

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica mill*

Plantación de alta densidad en turnos de corta rotación de *Cupressus lusitanica mill*, para la producción de biomasa bajo un arreglo Nelder modificado.

Juan Carlos Arciniegas Estupiñan, Eddy Alejandra Herrera Arévalo

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Forestal

Director

Jorge Andrés Rodríguez Toro,

Ph.D en Cs. Forestales

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa de Ingeniería Forestal

Málaga

2019

Agradecimientos

Expresamos nuestra gratitud inicialmente a Dios y a la Virgen por brindarnos su guía en cada una de las etapas de nuestra formación como ingenieros forestales, su protección en las actividades en campo y su presencia en cada momento de nuestras vidas.

A la Universidad Industrial de Santander-Sede Málaga por acogernos y darnos la oportunidad de recibir una formación de calidad que nos permitió un crecimiento académico y personal que nos acompañará en cada paso de nuestra vida profesional. A su equipo de directivos, administrativos y demás personal por la cordialidad en su atención.

Al doctor Jorge Andrés Rodríguez Toro por su dirección y guía en todas las etapas de desarrollo de esta investigación, brindándonos sus conocimientos y solucionando nuestros interrogantes. Al ingeniero agrónomo Rubén Carvajal por su apoyo en los aspectos nutricionales requeridos en este estudio y a los ingenieros forestales Diego Suescún Carvajal y Sandra Milena Díaz López por su disposición y amabilidad en todas las correcciones y sugerencias durante el proceso de este trabajo.

Finalmente, a nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional en nuestro proceso de formación.

Tabla de Contenido

Introducción.....	15
1.Objetivos.....	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos	18
2.Descripción del problema	19
3.Justificación	20
4.Revisión de literatura	21
4.1 Grupo 1	21
4.2 Grupo 2	23
4.3 Grupo 3.....	24
5.Marco Referencial.....	25
5.1 Marco Histórico	25
5.2 Marco Teórico	26
5.3 Marco Conceptual	31
5.4 Marco Legal.....	32
6.Metodología	33
6.1 Área de estudio.....	33
6.1.1 Vías de acceso.....	34
6.1.2 Zona de vida	35
6.1.3 Suelos.....	35

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica* mill

6.2 Diseño y toma de datos.....	36
6.3 Elección de los individuos a muestrear	38
6.4 Análisis estadístico	38
6.5 Modelos de crecimiento.....	39
6.6 Medición de la biomasa aérea.....	39
6.7 Medición del carbono contenido por componente en cada individuo	40
6.8 Medición de Carbono Total	40
6.9 Medición de Competencia	40
7.Resultados.....	42
7.1 Modelos de crecimiento.....	43
7.2 Diámetro a la altura del cuello	51
7.3 Altura.....	54
7.4 Índice de Biomasa	57
7.5 Área de Copa.....	59
7.6 Carbono contenido en los componentes estructurales por densidad	62
7.7 Biomasa contenido en los componentes estructurales por densidad.....	63
7.8 Competencia	65
7.9 Carbono total de la plantación	67
8.Discusión	68
9.Conclusiones y Recomendaciones	69
Referencias Bibliográficas.....	71
Apéndices	76

Lista de Tablas

Tabla 1 Densidades de siembra.	38
Tabla 2 Árboles más representativos por densidad.....	43
Tabla 3 Modelos de regresión no lineal evaluados en esta investigación.	45
Tabla 4 Coeficientes de regresión estimadas en los modelos no lineales.	49
Tabla 5 Agrupación de la variable diámetro a la altura del cuello por densidad según el método de Tukey.	52
Tabla 6 Parámetros estadísticos para la variable dac.	54
Tabla 7 Agrupación de la variable altura por densidad según el método de Tukey.	55
Tabla 8 Parámetros estadísticos para la variable altura.....	56
Tabla 9 Parámetros estadísticos para la variable Índice de biomasa.	57
Tabla 10 Agrupación de la variable índice de biomasa por densidad según el método de Tuke .	58
Tabla 11 Agrupación en grupos de la variable área de copa.	59
Tabla 12 Parámetros estadísticos para la variable área de copa.	61
Tabla 13 Contenido de carbono por componente estructural.	62
Tabla 14 Contenido de biomasa por componente estructural.....	63
Tabla 15 Relación entre la variable diámetro a la altura del cuello del árbol control y el de sus posibles competidores.	65
Tabla 16 Relación entre la variable altura del árbol control y el de sus posibles competidores. .	66
Tabla 17 Promedio total de carbono por densidad.....	68

