ambientes menos favorables.

**Tabla 10.**

*Calidades de sitio por BLUP's para sitios sin raleo.*

<b>Ambientes</b>	<b>BLUPs</b>	<b>Medias de BLUPs</b>
Muy buenos	>0.15	0.19
Buenos	-0.15 a 0.15	0,12
Regulares	<-0.15	-0.31

**Nota:** BLUPs (Best Linear Unbiased Predictors, mejor predictor insesgado).

Para los valores BLUP's de HT, atendiendo a que la altura se considera como un indicador de calidad de sitio se identificaron aquellos individuos cuyo crecimiento fue superior en los ambientes muy buenos, con valores BLUP mayores a a 0,15, indicando un rendimiento sobresaliente en condiciones óptimas (Resende et al., 2014). Los árboles clasificados en esta

categoría mostraron una respuesta superior en altura, lo que es esperable bajo condiciones ideales de crecimiento.

Los árboles clasificados en ambientes buenos presentaron valores BLUP intermedios, entre -0,15 y 0,15. Estos valores reflejan una respuesta promedio, en la cual los individuos mantienen un crecimiento moderado, posiblemente limitado por factores ambientales menos favorables que en el primer grupo, pero con una capacidad de adaptación superior (White et al., 2020).

Finalmente, en los ambientes regulares, los valores BLUP tienden a concentrarse en el rango de  $< 0,15$  indicando que los individuos experimentaron un crecimiento menor al promedio esperado. Esta clasificación pone de relieve la influencia de las condiciones del sitio en el desarrollo de la altura de los árboles y permite identificar a los individuos que presentan una menor plasticidad en estos ambientes (Piepho et al., 2008).

La elección de los valores de corte para los BLUP (Best Linear Unbiased Predictors) en la clasificación de calidades de sitio se fundamentó en varios criterios clave. En primer lugar, se consideró la distribución de los valores BLUP para las variables de estudio, específicamente el DAP (diámetro a la altura del pecho) y la altura (HT). Para el DAP, los valores se concentraron principalmente en una clase central, mientras que, para la altura, la mayor proporción de valores se encontró en la clase más extrema. Esto sugiere que los valores BLUP tienen una distribución que justifica la selección de ciertos umbrales que capturan los grupos más representativos dentro de esa distribución.

Además, se tuvo en cuenta la variabilidad de los datos. Los rangos de BLUP diferían entre el DAP y la altura, indicando que la dispersión de los datos es distinta para cada variable. Por lo tanto, los puntos de corte fueron seleccionados de manera que reflejaran esta variabilidad, permitiendo una clasificación adecuada según las características específicas de cada conjunto de datos.

Otro factor importante fue la significación estadística. Es probable que los umbrales se determinaran en función de análisis estadísticos previos que identificaron puntos en los que los cambios en los valores BLUP representaban diferencias significativas en la calidad del sitio. Esto asegura que los cortes seleccionados sean estadísticamente relevantes.

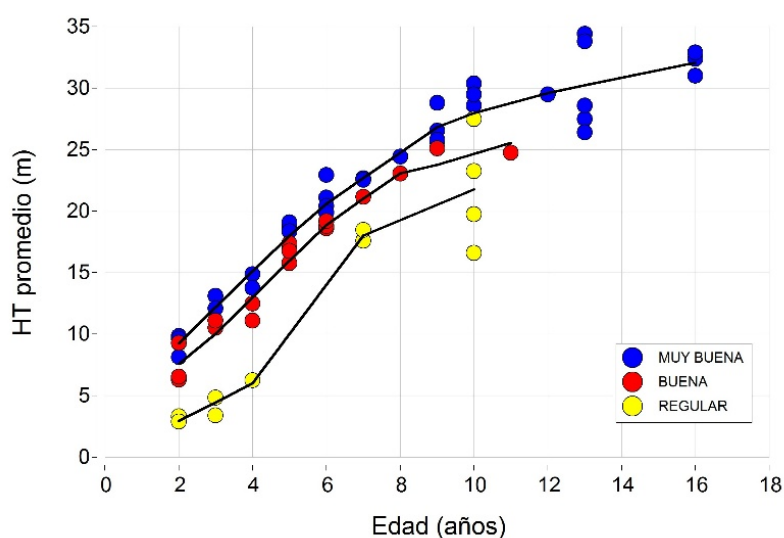
La facilidad de clasificación también jugó un rol importante. La clasificación resultó ser sencilla para esta base de datos, lo que sugiere que los cortes se eligieron para facilitar una diferenciación clara y práctica entre las distintas calidades de sitio, haciendo que las clases resultantes sean interpretables y útiles en el contexto específico.

Finalmente, se consideraron aspectos prácticos. La elección de los puntos de corte no solo se basó en fundamentos estadísticos, sino también en su aplicabilidad en contextos prácticos, como la gestión forestal o agrícola, asegurando que los resultados fueran directamente utilizables para la toma de decisiones.

En la Figura 16 se observa la altura promedio para distintas calidades de sitio en función de la edad de la plantación a una densidad inicial de 1.000-1.100 p/ha. De igual manera para el DAP promedio en la Figura 17.

**Figura 16**

*Altura promedio (HT) en función de la edad y las calidades de sitio*



**Nota:** Los colores representan las distintas calidades (azul: muy buena; rojo: buena; amarillo: regular).

De la figura anterior (16) se pudo observar que:

- Sitios de calidad muy buena (puntos azules): Los individuos presentan el mayor crecimiento en altura, alcanzando alrededor de 30 metros a los 16 años. En cuanto al crecimiento es más rápido en los primeros años, mostrando una curva empinada hasta los 10-12 años, donde empieza a estabilizarse. Estos sitios proporcionan condiciones óptimas para el desarrollo, lo que se refleja en el vigoroso aumento de altura.
- Sitios de calidad buena (puntos rojos): Los individuos en sitios de calidad presentan un crecimiento intermedio, con una altura promedio de aproximadamente 25 metros a

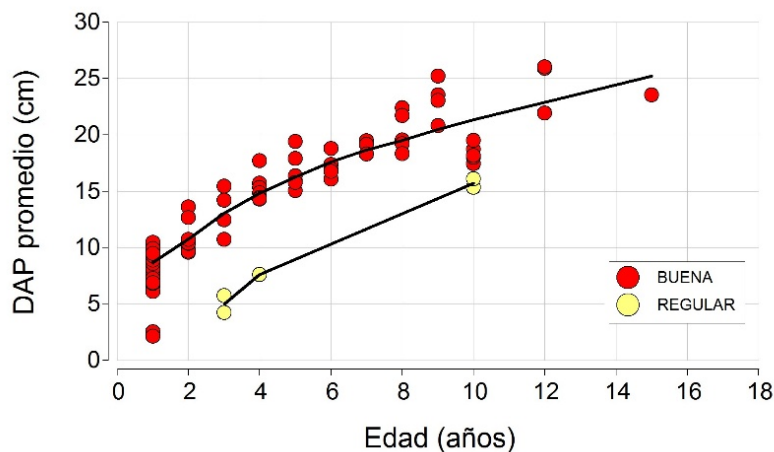
los 16 años. Aunque su crecimiento es más lento que el de los sitios de calidad muy buena, mantienen un desarrollo estable. Los sitios buenos también permiten un crecimiento adecuado, pero con una menor velocidad de desarrollo comparado con los sitios óptimos.

- c. Sitios de calidad regular (puntos amarillos): Los individuos en estos sitios experimentan el crecimiento más limitado, alcanzando una altura promedio de unos 20 metros a los 16 años. El crecimiento en los primeros años es mucho más lento en comparación con los otros dos grupos, y la curva es menos pronunciada, lo que indica que las condiciones en estos sitios son más restrictivas para el desarrollo de los árboles.

La figura 16 resalta la influencia de la calidad del sitio en el crecimiento de los árboles a lo largo del tiempo, siendo un elemento crucial para la toma de decisiones en el manejo forestal. Los sitios de mayor calidad permiten a los árboles alcanzar su máximo potencial de altura, mientras que los sitios regulares limitan significativamente su crecimiento, lo que puede tener implicancias tanto en la productividad como en la planificación forestal.

**Figura 17**

*DAP promedio en función de la edad y las calidades de sitio*



**Nota:** Los colores representan las distintas calidades (rojo: buena; amarillo: regular).

Se puede observar que, en general, los árboles con buena condición de crecimiento presentan un DAP promedio mayor a los árboles con condición de crecimiento regular, para

una misma edad. Esto indica que los árboles con buena condición de crecimiento crecen a un ritmo más rápido que los árboles con condición de crecimiento regular.

#### 4.3. Rodales con intervención de un raleo

Empleando el mismo protocolo de trabajo que en rodales sin manejo, adicionando la edad de intervención. En la tabla 11 se puede observar todos los modelos explorados:

**Tabla 11.**

*Criterios de selección de modelos para sitios con una intervención.*

Modelos	DAP (cm)		HT (m)	
	AIC	BIC	AIC	BIC
MLM	132520	132585	118256	118321
MLMh	128147	128220	112651	112724
<b>MLMhc</b>	<b>102284</b>	<b>102356</b>	<b>89879</b>	<b>89951</b>
MNLMg	132063	132104	117302	117343

**Nota:** AIC y BIC más bajos, mejor ajuste.

La ecuación de predicción para rodales con una intervención (raleo) para densidades iniciales de 600-1.600 pl/ha para las variables en estudio son:

$$DAP_{(cm)} = 15,79 - 0,0045 * DI + 2,7 * edad - 0,08 * edad^2 - 0,55 * edad \text{ del raleo} - 0,01 * DM$$

$$HT_{(m)} = 9,37 - 0,01 * DI + 3,57 * edad - 0,09 * edad^2 - 0,66 * edad \text{ del raleo} - 0,00016 * DM$$

Del MLMhc se obtuvieron los valores BLUP's, atendiendo al signo del mismo para cada parcela, y según los mismos se las clasificaron como: sitios de crecimiento superior (signo positivo) o crecimiento inferior (signo negativo) respecto de crecimiento medio poblacional.

De todos los sitios evaluados (parcelas), el 60% tiene un crecimiento de DAP y HT superior respecto al valor medio poblacional, la proporción restante, valores promedios por debajo de los estimados.

#### **4.3.1. Mapeo espacial de rodal con una intervención de raleo**

En cuanto al mapeo espacial, se realizó una cuidadosa selección de un macrositio que se consideró representativo para ilustrar los resultados obtenidos en este estudio. Esta decisión fue fundamental debido a la marcada variabilidad espacial observada entre los diferentes macrositios que componen el área de estudio. Cada macrositio presentaba características distintivas en términos de estructura forestal, como la densidad de árboles, la diversidad de espacial, la composición del suelo y las condiciones microclimáticas, factores que influyen directamente en la dinámica de crecimiento y desarrollo de las parcelas.