Lista de Figuras

Figura 1. Forma diferencial de la función de crecimiento. Adaptado de Kiviste et al. (2002).	27
Figura 2. Municipio de Málaga, Santander.	34
Figura 3. Ubicación de la Parcela en Finca propiedad de la UIS en el municipio de Málaga, Santander. Delimitación de la finca Maldonado & Castro (2017).	35
Figura 4. Esquema de la parcela triangular bajo un diseño Nelder modificado. D: densidad de siembra.	36
Figura 5. Diseño II. Equal-area contours = vertical /lines.equal-shape contours = horizontal lines. Adaptado de Nelder (1962) New kinds of systematic designs for spacing experiments. Biometrics. Recuperado de https://sci-hub.tw/10.2307/2527473	37
Figura 6. Diagrama del proceso de selección de los arboles competidores. AC: árbol control. ...	41
Figura 7. Dendrograma de las densidades 10000 y 2500 árboles/ha.	42
Figura 8. Función de crecimiento Hossfeld I modificado.	46
Figura 9. Función de crecimiento lineal logarítmica.	46
Figura 10. Función de crecimiento Moiseev I.	47
Figura 11. Función de crecimiento Moiseev II.....	47
Figura 12. Función de crecimiento Strand.	48
Figura 13. Función de crecimiento Terazaki.	48
Figura 14. Análisis exploratorio de las variables dac, Ht y AreaCopa.	51
Figura 15. Comportamiento del crecimiento de la variable dac.	52
Figura 16. Representación gráfica de los grupos de la variable diámetro a la altura del cuello. ..	53
Figura 17. Representación gráfica de los grupos de la variable altura.....	54

Figura 18. Comportamiento del crecimiento de la variable Ht.	56
Figura 19. Comportamiento del crecimiento de la variable IndBiomasa.	57
Figura 20. Representación gráfica de las clases de la variable índice de biomasa.	59
Figura 21. Comportamiento del crecimiento de la variable AreaCopa.	60
Figura 22. Representación gráfica de los grupos para la variable área de copa.	61
Figura 23. Carbono promedio contenida en cada componente estructural de los arboles muestra por densidad.	64
Figura 24. Biomasa promedio contenido en cada componente estructural de los arboles muestra por densidad.	64

Lista de Apéndices

Apéndice 1. Comparación de las densidades por el método Tukey para la variable diámetro.	76
Apéndice 2. Comparación de las densidades por el método Tukey para la variable altura.	76
Apéndice 3. Comparación de las densidades por el método Tukey para la variable índice de biomasa.....	77
Apéndice 4. Comparación de las densidades por el método Tukey para la variable área de copa	77
Apéndice 5. Plántulas en la fase de vivero.	78
Apéndice 6. Fertilización de las plántulas con Raizal.....	78
Apéndice 7. Diseño y distribución de las densidades de siembra.	78
Apéndice 8. Limpieza y fumigación de gramíneas.....	79
Apéndice 9. Siembra de las plántulas.	79
Apéndice 10. Medición de las variables dac y altura.....	80
Apéndice 11. Control y corte de gramíneas.	80
Apéndice 12. Corte de los arboles muestra.	81
Apéndice 13. Proceso de pesado en húmedo de las muestras.	81
Apéndice 14. Proceso de secado de las muestras.	82
Apéndice 15. Determinación del pesado en seco de las muestras.	82
Apéndice 16. Comandos de la prueba de Tukey en el programa estadístico Tinn-R.	82
Apéndice 17. Comandos del método de Ward en el programa estadístico Tinn-R.	84
Apéndice 18. Comandos de los modelos no lineales más representativos para esta plantación en el programa estadístico Tinn-R.....	85
Apéndice 19. Ficha de descripción de los modelos de regresión no lineal	89

Apéndice 20. Características del modelo Lineal logarítmico.....	90
Apéndice 21. Características del modelo Moiseev I.....	91
Apéndice 22. Características del modelo Moiseev II.....	92
Apéndice 23. Características de modelos Hossfeld I modificado.	93
Apéndice 24. Variaciones en los parámetros del modelo Hossfeld I modificado.	94
Apéndice 25. Características del modelo Strand.	95
Apéndice 26. Variaciones en los parámetros del modelo Strand.	96
Apéndice 27. Características del modelo Terazaki.	97
Apéndice 28. Variaciones en los parámetros del modelo Terazaki.	98
Apéndice 29. Análisis de resultados y recomendaciones de la muestra número 1 de suelo de la finca propiedad de la universidad Industrial de Santander –Sede Málaga	99
Apéndice 30. Análisis de resultados y recomendaciones de la muestra número 2 de suelo de la finca propiedad de la universidad Industrial de Santander –Sede Málaga.....	101

RESUMEN

TITULO: PLANTACIÓN DE ALTA DENSIDAD EN TURNOS DE CORTA ROTACIÓN DE *Cupressus lusitanica mill*, PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA BAJO UN ARREGLO NELDER MODIFICADO*

AUTOR: JUAN CARLOS ARCINIEGAS ESTIPUÑAN
EDDY ALEJANDRA HERRERA AREVALO**

PALABRAS CLAVES: MODELOS DE CRECIMIENTO, COMPETENCIA, PRUEBA DE TUKEY, CLÚSTER.

DESCRIPCIÓN:

Para determinar el efecto de la densidad de siembra en las primeras etapas de desarrollo de esta especie, se efectuó un ensayo de plantación bajo un diseño Nelder modificado sobre las variables diámetro a la altura del cuello (dac), altura (Ht), índice de biomasa (IndBiomasa) y área de copa (AreaCopa) con fines de producción de biomasa, instalado en la vereda pescaderito del municipio de Málaga, Santander, Colombia. El material vegetativo, que se obtuvo de un semillero certificado, se dispuso en seis densidades de siembra (10000, 8750, 7500, 6250, 5000 y 2500) y se tomaron datos de sus variables dasométricas luego de un mes de establecida la plantación, durante nueve meses, cada 15 días. A través del uso de varios modelos de crecimiento se determinó que el que mejor representaba el comportamiento de las variables dac y Ht fueron Moiseev II para las primeras cinco densidades y Hossfeld I modificado para la última. Todas las variables analizadas mostraron gran significancia en las densidades 8750 y 7500, siendo la primera de ellas la de mayor valor para el IndBiomasa, pero mostrando mayor concentración del total de carbono en la densidad 7500. Debido a que las densidades 2500, 6250 y 5000 no presentan diferencias significativas entre ellas, la implementación de esta especie en cualquiera de ellas, mostraría crecimiento y niveles de desarrollo similares. El cálculo del contenido de carbono y biomasa por componente señaló al follaje como la estructura con mayores acumulaciones seguida de las ramas, distribuidas en altos valores en las mismas densidades de siembra que las variables dasométricas. Finalmente se concluyó que por el estado temprano de los individuos de la plantación aún no se observan comportamientos de competencia entre ellos.

* Trabajo de grado

** Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. Programa de Ingeniería Forestal.
Director: Jorge Andrés Rodríguez Toro. Ph.D en Cs. Forestales.

ABSTRACT

TITLE: HIGH DENSITY PLANTING IN SHORT ROTATION *Cupressus lusitanica mill* FOR BIOMASS PRODUCTION UNDER A MODIFIED NELDER ARRANGEMENT*

AUTHOR: JUAN CARLOS ARCINIEGAS ESTUPIÑAN
EDDY ALEJANDRA HERRERA AREVALO**

KEYWORDS: GROWTH MODELS, COMPETITION, TUKEY TEST, CLUSTER.

DESCRIPTION:

To determine the effect of planting density in the early stages of development of this species, a planting test was carried out under a modified Nelder design on the variables diameter at neck height (dac), height (Ht), index of biomass (IndBiomasa) and cup area (AreaCopa) for the purpose of biomass production, installed in the Pescaderito village in the municipality of Málaga, Santander, Colombia. The vegetative material, which was obtained from a certified seedbed, was arranged in six planting densities (10000, 8750, 7500, 6250, 5000 and 2500) and data were taken from its dasometric variables after one month of planting, during nine months, every 15 days. Through the use of several growth models it was determined that the one that best represented the behavior of the dac and Ht variables were Moiseev II for the first five densities and Hossfeld I modified for the last. All the variables analyzed showed great significance at densities 8750 and 7500, the first one being the one with the highest value for IndBiomasa, but showing a greater concentration of total carbon at density 7500. Because the densities 2500, 6250 and 5000 do not show significant differences between them, the implementation of this species in any of them would show similar growth and development levels. The calculation of the carbon and biomass content per component indicated the foliage as the structure with the highest accumulations followed by the branches, distributed in high values at the same planting densities as the dasometric variables. Finally, it was concluded that due to the early status of the individuals in the plantation, no competitive behavior is observed among them.