Dada esta heterogeneidad, se llevó a cabo un análisis exhaustivo para identificar el macrositio cuyas características promedio mejor reflejaran la totalidad del área de estudio. La elección de este macrositio no solo tenía como objetivo representar de manera adecuada las condiciones generales del entorno, sino que también buscaba proporcionar una base sólida para la extrapolación de los resultados a otras áreas con características similares. Al seleccionar un macrositio que encapsulara las condiciones promedio, se pudo garantizar que los hallazgos y conclusiones obtenidos fueran aplicables a una escala mayor, aumentando así la relevancia y utilidad práctica del estudio.

Finalizado el proceso de selección introducido en la plataforma de software espacial *Fastmapping*, se procedió a la medición de datos posteriores al raleo, centrándose en dos variables clave: el DAP (diámetro a la altura del pecho) y la HT (altura total). Durante el análisis espacial de estos datos, no se detectaron outliers ni espaciales ni globales en la distribución de los valores de DAP, lo que indicaba una homogeneidad relativa en la respuesta del crecimiento diamétrico tras el raleo. Sin embargo, la situación fue diferente para la variable HT, donde se identificaron varios outliers globales. Estos outliers, que representaban valores atípicos significativamente diferentes del resto de los datos, fueron sometidos a un análisis detallado para determinar su origen y posible impacto en los resultados.

Se decidió eliminar estos outliers globales de HT antes de proceder con el análisis espacial posterior, con el fin de evitar que distorsionaran la interpretación de los patrones

espaciales y la relación entre las variables. Esta eliminación se justificó no solo por razones estadísticas, sino también por consideraciones prácticas, ya que la inclusión de estos valores atípicos podría haber llevado a conclusiones erróneas o sesgadas sobre la dinámica de crecimiento en el macrositio estudiado. De esta manera, el análisis espacial pudo realizarse de manera más precisa y con mayor confianza en la validez de los resultados, proporcionando así un marco robusto para futuras investigaciones y aplicaciones en manejo forestal.

En la Tabla 12, se presentan medidas resumen dasométricas a priori y a posteriori del raleo. Se observa que post-raleo la variabilidad tanto en DAP como en HT decreció.

**Tabla 12.**

*Medidas de resumen para las variables DAP (cm) y HT (m) antes (PreR) y después (PostR) de un raleo a distintas intensidades en un rodal de E. grandis.*

Medida	DAP (cm)		HT (m)	
	PreR	PostR	PreR	PostR
Mínimo	9,8	21,9	13,7	27,2
1° cuartil	21,8	24,0	28,0	29,0
Mediana	26,0	25,7	30,2	29,0
Media	25,3	25,5	29,4	29,6
3° cuartil	29,0	26,8	31,9	30,3
Máximo	39,5	29,1	36,5	31,3
CV (%)	24,0	6,4	15,6	2,6

**Nota:** (CV) coeficiente de variación; PreR (pre-raleo); PostR (post-raleo)

De la tabla anterior se obtuvo que:

Para el DAP (cm):

- a. Rango de DAP (mínimo y máximo): Antes del raleo, el rango del DAP era más amplio, con valores que oscilaban entre 9,8 cm y 39,5 cm. Esto indica una población de árboles con una notable heterogeneidad en tamaño. Después del raleo, el valor mínimo aumentó a 21,9 cm y el máximo disminuyó a 29,1 cm. Esto

se condice que los árboles más pequeños y más grandes fueron eliminados, concentrando la población en un rango de diámetros más estrecho y homogéneo.

- b. Distribución y dispersión de los datos (cuartiles, mediana y media): El 1er cuartil del DAP aumentó de 21,8 cm PreR a 24,0 cm PostR, lo que indicó que los diámetros más pequeños después del raleo son mayores que los que existían previamente, eliminando en su mayoría los árboles menores a 24 cm. La mediana se mantuvo casi igual (26,0 cm PreR vs. 25,7 cm PostR), lo que implica que el valor central de los diámetros no varió significativamente. El 3er cuartil disminuyó de 29,0 cm a 26,8 cm, lo que indicó que los diámetros más grandes en la población también se redujeron tras el raleo, pero se concentraron alrededor de valores más cercanos a la mediana. La media de DAP (25,3 cm PreR frente a 25,5 cm PostR) no varió considerablemente, lo que indica que el raleo no cambió sustancialmente el promedio de los diámetros en la población de árboles.

c. Variabilidad (Coeficiente de variación - CV): El CV PreR fue de 24,0%, lo que sugiere una alta variabilidad en los diámetros de los árboles antes del raleo. PostR, el CV disminuye drásticamente a 6,4%, lo que indica una mayor homogeneidad en los diámetros de los árboles después del raleo. Este cambio es consistente con el objetivo del raleo de reducir la competencia entre los árboles y fomentar una estructura más uniforme en la plantación, como se mencionó en párrafos anteriores.

En cuanto a HT (m):

- a. Rango de HT (mínimo y máximo): Previamente al raleo, la HT de los árboles varió considerablemente, con un mínimo de 13,7 m y un máximo de 36,5 m, lo que refleja una población de árboles muy heterogénea en cuanto a alturas. Después del raleo, el valor mínimo aumentó significativamente a 27,2 m, mientras que el valor máximo se redujo a 31,3 m. Esto sugiere que los árboles más bajos y más altos fueron eliminados, favoreciendo una población de alturas más concentradas y uniformes.
- b. Distribución y dispersión de los datos (cuartiles, mediana y media): El 1er cuartil permaneció estable (28,0 m PreR y 29,0 m PostR), lo que implica que los árboles más bajos del cuartil inferior mantuvieron una altura mínima cercana, pero el límite inferior se elevó notablemente. La mediana disminuyó levemente de 30,2 m PreR a 29,0 m PostR, lo que indica una ligera reducción en la altura mediana de los

árboles tras el raleo, aunque la diferencia no es sustancial. El 3er cuartil también disminuyó de 31,9 m a 30,3 m, lo que implica que los árboles más altos del cuartil superior fueron removidos, favoreciendo alturas más cercanas a la mediana. La media de HT apenas varió (29,4 m PreR a 29,6 m PostR), lo que sugiere que el raleo tuvo un impacto limitado en la altura promedio de la población de árboles.

- c. Variabilidad (Coeficiente de variación - CV): El CV PreR de HT fue de 15,6%, lo que refleja una moderada dispersión en las alturas de los árboles antes del raleo. Después del raleo, el CV se redujo drásticamente a 2,6%, lo que indica una homogeneización notable en las alturas de los árboles remanentes. Esta baja variabilidad post-raleo sugiere que el raleo contribuyó a la selección de árboles con alturas más similares entre sí.

#### Modelos teóricos de semivariogramas para DAP y HT:

El modelo teórico de semivariogramas que mejor ajustó la variabilidad espacial del diámetro a la altura del pecho (DAP) fue el modelo esférico, que presentó un 21% de error de predicción. Este tipo de modelo es frecuentemente utilizado para datos que muestran una correlación espacial decreciente de manera suave hasta alcanzar una distancia específica (el rango), tras lo cual los valores ya no están correlacionados. En este caso, el modelo esférico sugiere que los valores de DAP en los árboles están correlacionados hasta una distancia de 41,7 metros. Esto significa que, dentro de esta distancia, los valores de DAP de los árboles son similares, y a partir de esa distancia, las diferencias en el DAP entre árboles son más aleatorias. La elección del modelo esférico implica que la variabilidad espacial del DAP se caracteriza por una estructura espacial clara, con una transición gradual desde áreas altamente correlacionadas hasta áreas sin correlación.

En cuanto a la altura total (H), el modelo que mejor ajustó la variabilidad espacial fue el modelo exponencial, con un 11% de error de predicción. El modelo exponencial se utiliza generalmente cuando los datos muestran una correlación más suave y continua en distancias cortas, pero a diferencia del modelo esférico, la correlación nunca se anula completamente, solo disminuye a medida que la distancia entre puntos aumenta. En este caso, el modelo exponencial indica que los datos de altura de los árboles están correlacionados hasta una distancia de 87,2 metros. Esto sugiere que existe una relación espacial entre las alturas de los árboles en un área mayor en comparación con el DAP, lo que indica que la altura de los árboles puede depender de factores que influyen en una mayor extensión del terreno, como la disponibilidad de luz, agua o nutrientes a lo largo de grandes áreas.

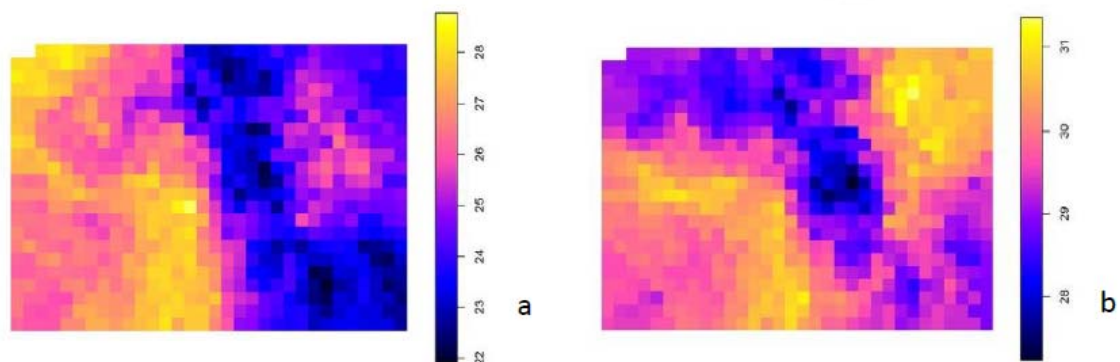
El menor error de predicción en el caso del modelo exponencial para la altura (11%) en comparación con el modelo esférico para el DAP (21%) puede estar relacionado con las diferentes dinámicas que afectan estas variables. La altura de los árboles suele estar influenciada por factores de crecimiento que actúan a una escala espacial más amplia, mientras que el DAP puede estar más influenciado por interacciones locales como la competencia entre árboles cercanos.

Estos resultados resaltan la importancia de seleccionar el modelo de semivariograma adecuado para describir la variabilidad espacial de cada variable, ya que permite optimizar las predicciones y mejorar la comprensión de los patrones espaciales dentro del bosque. Además, la distancia de correlación que proporcionan estos modelos puede ser útil para definir prácticas de manejo forestal más precisas, como la implementación de tratamientos de raleo o la planificación de nuevas plantaciones.

En la Figura 18 se pueden observar los mapeos de la variabilidad del macrositio para las variables medidas.

### Figura 18

*Mapeo de variabilidad del macrositio.*



**Nota:** a. variabilidad espacial del DAP (cm); b. variabilidad espacial de HT (m).

En la Figura 18 a. que grafica la variabilidad espacial del DAP, la escala de colores en la barra lateral indica que los valores del DAP varían entre 22 cm (áreas más oscuras, azul) y 28 cm (áreas más claras, amarillo).

Se observa una variabilidad significativa, con una marcada transición entre áreas con DAP más pequeños (en azul, predominantemente en la parte derecha del mapa) y áreas con diámetros mayores (en amarillo/naranja, en la parte izquierda).

Esto podría indicar que las áreas a la izquierda del mapa están dominadas por árboles con un crecimiento más vigoroso en diámetro, mientras que, en las áreas de la derecha, los árboles tienen diámetros menores.

En la Figura 18 b. la variabilidad espacial para HT, la escala de colores para la altura muestra variaciones entre 28 metros (áreas más oscuras) y 31 metros (áreas más claras).

Similar al DAP, hay una variabilidad evidente en la altura de los árboles, aunque el patrón espacial es ligeramente diferente. Se pueden observar áreas más claras (amarillas) concentradas en la parte superior derecha y algunas manchas en la parte izquierda, lo que sugiere que las alturas más altas están distribuidas de manera menos uniforme que el DAP. Las áreas con valores de HT más bajos, representadas en azul y púrpura, predominan en el centro del mapa.

Con este mapeo de variabilidad espacial (Figura 18) para el DAP permitió identificar tres zonas homogéneas, o clústeres, de sitios, así como dos zonas para la HT. A pesar de que se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las medias zonales de estas variables, con un nivel de significancia de  $\alpha=0,05$ , es importante destacar que las zonas identificadas no coincidieron con los tratamientos de raleo aplicados previamente. Esto sugiere que los efectos de los tratamientos de raleo no se manifestaron de manera uniforme en la distribución de DAP y HT.

El coeficiente de variación para DAP fue relativamente bajo, en un 6,4%, lo que indica una variabilidad moderada en las mediciones dentro de las zonas identificadas. Los tres grupos de DAP que resultaron estadísticamente distintos entre sí presentaron medias de 23,5 cm, 25,4 cm y 27,1 cm, mostrando una diferencia promedio de casi 2 cm entre cada grupo. Esta diferencia en DAP podría tener implicaciones significativas para la evaluación del crecimiento y desarrollo de los árboles en función de su densidad y manejo silvicultural.

En el caso de HT, se reconocieron solo dos grupos distintos: el primero con una altura media de 29,0 m y el segundo de 30,2 m. El coeficiente de variación para HT fue incluso más bajo, con un 2,6%, lo que sugiere una homogeneidad notable dentro de las mediciones de altura. La diferencia de 1 metro entre estas dos zonas de HT, aunque menos pronunciada que en DAP, también puede ser relevante desde el punto de vista del manejo forestal, ya que puede reflejar variaciones en el crecimiento influenciadas por factores como la disponibilidad

de recursos o la competencia entre individuos. En la tabla 13 se detalla las características de las zonas homogéneas identificadas en el mapeo de variabilidad para las variables estudiadas.

**Tabla 13**

*Características de las zonas homogéneas identificadas para el DAP y HT*

<b>Variable</b>	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>	<b>CV (%)</b>
<b>DAP (cm)</b>	23.5	25.4	27.1	6.4
<b>HT (m)</b>	29.0	30.2	-	2.6

**Nota:** CV. Coeficiente de variación (%)

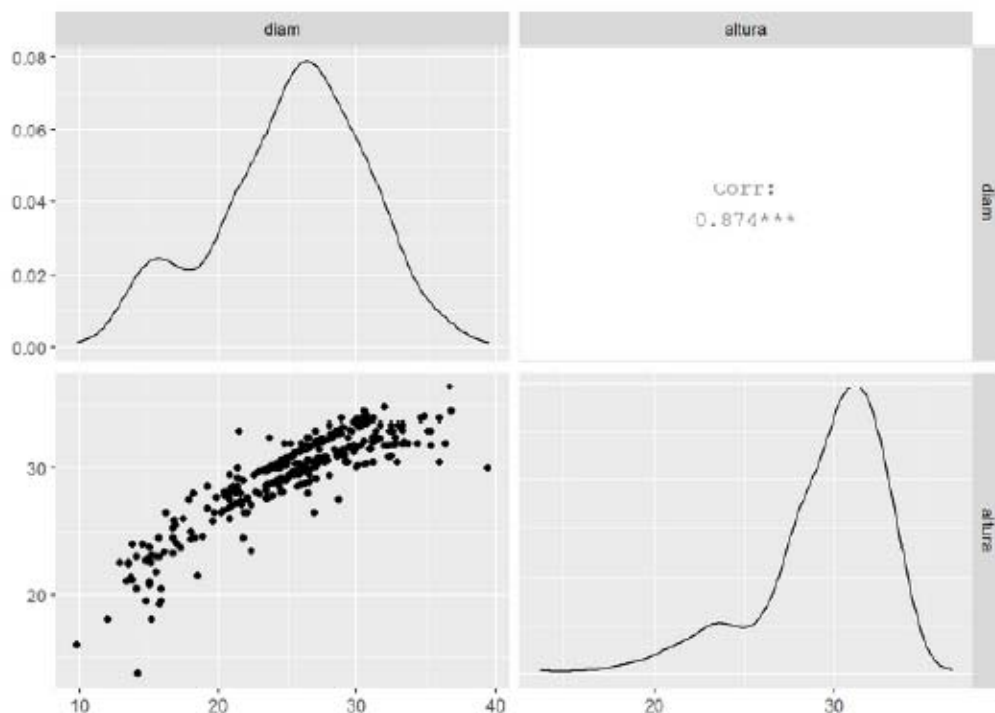
Además, los modelos de semivariogramas que mejor ajustaron la variabilidad espacial también respaldan esta interpretación. El modelo Esférico fue el que presentó menor error de predicción para el DAP (21% de error de predicción), sugiriendo que los datos de DAP están correlacionados hasta una distancia de 41,7 metros. En el caso de la HT, el modelo Exponencial fue el más adecuado, con un error de predicción del 11% y una distancia de correlación de 87,2 metros. Esto refleja que la altura de los árboles muestra una correlación espacial más extendida que el DAP.

En conjunto, estos análisis muestran una variabilidad significativa en el crecimiento de los árboles, tanto en diámetro como en altura, lo que sugiere que las decisiones de manejo forestal, como los tratamientos de raleo, deben ajustarse a estas zonas de variabilidad para optimizar el rendimiento del bosque.

En la figura 19 se observa el análisis de zonificación bivariada, y teniendo en cuenta ambas variables, muestra que existe una fuerte correlación espacial entre DAP y HT (0.874). (Figura 19).

**Figura 19**

*Distribución del DAP y de HT en un rodal post-raleo. Correlación espacial entre variables*



En la esquina superior izquierda de la Figura 19, se observa el histograma de densidad del DAP, en el que la curva indica que la mayoría de los árboles tienen diámetros entre 20 y 30 cm. El pico más alto sugiere que hay una mayor frecuencia de árboles en ese rango. Existe una ligera desviación en la cola izquierda, lo que podría indicar que hay algunos árboles con diámetros relativamente pequeños (quizás árboles jóvenes o en zonas de crecimiento limitado), esto coincide con lo detallado anteriormente. La mayoría de los árboles del macrositio tienen diámetros medios, con menos árboles en los extremos (muy pequeños o muy grandes). Esta información es útil para entender la estructura de la población de árboles.

En la esquina inferior derecha de la Figura 19 se muestra la distribución de la altura de los árboles. Nuevamente, observamos una distribución unimodal con un claro pico alrededor de 25-30 m. La forma de esta curva es algo más pronunciada que la del DAP, lo que sugiere que hay menos dispersión en las alturas de los árboles: muchos árboles parecen tener alturas similares. La distribución indica que la mayoría de los árboles tienen alturas cercanas entre sí, lo que implica que las condiciones de crecimiento en la zona estudiada son bastante homogéneas.

El diagrama de dispersión en la parte inferior izquierda de la Figura 19 muestra la relación entre el diámetro (DAP) y la altura (HT), en el que se observa una clara tendencia ascendente, es decir, a medida que el diámetro del tronco aumenta, también lo hace la altura del árbol. Los puntos se agrupan de manera bastante ajustada en una relación casi lineal, lo que sugiere una relación directa entre el tamaño del tronco y la altura del árbol. Por otro lado, aunque hay una tendencia general clara, también hay variabilidad en la relación. Algunos árboles con diámetros similares pueden tener alturas bastante diferentes. Esto podría deberse a diferencias propias del macrositio.

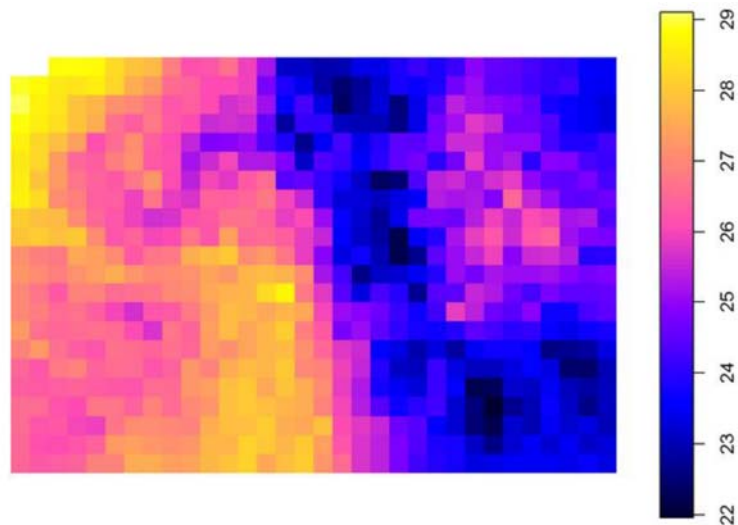
La relación entre el DAP y la altura es clara y significativa. El diagrama de dispersión muestra que estas variables están altamente correlacionadas. El valor de la correlación de Pearson (0.874\*\*) indica una correlación positiva fuerte. El coeficiente de correlación varía entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una correlación positiva fuerte (a medida que una variable aumenta, la otra también), y valores cercanos a 0 indican que no hay relación.

En este caso, un valor de 0.874 indica que hay una relación lineal muy fuerte entre el DAP y HT. Este valor está muy cerca de 1, lo que sugiere que un alto porcentaje de la variación en la altura de los árboles puede explicarse por el DAP. Los tres asteriscos (\*\*\*) sugieren que esta correlación es estadísticamente significativa, probablemente con un valor  $p < 0.001$ , lo que refuerza la idea de que la correlación observada no es producto del azar, sino que refleja una relación real y sólida entre el DAP y la HT.

En la Figura 20, se observa el mapa de predicción espacial considerando ambas variables.