* Bachelor Thesis

** Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. Programa de Ingeniería Forestal.
Director: Jorge Andrés Rodríguez Toro. Ph.D en Cs. Forestales.

Introducción

El *Cupressus lusitanica Mill* (ciprés) es una especie forestal distribuida en forma natural en las zonas altas de la región centroamericana abarcando países como México, Guatemala, Honduras y El Salvador (Chinchilla, Chaves, & Mora, 2011). Consecuencia de la facilidad para producir sus plántulas, rápido crecimiento inicial, buena calidad de su madera y alta capacidad de adaptación a diversas condiciones ambientales, es su frecuente cultivo, apreciado en los distintos usos en los que es empleado dentro de los que se mencionan cortinas rompe vientos, protección de ganado, producción de madera y como planta ornamental (Chaves & Fonseca, 1991). Aunque esta especie presenta una fácil adaptación a diversos factores se recomienda su cultivo en regiones con altitudes entre 1500 y 2500 m.s.n.m, con una precipitación media anual entre 1000 y 3000 mm, una temperatura promedio anual superior a los 12°C, en suelos neutros y con un drenaje adecuado (Chaves & Fonseca, 1991).

Si bien esta especie no presenta un gran número de limitaciones, es necesario encontrar una metodología de manejo que permita potencializar su crecimiento y desarrollo para condiciones propias de un sitio. En consideración Cunuhay, Coronel, & Cruzatty (2010) expresaron que el componente más eficaz para alcanzar la finalidad del manejo de una plantación forestal que consiste en aumentar la cantidad y calidad de madera comercial, es la densidad de siembra.

Coetzee (1991) señala que la densidad inicial de una plantación sin raleos y con turnos de corta rotación es una de las decisiones más importantes ya que afecta el volumen del rodal, el tamaño de las trozas y los turnos de corta, trayendo consigo implicaciones económicas y siendo por ende esencial su planificación para un exitoso manejo y aprovechamiento de la plantación. En general, la densidad de plantación sea baja o alta afecta el crecimiento individual de los árboles, de ahí que

mayores densidades manifiestan árboles con una disminución en diámetro pero generan un aumento en la biomasa total por hectárea (Ferrere et al., 2005).

La densidad de una plantación es definida en la silvicultura como el número de individuos por unidad de área, no obstante, en una plantación los árboles cambian sus dimensiones en la medida que pueden utilizar los recursos disponibles y en función de los árboles vecinos más próximos a ellos, generando procesos de competencia o facilitación dependiendo de si la interacción es negativa o positiva; haciendo muy poco útil esta definición de densidad en el campo forestal. Por esto, se han implementado métodos para evaluar la densidad de un rodal, entre otros el área basal, el índice de espaciamiento relativo, el índice de densidad del rodal y el factor de competición de copas (Arias & Camacho, 2004).

El espacio disponible para cada árbol en un rodal independientemente de la edad o de la calidad de sitio es posible determinarlo a partir de los índices de densidad y de competencia, cuya diferencia radica en el nivel de detalle al que cada uno trabaja; mientras que el índice de densidad trabaja a nivel de rodal, el índice de competencia lo hace a nivel de cada individuo, lo cual facilita comparar las densidades de varios rodales sin ninguna complicación (Bravo, González, & Del Río, 1997). Curtis (1970) y Long (1985) indican que los índices que combinan variables del tamaño del árbol (diámetro, altura, biomasa o volumen) con el número de individuos en pie en el rodal, son más efectivos para este fin.

Para analizar el efecto de los espaciamientos en cultivos agrícolas, Nelder (1962) propuso cinco diseños de espaciamientos sistemáticos, cuatro basados en radios y arcos en círculos concéntricos y uno en una rejilla logarítmica rectangular. Estos diseños son un arreglo espacial de puntos donde cada uno de estos representa la posición de una planta, el área por planta y/o la forma del espacio de crecimiento disponible; obteniendo con su implementación beneficios como el ahorro de área

utilizada y la determinación del óptimo espaciamiento a través de la comparación simultánea de varios de ellos en un mismo diseño (Torres & Vásquez, 1985).