## Figura 20

### *Mapa de predicción espacial*



A la derecha de la Figura 20 se muestra una barra de colores que va desde el azul oscuro (para los valores más bajos) hasta el amarillo (para los valores más altos). Los colores representan un rango de valores que van de 22 a 29. Esta escala corresponde a la combinación de las dos variables consideradas. Se observan claramente dos zonas diferenciadas por el color, lo que sugiere que el área analizada está dividida en dos regiones más o menos homogéneas:

- Zona amarilla/rosa (izquierda): Esta región corresponde a valores más altos (27-29 en la escala de colores). Representan los mayores valores de las variables en cuestión.
- Zona azul/púrpura (derecha): Aquí los valores son más bajos (22-24 en la escala de colores). Esto representa la zona con menores valores de las variables.

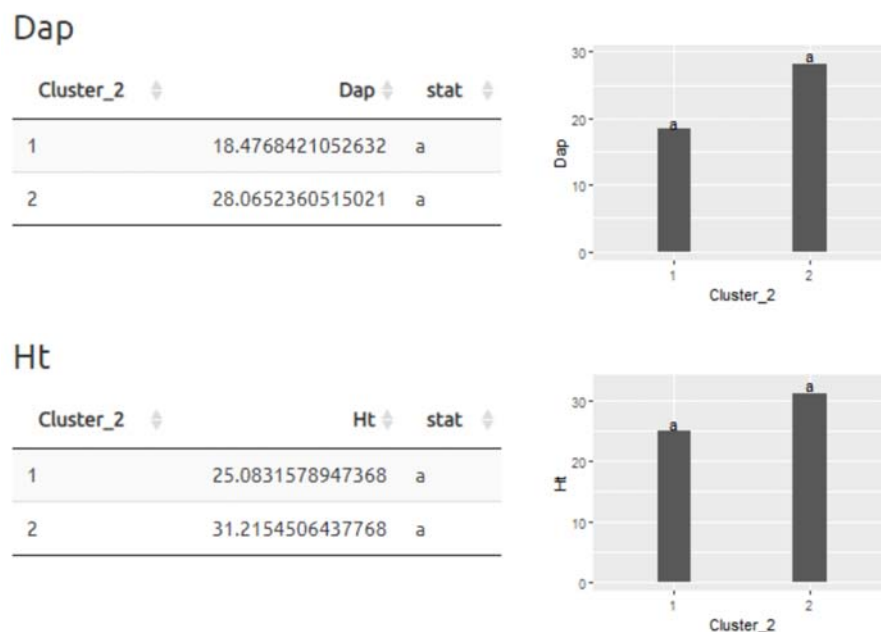
Entre estados dos zonas homogéneas se muestra una transición gradual entre las zonas amarillas y las azules, especialmente en la zona central donde predominan los colores intermedios (rosa y púrpura). Esto sugiere que no existe una separación abrupta, sino un gradiente en las condiciones o en los valores de las variables analizadas. En otras palabras, hay un cambio progresivo de una zona a otra, lo que podría representar una variación natural en el espacio o una interacción entre las dos variables que se está estudiando.

Aunque estadísticamente entre estas zonas no existen diferencias significativas como muestra la Figura 21. Las zonas podrían estar asociadas con variables de suelo o topografía, temporalmente estables, pero no con el raleo ya que la práctica se realizó con distintas intensidades en parcelas aleatorias distribuidas por todo el macrositio.

Consecuentemente, estos resultados indican que el raleo ha homogeneizado la distribución dasométrica de los individuos y que los de mayor DAP también son los individuos de mayor HT. Los resultados validan el concepto y finalidad del raleo; algunos autores han sugerido que una vez efectuado redistribuye la densidad y espaciamiento para favorecer a los árboles selectos con un mayor diámetro y altura al final del turno de corta (Caniza et al., 2008, Espinoza et al., 2009, Guerra-Bugueño, 2012, Díaz Bravo et al, 2012, Mastrandrea et al., 2014, Masapanta, 2015, Mastrandrea et al., 2016, García et al., 2017).

**Figura 21**

*Validación del mapeo*



A pesar de observarse dos zonas homogéneas, el uso de la letra "a" en ambos clústeres para las variables DAP y HT indica que, desde un punto de vista estadístico, las diferencias observadas en los promedios no son significativamente diferentes. Esto significa que, aunque visualmente los valores parecen distintos, la variabilidad interna en los datos es lo suficientemente alta como para que no se pueda concluir que los clústeres son distintos en estas variables.

## 5. DISCUSIÓN

- Impacto del Raleo en la Productividad y Crecimiento Forestal

El presente estudio ha permitido analizar con mayor detalle el impacto de las diferentes intensidades de raleo sobre la productividad y el crecimiento forestal. Siguiendo la estructura metodológica de Barrios et al. (2016), se evaluaron los efectos de la densidad inicial y el manejo silvícola sobre las principales variables de crecimiento. Los resultados mostraron que el raleo, al reducir la competencia entre los árboles, tiene un efecto directo en la redistribución de los recursos disponibles, tales como luz, agua y nutrientes, lo que se traduce en un incremento en el diámetro a la altura del pecho (DAP) y en la altura total (HT) de los árboles remanentes.

Los análisis exploratorios, a través de gráficos y tablas, evidenciaron que las parcelas (sitios) sometidas a raleos más intensos experimentaron un crecimiento diamétrico superior, especialmente a medida que la plantación envejecía. Estos hallazgos coinciden con lo documentado por Cremer et al. (1984) y Prodan et al. (1997), quienes describieron cómo la competencia intraespecífica en rodales densos puede limitar severamente el desarrollo individual de los árboles. Asimismo, el estudio de Methol (2002) sobre eucaliptos y pinos proporciona una referencia clave, destacando que el raleo puede incrementar significativamente la producción de madera de calidad al favorecer el desarrollo de los árboles dominantes.

Además, estudios como el de Crechi et al. (2005) refuerzan la importancia del raleo en el crecimiento diamétrico, lo que está en línea con los hallazgos en este trabajo. En particular, se observó que, a mayor intensidad de raleo, mayor fue la diferencia en el DAP entre los rodales intervenidos y los no intervenidos, destacando la relevancia de este manejo para aumentar el valor económico del bosque. Estos resultados también concuerdan con los trabajos de Arango y Tamayo (2008), quienes encontraron que el raleo temprano promueve un crecimiento más rápido y uniforme, optimizando tanto la cantidad como la calidad de la madera producida. Asimismo, Martiarena et al. (2014) documentaron incrementos del 37% en el crecimiento diamétrico en parcelas con raleos intensos, lo que coincide con los hallazgos de este estudio, y subraya la importancia de adaptar la densidad de plantación y los momentos de intervención para maximizar la producción.

- Modelado del Crecimiento Forestal

La modelización del crecimiento forestal es una herramienta clave para comprender la dinámica del desarrollo en rodales sometidos a distintas prácticas silvícolas. En este estudio, la estructuración de la base de datos, siguiendo las recomendaciones de García (2013) y Barrios e Irigoyen (2015), permitió realizar un análisis detallado de las interacciones entre densidad de plantación, calidad del sitio y edad de los árboles. Este enfoque permitió no solo cuantificar el impacto del raleo, sino también comparar estos resultados con investigaciones previas, como la de Smith et al. (2006), quienes demostraron que la calidad del sitio y la densidad inicial son determinantes en el crecimiento y la producción.

Los resultados obtenidos, presentados en las Tablas 3 y 4 y en las Figuras 9 y 10, corroboran que el raleo impacta significativamente en el diámetro medio, especialmente cuando se aplica en las primeras fases de crecimiento. De manera particular, los rodales intervenidos a edades tempranas presentaron mayores incrementos diamétricos, una observación en línea con los estudios de Methol (2002) y Crechi et al. (2005). Esta tendencia sugiere que los árboles que experimentan menos competencia desde una etapa temprana pueden desarrollar un sistema radicular más robusto y aprovechar mejor los recursos disponibles, lo que favorece su crecimiento sostenido a lo largo del tiempo.

El modelado del crecimiento utilizando modelos lineales mixtos (MLMhc), que incorporan variabilidad espacial y temporal, resultó particularmente efectivo en este estudio. El uso de estos modelos permitió capturar la heterogeneidad en el crecimiento de los árboles y proporcionar predicciones más ajustadas a las características específicas de cada sitio, tal como lo destacan Balzarini et al. (2004) y Di Rienzo et al. (2012). Además, el empleo de BLUP (Mejor Predictor Lineal Insegado) facilitó la evaluación precisa de los efectos específicos del sitio, lo cual es crucial para la planificación del manejo forestal, ya que permite identificar aquellos lugares con mayor potencial de crecimiento y ajustar las intervenciones en consecuencia.

- Silvicultura de Precisión y Variabilidad Espacial

Uno de los aspectos más innovadores de este estudio fue la evaluación de la variabilidad espacial en el crecimiento forestal, lo que aporta una perspectiva importante en la implementación de estrategias de silvicultura de precisión. Los resultados indicaron la existencia de zonas homogéneas en cuanto a DAP y HT, aunque no siempre coincidieron con los tratamientos de raleo aplicados. Esto sugiere que factores adicionales, como las

características del suelo y la topografía, podrían estar influyendo de manera significativa en la distribución del crecimiento, como también lo han señalado estudios previos (Córdoba et al., 2019; Paccioretti et al., 2020).

La silvicultura de precisión, que busca ajustar las prácticas de manejo a las condiciones espaciales y ambientales específicas de cada sitio, permite una optimización tanto de la productividad como de la sostenibilidad. Este enfoque es cada vez más relevante en la gestión forestal, ya que la variabilidad ambiental entre sitios puede tener un impacto profundo en el crecimiento y desarrollo de los árboles. Como destacan Sandoval y Di Bella (2009), la integración de datos espaciales con herramientas tecnológicas permite la implementación de estrategias de manejo diferenciado que maximizan los beneficios económicos y ecológicos.

Sin embargo, es importante reconocer que la aplicabilidad de la silvicultura de precisión puede verse limitada por la disponibilidad de datos detallados y la capacidad de interpretar la variabilidad espacial en función de las características locales. Tal como lo señalan Gómez García (2018) y Salgado (2011), la calidad de los datos recolectados es esencial para el éxito de este enfoque. Por tanto, la recolección continua de información es fundamental para adaptar y refinar estas prácticas a condiciones forestales específicas.

- Limitaciones y Aplicabilidad de los Resultados

A pesar de los hallazgos significativos, es fundamental considerar las limitaciones inherentes a este estudio. Los resultados obtenidos están circunscritos a las condiciones específicas de las parcelas evaluadas, que presentaban densidades iniciales de entre 1.000 y 1.100 plantas por hectárea. Según Meza Montoya y Torres Córdoba (2006), la extrapolación de estos resultados a otros contextos forestales debe realizarse con cautela, ya que las variaciones en el tipo de suelo, el clima y las especies pueden influir en la respuesta al raleo.

No obstante, los hallazgos aquí presentados proporcionan una base sólida para la adaptación de las prácticas silvícolas en contextos similares. Estudios como los de Gómez García (2017) y Morales et al. (2018) subrayan la importancia de ajustar las estrategias de manejo forestal a las condiciones locales, y estos resultados pueden servir como una guía valiosa para la implementación de intervenciones silvícolas que optimicen la productividad y la calidad de los bosques.

- Herramientas Estadísticas y Predicción de Crecimiento

El uso de herramientas estadísticas avanzadas, como los modelos lineales mixtos y BLUP, fue crucial para capturar la variabilidad en el crecimiento forestal y proporcionar predicciones precisas y fiables. Estos modelos, que integran tanto efectos fijos como aleatorios, permiten un análisis robusto de los datos repetidos en el tiempo, lo que es esencial para comprender las dinámicas del crecimiento en rodales sometidos a distintas prácticas de manejo (Balzarini et al., 2004; Di Rienzo et al., 2012).

El uso de BLUP fue particularmente relevante en este estudio, ya que permitió identificar sitios con rendimientos superiores o inferiores al promedio poblacional, lo que facilita la toma de decisiones informadas en la planificación silvícola. Este enfoque, tal como lo destacan Casanoves et al. (2005) y Piepho et al. (2008), es una herramienta valiosa para capturar la variabilidad espacial y temporal, lo que mejora la capacidad predictiva de los modelos y su aplicabilidad en la gestión forestal.

En resumen, este estudio proporciona evidencia sólida sobre la importancia del raleo para mejorar la productividad forestal y la calidad de la madera. Los modelos estadísticos empleados demostraron ser herramientas eficaces para integrar factores espaciales y temporales en el análisis del crecimiento forestal, lo que permite realizar predicciones más precisas y ajustar las prácticas de manejo a las características específicas del sitio.

Sin embargo, es necesario seguir recolectando datos y desarrollando nuevas metodologías para reducir los márgenes de error y mejorar la precisión de las predicciones en diferentes contextos forestales. El presente estudio ha contribuido significativamente al entendimiento de cómo las intervenciones silvícolas, como el raleo, pueden optimizar el crecimiento y la producción de madera, pero futuros estudios deben centrarse en explorar estas dinámicas en una variedad más amplia de condiciones ambientales.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio han permitido identificar la influencia directa del manejo silvícola mediante raleo en el crecimiento de los rodales de *E. grandis*. El análisis de las distintas densidades iniciales y edades de intervención ha arrojado conclusiones importantes, que no solo validan las hipótesis propuestas, sino que también abren nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia en la gestión forestal. Entre las conclusiones más relevantes destacan las siguientes:

1. Incrementos en diámetro medio en rodales con raleo: Para densidades iniciales comprendidas entre 800 y 1.600 plantas por hectárea (CDI 8-15), se observó un crecimiento superior en el diámetro medio en los rodales sometidos a raleo (uno, dos o tres intervenciones), en comparación con aquellos que no lo recibieron. Esto se mantuvo constante en todas las edades de medición incluidas en el estudio, lo que subraya el impacto positivo del raleo en el crecimiento radial. Este hallazgo es de gran relevancia, ya que refuerza la idea de que el manejo silvícola activo no solo optimiza el uso del espacio y los recursos, sino que también permite maximizar el crecimiento de los árboles remanentes.
2. Crecimiento en altura total media: La altura total media presentó un comportamiento similar al del diámetro medio, aunque el efecto del raleo en esta variable fue menos pronunciado. Si bien los rodales con raleo tendieron a alcanzar mayores alturas promedio, aún no es posible discernir si estas diferencias se deben únicamente al manejo silvícola o a otros factores como la calidad de sitio, topografía, condiciones ambientales, etc.
3. Efecto del momento del raleo en el crecimiento: Un resultado particularmente relevante se observó en el caso del CDI 13 (1.301-1.400 pl/ha), donde al realizar el raleo a los 4 años se lograron incrementos en el crecimiento superiores a los obtenidos cuando el mismo manejo se efectuó a los 5 años. Este hallazgo sugiere que la sincronización del raleo es un factor crítico, que podría influir de manera significativa en el rendimiento final del rodal. Este conocimiento es de gran valor para ajustar prácticas de manejo y optimizar los esquemas de intervención en el tiempo.
4. Importancia de la información precisa para la predicción: Disponer de información detallada sobre la densidad inicial, la edad de plantación, la edad de intervención, así

como la variabilidad ambiental en distintos sitios, se confirmó como suficiente para anticipar con precisión el DAP (diámetro a la altura del pecho) y la altura total (HT) esperables en rodales intervenidos con raleo. La capacidad de prever el comportamiento de estos rodales en función de estas variables es crucial para mejorar la planificación forestal y la toma de decisiones en el manejo de plantaciones de *E. grandis*.

5. Validez del modelo lineal mixto heterocedástico con correlación espacial: El modelo lineal mixto heterocedástico con correlación espacial utilizado en este estudio se mostró como un buen estimador de los promedios poblacionales del DAP y la HT, válido para los sitios de los rodales raleados donde se tomaron los datos. Para aplicar este modelo a otros sitios, será necesario ajustar los parámetros a las particularidades de cada sitio, incluyendo densidades y tratamientos silvícolas específicos. Esta flexibilidad del modelo refuerza su potencial como una herramienta predictiva robusta.
6. Clasificación de sitios según el crecimiento observado: En los rodales sin raleo, se identificaron tres clases de sitio: muy buena, buena y regular. En contraste, los sitios intervenidos con raleo mostraron un comportamiento más heterogéneo, donde los valores BLUP's positivos indicaron un crecimiento superior al promedio poblacional y los negativos, un crecimiento inferior. Esta diferenciación es clave para entender cómo el manejo silvícola puede influir en el desarrollo de los rodales y cómo esta influencia varía en función de las condiciones específicas del sitio.
7. Aplicación del raleo como técnica de homogenización: Los resultados obtenidos validan el concepto del raleo como una técnica eficaz para homogenizar las características dasométricas de los individuos dentro del rodal. Esta homogenización es deseable desde un punto de vista operativo, ya que facilita la planificación de las intervenciones futuras y asegura una mayor uniformidad en la calidad de la madera producida. Además, este efecto homogenizador tiene implicaciones directas en la productividad del rodal, al asegurar un uso más eficiente de los recursos disponibles.
8. Uso del software de análisis espacial: El uso de un software con una interfaz amigable para el análisis de la variabilidad espacial a nivel específico de cada sitio se destacó como una herramienta invaluable. No solo simplifica el proceso de análisis, sino que también proporciona resultados más detallados y precisos, lo que contribuye a una mejor comprensión de los patrones espaciales de crecimiento y permite optimizar las

prácticas de manejo. En este sentido, el software se convierte en un aliado fundamental para avanzar hacia una silvicultura de precisión.

9. Autocorrelación espacial y áreas homogéneas: El análisis espacial reveló que la variabilidad del DAP fue relativamente baja, con autocorrelación espacial hasta los 41,7 metros, mientras que la altura total fue aún menos variable, con autocorrelación espacial hasta los 87,2 metros. Se identificaron tres áreas homogéneas para el DAP y dos para la altura total, independientemente de los tratamientos de raleo realizados. Estos resultados subrayan la importancia de tener en cuenta la variabilidad espacial en los análisis forestales, ya que ésta puede influir en la respuesta del rodal a los tratamientos silvícolas.
10. Validación y mejora continua de los modelos predictivos: La validación de las experiencias en plantaciones donde se han realizado intervenciones silvícolas es fundamental para afinar la capacidad predictiva de los modelos utilizados. Cuanto más precisos y fiables sean los datos, mayor será la capacidad de los modelos para predecir con exactitud el comportamiento futuro de los rodales. Esto permite ajustar las prácticas de manejo de manera más eficiente y garantizar resultados más predecibles y consistentes en las plantaciones de *E. grandis*.
11. Silvicultura de precisión como futuro de la gestión forestal: Este estudio representa un primer paso hacia el desarrollo de una silvicultura de precisión, basada en el análisis detallado de datos espaciales y temporales. La posibilidad de anticipar el comportamiento de los rodales mediante modelos predictivos basados en información precisa permite tomar decisiones más informadas y mejorar la eficiencia en el manejo de los recursos forestales. Sin embargo, es necesario continuar investigando y desarrollando nuevas herramientas y metodologías que permitan una mayor precisión en las predicciones.

## **Conclusiones finales:**

Este trabajo ha demostrado con claridad que las hipótesis planteadas al inicio del estudio son válidas. Los resultados obtenidos confirman que los mayores incrementos en altura y diámetro en los árboles remanentes de un rodal son consecuencia directa de la intervención mediante raleo, lo que optimiza el uso de los recursos disponibles como la luz, el agua y los nutrientes. Esta mejora en el crecimiento no solo tiene implicaciones directas en la productividad de los rodales, sino que también permite una mayor homogeneidad en las características dasométricas de los árboles, lo cual es esencial para la planificación de turnos y la gestión eficiente de los recursos forestales.

Además, el estudio ha evidenciado que la calidad de la madera está fuertemente influenciada tanto por la variabilidad del sitio como por el esquema de raleo elegido. Esto resalta la importancia de ajustar las prácticas de manejo según las condiciones específicas de cada sitio, lo que apunta hacia una gestión forestal más adaptativa y consciente de las particularidades ambientales. De esta manera, la silvicultura de precisión emerge como una herramienta clave para maximizar no solo el rendimiento de los bosques, sino también la calidad del producto final, garantizando así una producción forestal más competitiva y alineada con las demandas del mercado.

Este estudio no solo valida conocimientos previos, sino que sienta las bases para el desarrollo e implementación de nuevas técnicas de manejo forestal. La incorporación de modelos predictivos basados en datos empíricos permite una mayor precisión en la toma de decisiones, favoreciendo un manejo forestal que puede anticipar respuestas a largo plazo y reducir la incertidumbre en escenarios futuros. En este sentido, la silvicultura de precisión, apoyada en avances tecnológicos y metodológicos, se perfila como la vía para mejorar la sostenibilidad de las plantaciones forestales.

Por tanto, este trabajo representa un paso significativo hacia el futuro del manejo forestal, donde la predicción y el manejo eficiente de los recursos sean los pilares fundamentales para asegurar una producción forestal sostenible. No obstante, el éxito de estas estrategias dependerá de la continua recolección de datos y el perfeccionamiento de los modelos predictivos utilizados, permitiendo que los profesionales del sector puedan seguir adaptando las prácticas a un entorno cambiante y cada vez más desafiante.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Abellanas, B., Abellanas, M., y Vilas, C. (2007). Modelización de bosques mediante diagramas de Voronoi. 8.
- Acosta, F., Giménez, L., Richieri, C., & Calvi, M. (2009). Zonas agroeconómicas homogéneas de Corrientes. Descripción ambiental, socioeconómica y productiva (8th ed., p. 68). Cuidad Autónoma de Buenos Aires: Centro Regional Corrientes INTA. Recuperado a partir de <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-zonas-agroeconomicas-homogeneas-corrientes.pdf>
- Aguerre, M., Carpineti, L., Dalla Tea, F., Denegri, G., Frangi, J., & Garran, S. et al. (1995). Manual para productores de eucaliptos de la Mesopotamia Argentina. Concordia, Entre Ríos, Argentina: INTA. 71.
- Aparicio, J., Larroca, F. & Dalla Tea, F. (2005). Silvicultura de establecimiento de *Eucalyptus grandis*. IDIA XXI N° 8. 64-67. Disponible en <http://anterior.inta.gov.ar/ediciones/idia/> (consultada noviembre 2017).
- Arango, B., Tamayo, L. (2008). Densidad de la madera en clones de *Eucalyptus* por densitometría de rayos X. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 45: 87-89.
- Archila, L. (2014). Productividad de las plantaciones forestales en los diferentes tipos de raleos en la región II Las Verapaces. Guatemala.
- Assmann, E. (1970). The Principles of Forest Yield Study. Pergamon Press.
- Baluart Vázquez, JR (2012). Modelización del crecimiento de quince especies forestales comerciales del bosque aluvial inundable de la amazonia peruana [Universidad de Santiago de Compostela]. <http://hdl.handle.net/10347/6149>
- Balzarini, M., Macchiavelli, R. y Casanoves, F. (2004). Aplicaciones de modelos mixtos en Agricultura y Forestería. (1° ed.).
- Balzarini, M., Macchiavelli, R. y Casanoves, F. (2015). Aplicaciones de Modelos Mixtos en Agricultura y Forestería. Costa Rica: CATIE. (2° ed.).
- Bancalari, M., & Muñoz Saez, F. (2005). Crecimiento y forma de los árboles. En Silvicultura de Plantaciones. Apuntes de clase (pp. 35-42). Concepción: Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Depto. Silvicultura. Recuperado a partir de [http://www2.udec.cl/~fmunoz/Apuntes\\_Silvicultura\\_Plantaciones.pdf](http://www2.udec.cl/~fmunoz/Apuntes_Silvicultura_Plantaciones.pdf)

- Barreiro Mouriz, O. (2003). La gestión forestal sostenible en las especies de rápido crecimiento y su silvicultura. XII Congreso Forestal. Quebec, Canadá.
- Barrios, M. F., Hirigoyen A. y García, M. A. (2015). Modelos de crecimiento para *Eucalyptus grandis* en la región sur de la Mesopotamia Argentina – Avances I. Comunicación presentada en Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia. Argentina.
- Barrios, M. F., García, M. A. y Balzarini, M. (2016). Modelos de crecimiento para *Eucalyptus grandis* en la región sur de la Mesopotamia Argentina – Avances II: Estructura de la base de datos. Comunicación presentada en Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia. Argentina.
- Barrios, S., González, M., & Irigoyen, A. (2019). \*Modelos estadísticos para el análisis de datos forestales en sistemas mixtos\*. Forest Ecology and Management, 439, 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.037>
- Bedendo, D. (2013). La aptitud forestal de los suelos como herramienta de zonificación en el contexto de una silvicultura de precisión. En Jornadas Forestales de Entre Ríos (pp. 2-16). Concordia. Entre Ríos: Área Forestales EEA INTA Concordia. Recuperado a partir de <http://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2013/566.I.BEDENDO.pdf>
- Bertomeu, M., Butler, B. J., & Montaña, J. M. (2011). Forest management decision-making under risk and uncertainty: Tools and approaches for developing decision support systems. Forest Policy and Economics, 13(3), 127-131.
- Bonnin, S., Haug, E., Mijailoff, J., y Ponce, S. (2015). Planificación silvícola: *Eucalyptus grandis* en el NE de la provincia de Entre Ríos. 17.
- Bravo, J. (2008). Establecimiento de plantaciones forestales [Diapositiva]. La Plata, Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata.
- Brizuela, A.B.; Milera, S. y Mestres, J.; (2004). Plantaciones de eucaliptos y pinos en los Departamentos del Este de Entre Ríos. Temas de la Biodiversidad del Litoral Fluvial Argentino I – Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO), Miscelánea Nro. 12: pp. 153-160.
- Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H., & White, J. S. (2009). Generalized linear mixed models: A practical guide for ecology and evolution. Trends in Ecology & Evolution, 24(3), 127-135.
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2004). Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach (2nd ed.). Springer.

- Cancino, J. (2006). Dendrometría básica. Concepción: Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento manejo de Bosques y Medio Ambiente. Concepción, Chile. Recuperado a partir de [http://www.sibudec.cl/ebook/UDEC\\_Dendrometria\\_Basica.pdf](http://www.sibudec.cl/ebook/UDEC_Dendrometria_Basica.pdf)
- Cárdenas, S. (2014). Variabilidad espacial de la densidad y el volumen en plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Uruguay. *Bosque*, 35(2), 155-164.
- Cao, Q., Liu, J., & He, Y. (2018). Effects of thinning intensity on timber quality and stand growth in different forest types. *Forest Ecology and Management*, 409, 223-233.
- Caniza, J., Muñoz, M., & González, G. (2008). Efecto del raleo en la distribución dasométrica y el crecimiento de pinos en plantaciones. *Revista de Ciencias Forestales*, 30(2), 235-249.
- Casanoves, F., & Balzarini, M. G. (2002). Introducción al análisis de datos con R. Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Casanoves, F., Di Rienzo, J. A., & Robledo, C. W. (2005). Introducción a la estadística con R. Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Casanoves, F., Pla, L., Di Rienzo, J. A., & Díaz, S. (2005). Statistical procedures for the analysis of plant functional traits. *Australian Journal of Botany*, 53(6), 763-771. <https://doi.org/10.1071/BT04111>
- Castedo-Dorado, F., Álvarez González, J. G., & Barrio-Anta, M. (2007). Dominant height growth models for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Galicia (northwestern Spain). *Forest Ecology and Management*, 241(1), 139-150.
- Castrignanò, A., Fadda, C., & Basso, B. (2006). A comparison of methods for estimating spatial variability of crop yields. *Geoderma*, 133(3-4), 251-264.
- Carrero, O., Jerez, M., Macchiavelli, R., Orlandoni, G. y Stock, J. (2008). Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophiila* en Venezuela. *Interciencia*, 33 (4), 265-272.
- Cieszewski, C. J. (2002). Comparing Fixed and Mixed-Effects Forest Growth Models. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(4), 805-812.
- Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., & Bailey, R. L. (1983). Timber management: A quantitative approach. John Wiley & Sons.

- Contreras, V. S. O. (2007). Análisis de Curvas de índice de sitio/altura dominante para un bosque siempreverde de *Nothofagus dombeyi* (Mirb.), en Valle Mirta, XI Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Universidad Austral de Chile.
- Córdoba, M. (2014). Herramientas estadísticas para el monitoreo y uso de la variabilidad espacial del rendimiento y propiedades del suelo intralote. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Escuela para graduados.
- Córdoba, M.; Balzarini, M.; Bruno, C.; Aguate, F; Paccioretti, P. (2015). Fastmapping v 1.0. Córdoba, Argentina.
- Córdoba, M.; Paccioretti, P; Guiannini Kurina, F.; Bruno, C. y Balzarini, M. (2019). Guía para análisis de datos espaciales. Aplicaciones en agricultura. Córdoba, Argentina: Brujas.
- Corvalán Vera, P. Y Hernández Palma, J. (2006). Densidad del rodal. Universidad De Chile.
- Crechi, E., Fassola, H., Keller, A. y Barth, S. (2011). Desarrollo de funciones de índice de sitio para *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia Argentina. Revista de Investigaciones Agropecuarias, 37 (3), 238-248.  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86421245008>
- Crechi, E., Fernandez, R., Friedl, R. y Fahler, C. (2005). Efectos del raleo en *Pinus taeda*: Noroeste de Misiones. IDIA XXI, 11 (8), 41-45.
- Cremer, K.W., Cromer, R. N., Florencia R.G. \_ 1984. Stand establecimiento. En: Hillis Y.. MI.; Marrón Editores AG. Eucalipto para WBuena producción, Prensa académica/CSIRO Australia, páginas 81 - 135.
- Cressie, N. (1993). Statistics for spatial data. Wiley.
- Cruzate, G., & Panigatti, J. (2008). Suelos y ambientes de Corrientes. Recuperado a partir de [http://www.geointa.inta.gob.ar/wpcontent/uploads/downloads/Laminas\\_de\\_Suelos/Corrientes\\_3.jpg](http://www.geointa.inta.gob.ar/wpcontent/uploads/downloads/Laminas_de_Suelos/Corrientes_3.jpg)
- Cubbage, F., Harou, P., & Sills, E. (2007). Policy instruments to enhance multi-functional forest management. Forest Policy and Economics, 9(7), 833-851.
- Dabs, E. (2000). Impact of thinning on wood quality. In Proceedings of the Forest Products Society Conference. Forest Products Society.
- Dalla Tea, F. (1993). Evaluación temprana de herbicidas y fertilizantes en plantación de *Eucalyptus grandis*. En *Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano*. Tomo VI. Paraná. Entre Ríos.

- Dalla Tea, F. (1995). Nuevas alternativas de plantación de eucalipto en la zona de Concordia. En X Jornadas Forestales de Entre Ríos (pp. 2-5-6-9). Concordia: Grupo Forestal. EEA INTA Concordia. Recuperado a partir de <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbmVzcm1hY2lvbmZvcnVzdGFsbWlzaW9uZXN8Z3g6N2RmNDE0OWQ2NzcwMmVjMg>
- Dalla Tea, F. y Marcó M. (1991). Respuesta del *Eucalyptus grandis* a la aplicación de fertilizantes en suelos arenosos del NE de Entre Ríos. Actas CIEF, Jornadas sobre Eucaliptos de alta productividad. Buenos Aires, pp. 290-300.
- Dalla Tea, F. (2004). Manejo de suelos arcillosos en plantaciones forestales. Editorial Agroforestal, Buenos Aires, Argentina.
- Davel, M. y A. Ortega. (2003). Estimación del índice de sitio para pino Oregón a partir de variables ambientales en la Patagonia Andina Argentina. Bosque 24(1): 55-69.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2018. (2018). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Di Rienzo, J. A.; Maquiavelo, R.; Casanoves, F. (2012). Modelos lineales mixtos. Aplicaciones en infoestadística. [https://www.researchgate.net/publication/283491350\\_Modelos\\_lineales\\_mixtos\\_aplicaciones\\_en\\_InfoStat](https://www.researchgate.net/publication/283491350_Modelos_lineales_mixtos_aplicaciones_en_InfoStat)
- Díaz Bravo S., M. Espinosa, L. Valenzuela, J. Cancino y J.P. Lasserre. (2012). Efecto del raleo en el crecimiento y algunas propiedades de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 15 años. Maderas. Ciencia y Tecnología, 14(3): 373-388. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2012005000009>.
- Díaz Bravo, J., Pérez, A., & Ramírez, H. (2012). Estrategias de manejo de raleo en plantaciones forestales: efectos sobre la densidad y el crecimiento. Investigación Forestal, 19(3), 321-332.
- Diéguez Aranda, U.; Rojo Alboreca, A. (2009). Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Facultad de Ciencias Forestales. Depto. Manejo de Recursos Forestales.
- Diggle, P. J., Liang, K. Y., & Zeger, S. L. (2002). Analysis of longitudinal data (2nd ed.). Oxford University Press.

- Diggle, P. J., Heagerty, P., Liang, K. Y., & Zeger, S. L. (2003). *Analysis of longitudinal data* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Dirección de Producción Forestal. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2015). *Argentina: Plantaciones forestales y gestión sostenible* (pp. 3, 5). Buenos Aires: Dirección de producción forestal.
- Dirección de Recursos Forestales. Ministerio de Producción. Gobierno de Corrientes. (2015). *Actualización del Inventario Forestal de Bosques Cultivados de la Provincia de Corrientes. Recuperado a partir de [http://recursosforestales.corrientes.gob.ar/assets/articulo\\_adjuntos/1779/original/Diptico\\_Inventario\\_2015\\_H1.jpg?1450792766](http://recursosforestales.corrientes.gob.ar/assets/articulo_adjuntos/1779/original/Diptico_Inventario_2015_H1.jpg?1450792766)*
- Dirección de Recursos Forestales. Ministerio de Producción. Gobierno de Corrientes. (2015). *Actualización del Inventario de Plantaciones Forestales de la Provincia de Corrientes* (pp. 53-54). Corrientes: Gobierno de Corrientes.
- Donoso Zegers, C. (1998). *Bosques templados de Chile y Argentina*. 2a. Ed. Santiago de Chile: Ed. Universitaria S.A. 93-104.
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis* (3rd ed.). Wiley.
- Eberhart, J. L., & Wood, B. D. (2006). Soil and site factors influencing timber quality. *Journal of Forestry Research*, 17(4), 287-295.
- Espinoza, J., García, R., & Castillo, R. (2009). Impacto del raleo en la dinámica de crecimiento y calidad de madera en plantaciones de eucalipto. *Journal of Forestry Research*, 14(4), 487-500.
- Fallas, J. (2012). *Regresión lineal simple y múltiple* (pp. 41-44). Universidad Nacional de Costa Rica- Escuela de Ciencias Ambientales- GeoAmbiente.
- FAO. (1981). *El Eucalipto en la repoblación forestal*. Roma.
- FAO. (2002). *Los árboles fuera del bosque*. Roma.
- FAO. (2015). *Global forest resources assessment 2015*. Roma.
- Fassola, H., Crechi, E., Keller, A., Barth, S. y Fernandez T., E. (2007). *Funciones y algoritmos dasométricos para manejo silvícola intensivo, de aplicación en plantaciones forestales orientadas a producción de madera de alto valor agregado: región mesopotámica*. Montecarlo, Misiones: INTA.

- Fernández Tschieder, E., Goya, J. F y Achinelli, F. (2013). Unidad IV: Modelos de crecimiento. Documento publicado en la Universidad Nacional de la Plata, curso de Silvicultura, material en línea, archivado en: [http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/16733/mod\\_resource/content/1/Gu%C3%ADa%20de%20modelos%20de%20crecimiento\\_2013.pdf](http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/16733/mod_resource/content/1/Gu%C3%ADa%20de%20modelos%20de%20crecimiento_2013.pdf)
- Field, A. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics* (4th ed.). Sage Publications.
- Gajardo Caviedes, P. (2005). *Silvicultura de plantaciones: apuntes de clase*. Concepción, Chile: [s.n]. 66-74.
- Galloway, G. (1993). *Manejo de plantaciones forestales: guía técnica para el extensionista forestal*. Costa Rica: Turrialba. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza (CATIE).
- García, J.T. (2013). *Modelización del crecimiento de Pinus pinaster L.* Universidad Autónoma de Nuevo León.
- García, O., & Ruiz, L. A. (2018). *Growth models for forest management: a compendium of theory and applications*. CRC Press.
- García, R., Martínez, C., & Gómez, J. (2017). Efectos del manejo de raleo en la calidad del crecimiento de árboles: una revisión. *Ciencia Forestal*, 22(3), 419-432.
- García Villabrille, J. D. (2015). *Modelización del crecimiento y la producción de plantaciones de Eucalyptus globulus Labill.* en el noroeste de España. Universidad de Santiago de Compostela.
- Glade, J. (1999). Curvas de índice de sitio para *Eucalyptus grandis* en Entre Ríos. PROFOSEC- Proyecto Forestal de Desarrollo. SAGPyA BIRF. INTA EEA-Concordia. [www.inta.gov.ar/concordia/info/indices/tematica/cd.../H1.pdf](http://www.inta.gov.ar/concordia/info/indices/tematica/cd.../H1.pdf)
- Glufke, C., Finger, C. A. G., y Schneider, P. R. (1997). Crecimiento de *Pinus elliottii Engelm* sobre diferentes intensidades de desbaste. *Ciência Florestal*, 7(1), 11. doi: 10.5902/19805098335
- Gómez García, M. (2017). Adaptación de prácticas forestales basadas en resultados de investigación: un enfoque contextual. *Editorial Forestal*, 32(1), 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.forest.2017.04.007>
- Gómez-García, E. (2018). Variabilidad espacial de la densidad y crecimiento en una plantación de *Pinus patula Schiede ex Schltdl. & Cham.* en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(1), 101-114.

- Gompertz, B. (1825). On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and a new method of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 115, 513-585.
- González Barrios, M. P. (2014). *Comparación de los modelos de análisis espacial para mejorar el manejo sitio específico de plantaciones de eucaliptus*. Universidad de la Republica. Facultad de Agronomía. Montevideo. Uruguay.
- Gregorie, T. G. and Schabenberger, O. (2001). Best linear unbiased prediction of tree height and basal area growth in mixed-species forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 3-16.
- Guerra-Bugueño, E. (2012). Modelos de crecimiento forestal y efectos del manejo de raleo en plantaciones. *Bosque*, 33(1), 63-74.
- Henderson, C. R. (1975). Best Linear Unbiased Estimation and Prediction under a Selection Model. *\*Biometrics\**, 31(2), 423-447. <https://doi.org/10.2307/2529430>
- Ingaramo L. y García Maritano. (2006). Implantación de un modelo de desarrollo forestal sustentable en Argentina y Uruguay. Concordia: INTA (no publicado).
- Instituto Forestal. (1998). Investigación manejo silvícola de especies del género *Eucalyptus* (pp. 12, 26, 27, 68). Concepción. Recuperado a partir de [http://repositoriodigital.corfo.cl/bitstream/handle/11373/4273/777.049\\_IF.pdf?sequence=5](http://repositoriodigital.corfo.cl/bitstream/handle/11373/4273/777.049_IF.pdf?sequence=5)
- INTA-AACS-ArgenInta. (2008). Suelos y ambientes de Entre Ríos. Recuperado a partir de [https://www.entrerios.gov.ar/ambiente/userfiles/images/otras\\_imagenes/mapa\\_Suelos%20y%20ambientes.JPG](https://www.entrerios.gov.ar/ambiente/userfiles/images/otras_imagenes/mapa_Suelos%20y%20ambientes.JPG)
- Iturre, M. y Araujo, P. (2006). Crecimiento y producción del rodal regular. Serie didáctica N° 23. Catedra de Ordenación Foresta. FCF- UNSE. ISBN 978-987-1676-35-4. la capacidad productiva del sitio. XXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos.
- IUFRO. (2001). *Forest research management in an era of globalization: The role of IUFRO*. International Union of Forest Research Organizations.
- Jerez, M., Moret, Y., Quevedo, A., y Quintero, M. (2011). Simulación del crecimiento de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.), mediante el enfoque de espacio de estados. En M. Jerez. (Ed.), *III Congreso forestal latinoamericano* (pp 1-17). Costa Rica: [s.n]
- Kolln, R. (2000). Criterios de Poda y Raleo en *Eucalyptus grandis* en Shell C.A.P.S.A. En R. Kolln. (Ed.), *XV Jornadas Forestales de Entre Ríos* (pp 1-8). Concordia, Argentina:

INTA.

Disponible

en:

<http://64.76.123.202/new/00/forestacion/archivos/biblioteca/103%20Kolln%20Poda%20y%20Raleo%20Shell.pdf>

Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2004). Applied linear statistical models (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Langsaeter, A. (1941). "Studies on the effect of thinning in Norwegian forests". Journal of Forestry.

Larocca, F., F. Dalla Tea, J. Aparicio. (2004). Técnicas de implantación y manejo de *Eucalyptus grandis* para pequeños y medianos forestadores en Entre Ríos y Corrientes. Actas XIX Jornadas de Entre Ríos. Octubre 2004. Cap VII. 16. p. Disponible en: <http://64.76.123.202/new/0-0/forestacion/archivos/biblioteca/228%20Larocc.pdf>

Laroque, C. (2004). Raleo y calidad de la madera: Evaluación y estrategias de manejo. Editorial Universitaria.

Legendre, P. (1993). Spatial autocorrelation: Trouble or new paradigm? Ecology, 74(6), 1659-1673.

Ligier, D., y Kurtz, D. (2014). Zonas forestales en la provincia de Corrientes. En Guía de buenas prácticas forestales para la provincia de Corrientes (1st ed., pp. 8-11). Bella Vista. Corrientes: José Eduardo Saiz. Carlos Vera Bravo. Claudia Verónica Luna. Recuperado a partir de: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta\\_agua\\_de\\_buenas\\_prcticas\\_forestales\\_para\\_la\\_provin.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_agua_de_buenas_prcticas_forestales_para_la_provin.pdf)

Littell, R. C., Milliken, G. A., Stroup, W. W., & Wolfinger, R. D. (2006). SAS for mixed models (2nd ed.). SAS Institute Inc.

Loera- Martínez, J. y Sepulveda- Jiménez. D. (2015). Parámetros de la productividad forestal en la producción de madera de rollo. [https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias-ECOHT\\_I/Handbook\\_Ciencias\\_Sociales\\_Economia\\_y\\_Humanidades\\_T1\\_V1\\_187\\_1\\_96.pdf](https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias-ECOHT_I/Handbook_Ciencias_Sociales_Economia_y_Humanidades_T1_V1_187_1_96.pdf)

Martiarena, R., Crechi, E., Pinazo, M., Von Wallis, A., & J. y Monteoliva S., M. (2014). Efecto del raleo sobre el crecimiento y la densidad de la madera de *Pinus taeda* implantado en Misiones, Argentina. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 24, n. 3, jul.-set., 2014. ISSN 0103-9954, 655–663.

- Masapanta, E. (2015). Efecto del raleo, sobre el crecimiento de balsa (*Ochroma pyramidale Cav. Ex Lam.*), plantada en cinco densidades poblacionales. Carrera de Ingeniería Agropecuaria. Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE. Sede Santo Domingo.
- Masapanta, P. (2015). Influence of thinning on tree growth and spatial distribution in temperate forests. *Forestry Studies*, 21(1), 45-57.
- Mastrandrea, C. y Baccon, M. (2011). Determinación del rendimiento comercial para tres clases diamétricas de rollos. Concordia – Entre Ríos: INTA- EEA Concordia (no publicado).
- Mastrandrea, C., Flores Palenzona, M. y García, M. (2016). Rentabilidad de una plantación de *Eucalyptus grandis* bajo diferentes esquemas de intensidad y oportunidad de raleo a los 10, 12 y 16 años de edad, en el noreste de Entre Ríos. Póster presentado a las XXX Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, Entre Ríos.
- Mastrandrea, C., Flores, M. y García, M. de los Á. (2014). Rentabilidad de diferentes manejos de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) en Entre Ríos (Argentina) según esquemas de comercialización de trozas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 11(27), 47. doi:10.18845/rfmk.v11i27.1777
- McCulloch, C. E., & Searle, S. R. (2001). *Generalized, linear, and mixed models*. Wiley-Interscience.
- Methol, R. (2002). Evaluación de distintos esquemas de raleo para *Eucalyptus grandis* In: Jornada Forestal: Visita a ensayos de silvicultura y mejoramiento de pinos y eucaliptos. Vivero "La Buena Unión" (Colonvade), 28 de noviembre de 2002. Programa Nacional Forestal de INIA. Noviembre 2002. Serie Actividades de Difusión N° 303. INIA. Disponible en: <http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/tb/ad/2002/ad303.pdf>
- Meza Montoya, A., y Torres Córdoba, G. (2006). El raleo: una operación silvicultural fundamental. *Kurú, revista forestal*, 3 (8), 1-3.
- Mills, T. C., & Zervou, E. (2019). *Applied econometric time series* (4th ed.). Wiley.
- Ministerio de Agroindustria. Presidencia de la Nación. Calendario de Plantación. (2020). Recuperado a partir de [https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/ss\\_desarrollo\\_foresto\\_industrial/promocion/silvicultura/archivos/000000\\_Calendario%20de%20plantaci%C3%B3n/000000\\_Calendario%20de%20plantaci%C3%B3n.pdf](https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/ss_desarrollo_foresto_industrial/promocion/silvicultura/archivos/000000_Calendario%20de%20plantaci%C3%B3n/000000_Calendario%20de%20plantaci%C3%B3n.pdf)

- Ministerio de Agroindustria, Subsecretaría de Desarrollo Foresto Industrial. (2016). Área SIG e inventario forestal.
- Monserud, R.A., & Sterba, H. (1996). A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management*, 80, 57–80.
- Mora, A., Gardi, A., & Quilodrán, S. (2006). Growth and yield modeling for *Eucalyptus globulus*: A case study. *Bosque*, 27(3), 231-242.
- Mora, A. y Ramírez, G. (2000). Consideraciones Prácticas sobre el análisis estadístico espacial de experimentos forestales de campos. *Revista Forestal Venezolana* 44 (2): 21-28.
- Moral, F. J.; Terrón, J. M. y Marques Da Silva, J. R. (2010). Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*, 106 (2), 335-343. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.120002>.
- Morales, V; Mora, A.; Garay, V. y Varela, L. (2016). Análisis espacial de varianza como alternativa de evaluación de ensayos de progenies forestales. *Agronomía costarricense*, 40 (2). <https://doi.org/10.15557/rac.v40i2.27388>.
- Morales, J., Rodríguez, A., & Silva, T. (2018). Limitaciones y aplicaciones de modelos de crecimiento forestal en distintas condiciones ambientales. *Journal of Forest Research*, 19(3), 204-215. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0678-1>
- Muñoz, F., Espinosa, M., Herrera, M. A. y Cancino, J. (2005). Características del crecimiento en diámetro, altura y volumen de una plantación de *Eucalyptus nitens* sometida a tratamientos silvícolas de poda y raleo. *Bosque (Valdivia)*, 26(1). doi:10.4067/S0717-92002005000100009
- Murillo-Brito, Y., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., del C. Lagunes-Espinoza, L., y Aldrete, A. (2017). Índice de sitio en plantaciones de *Cedrela odorata* en el trópico húmedo de México. *Rev. FCA UNCUYO*. 2017. 49 (1), 15–30.
- Osborne, J. W., & Overbay, A. (2004). The power of outliers (and why researchers should always check for them). *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 9(6), 1-12.
- Paccioretti, P.; Córdoba, M. y Balzarini, M. (2020). Desarrollo de un software para mapeo de variabilidad espacial en agricultura y ambiente. *AgriScientia*, 37 (1), 75-84. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v37.n1.27863>.

- Peng, C. (2000). Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. *Forest Ecology and Management*, 132(2-3), 259-279.
- Pezzutti, R. (2014). Silvicultura sitio específica, una herramienta para ajustar el manejo de Sitio para *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia Argentina". Jornadas Forestales de Entre Ríos 2014.
- Pienaar, L. V., & Turnbull, K. J. (1973). The Chapman-Richards generalization of von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. *Forest Science*, 19(1), 2-22.
- Piepho, H. P., Möhring, J., Melchinger, A. E., & Büchse, A. (2008). BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *\*Euphytica\**, 161, 209-228. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9449-8>
- Pinheiro, J. C., & Bates, D. M. (2000). *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. Springer.
- Pretzsch, H. (2009). *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Springer-Verlag.
- Pretzsch, H. (2010). *Forest dynamics, growth and yield: From measurement to model*. Springer Science & Business Media.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P. (1997). Sitio y productividad. En *Manejo Forestal* (pp 455). Costa Rica: San José.
- Pukkala, T. (2019). *Ecological and economic optimization in forest management*. Cambridge University Press.
- R Core Team. (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Reque, J. A., y Pérez, R. A. (2011). *Del monte al rodal*. Valladolid: Universidad de Valladolid, Innovación Educativa. 94.
- Resende, M. D. V., Silva, F. F. E., & Azevedo, C. F. (2014). *Estatística multivariada aplicada às ciências agrárias*. Editora UFV.
- Robinson, G. K. (1991). That BLUP is a good thing: The estimation of random effects. *Statistical Science*, 6(1), 15-32.
- Robinson, A. P., & Wykoff, W. R. (2004). Imputing Missing Height Measurements to Calculate Site Index. *Forest Science*, 50(5), 682-689.

- Rodriguez Ortiz, G. (2010). Efecto de aclareo en el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schl. et Cham. en Ixtlán, Oaxaca. Colegio de postgraduados. Campus Montecillo.
- Rozas, V. y Camarero, J. (2005). Técnicas de análisis espacial de patrones de puntos aplicados en ecología forestal. *Investigación Agraria: Sistemas & Recursos Forestales* 14: 79-97.
- Salgado, J. (2011). ¿Cómo generar modelos de índice de sitio? *Recursos Naturales y Ambiente/no. 64*, 28–31.
- Salvador Figueras, M y Gargallo, P. (2003): "Análisis Exploratorio de Datos", [en línea] *5campus.com, Estadística* <<http://www.5campus.com/leccion/aed>> [fecha de consulta: 6 de Julio 2017]
- Sandoval, V., & Di Bella, C. (2009). Variabilidad espacial y temporal de la biomasa aérea en forestaciones de *Eucalyptus globulus* en Uruguay. *Bosque*, 30(1), 32-39.
- Sanchez, J. (2023). *Métodos estadísticos aplicados a la investigación científica*. Editorial Académica Española, Madrid, España.
- Singer, J. D., & Willett, J. B. (2003). *Applied longitudinal data analysis: Modeling change and event occurrence*. Oxford University Press.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6(2), 461-464.
- Silva, L. F., Carvalho, J., & Ferreira, M. (2011). Importance of data structuring in forest growth modeling. *Forest Science*, 57(2), 112-125. <https://doi.org/10.1093/forestscience/57.2.112>
- Smith, D. M., Larson, B. C., Kelty, M. J., & Ashton, M. S. (2006). *The Practice of Silviculture: Applied Forest Ecology* (9th ed.). Wiley.
- Sotolengo Sospedra, R., Geada López, G., & Cobas López, M. (2000). *Mejoramiento genético forestal: texto para estudiantes de ingeniería forestal*. manuscrito. FAO.
- Sotomayor Garretón, A., García R, E. y Helmke W, E. (2002). Manejo y mantención de plantaciones forestales. Santiago, Chile: Instituto Forestal. 22-26.
- Stokes, A., & Song, S. (2013). Site variability and its impact on timber quality. *Forest Science*, 59(2), 112-124.
- Stroup, W. W. (2015). Rethinking the Analysis of Non-Normal Data in Plant and Soil Science. *Agronomy Journal*, 107(2), 811. doi: 10.2134/agronj2013.0342

- Taylor, S. E.; Macdonald, T. P.; Fulton, J. P.; Shawn, F. W. and Brodbeck, C. J. (2006). Precision forestry in the Southeast U. S. In: Precision Forestry in plantations, seminatural and natural forest. 2006. Editado por: Ackeman, P. A. *et al.* Stellenbosch P. 397- 414.
- Thomson, J. (1986). Trend Surface Analysis of Spatial Patterns of tree size, Microsite Effects, and Competitive Stress. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 279-282.
- Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal (2001). Modelización del crecimiento y la evolución de bosques. Viena: IUFRO.
- Vanclay, J.K. (1994). Modelling forest and yield, applications to mixed tropical forests. CAB International. Dinamarca. 312 p.
- Verbeke, G., & Molenberghs, G. (2000). Linear mixed models for longitudinal data. Springer.
- Warren, W. G., & Halls, L. W. (1997). Silvicultural practices and their effect on timber quality. *Forest Management Review*, 5(3), 156-169.
- Weisberg, S. (2005). Applied linear regression (3rd ed.). Wiley.
- West, B., Welch, K., Galecki, A. (2014). Linear mixed models: A practical guide using statistical software. (2a. ed). Ann Arbor, USA Michigan: Taylor & Francis group.
- White, T. L., Adams, W. T., & Neale, D. B. (2020). Forest genetics. CABI.
- Wooldridge, J. M. (2019). Introductory econometrics: A modern approach (7th ed.). Cengage Learning.
- Zeide, B. (2001). Thinning and Growth: A Full Turnaround. *Journal of Forestry*, 99(1), 20-25.
- Zhang L, Bi H, Cheng P, Davis CJ. (2004). Modeling spatial variation in tree diameter height relationships. *Forest Ecology and Management*, 189: 317-329.
- Zhang, L., Cao, Q.V., & Tomppo, E. (2014). Comparison of best linear unbiased prediction and k-nearest neighbor imputation for mapping forest attributes with Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140: 213-227.