Los diseños sistemáticos de Nelder (1962), se empezaron a implementar en el campo forestal desde 1975 permitiendo recolectar datos sobre los efectos del espaciamiento en el crecimiento y rendimiento de las especies frente a diferentes aspectos como el genotipo, la rectangularidad, el raleo, el uso de fertilizantes, entre otros (Torres & Vásquez, 1985).

Dentro de los efectos evaluados mediante la aplicación de estos arreglos espaciales cabe destacar la producción de biomasa en cultivos forestales dirigida generalmente a propósitos comerciales energéticos a través de distintos métodos de transformación, siendo una alternativa con consecuencias positivas para el sector rural y con mayor significancia hacia el entorno ambiental (Sixto, Hernández, Barrio, Carrasco, & Cañellas, 2007).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar el efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento y desarrollo de la especie *Cupressus lusitanica Mill* para la producción de biomasa en altas densidades de plantación en turnos de corta rotación, en una parcela bajo un diseño Nelder modificado, en el municipio de Málaga-Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Evaluar modelos de crecimiento bajo diferentes densidades de siembra.

Determinar los niveles de competencia y/o facilitación bajo diferentes densidades de siembra haciendo uso de los índices de competencia.

Determinar la biomasa contenida en cada uno de los componentes estructurales de los individuos de la especie *Cupressus lusitanica Mill* de la parcela experimental.

2. Descripción del problema

El municipio de Málaga – Santander posee de acuerdo a su esquema de ordenamiento territorial (EOT, 2015) una economía fundamentada principalmente en el sector primario en la producción agrícola y pecuaria. La primera de ellas destina la mayor parte de su productividad para el consumo familiar por lo que no se cuenta con un análisis y control de su distribución y comercialización. La mayor área sembrada es para pastos con 7000 ha seguida del tabaco, maíz y frijol con 60, 43 y 42 ha, respectivamente. El sector pecuario se lleva a cabo para la producción de leche y carne de ganado bovino (6450 individuos) pero es la producción avícola la que mayores individuos presenta en el municipio con 1350 especímenes.

Estas actividades imposibilitan el desarrollo forestal debido a la poca viabilidad económica que representa para el productor implementar estos sistemas de larga rotación, además, el escaso y mal estado de las vías que conectan los predios con el municipio y este mismo con las principales ciudades genera grandes costos de extracción de este material y por consiguiente bajas posibilidades de acceder a un buen mercado. La poca extracción de madera, en ocasiones sin ningún permiso de la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS), es principalmente empleada para el consumo de leña, utilizándose a su vez para construcción de viviendas y cercas; la cual no representa ningún aporte importante en la economía del municipio (EOT, 2015) lo que ocasiona un escaso desarrollo de la agroindustria forestal y altos precios en la adquisición de esta materia prima para procesos de ebanistería, entre otros usos.

3. Justificación

Cunuhay et al. (2010) señalan que la elección de la densidad de plantación es de máxima importancia desde un punto de vista económico ya que depende del costo y el objetivo de la plantación. Así pues, desarrollar un estudio para determinar el espaciamiento adecuado para la especie *Cupressus lusitanica Mill* en altas densidades en turnos de corta rotación en el municipio de Málaga-Santander, es de gran relevancia ya que permitiría obtener árboles con un desarrollo óptimo, y de este modo, se maximizarían los beneficios que se puedan aprovechar de esta especie en la región.

La proposición de un ensayo de alta densidad está fundamentada en ser una alternativa para el pequeño productor ya que le ofrece un ahorro en espacio para la ejecución de otras actividades económicas y un aprovechamiento en un periodo de tiempo no muy largo. Debido a esto y con el conocimiento de que cada sitio es diferente en características físico-químicas y medio ambientales; se vio la necesidad de investigar el espaciamiento adecuado para la implementación del ciprés bajo las condiciones propias del municipio, buscando garantizar el desarrollo óptimo de esta especie y por consiguiente un mejor aprovechamiento y crecimiento económico de la población, considerando la inexistencia de estudios y literatura referente a diseños de siembra para la especie en mención, en la región.

De este modo, se espera contribuir en el hallazgo de nuevos conocimientos e investigaciones de esta especie y a su vez, fomentar el desarrollo forestal que en el municipio y en la región es tan escaso.

4. Revisión de literatura

Se revisaron artículos científicos de varias plataformas agrupados en tres grupos, el primero referido al diseño Nelder y sus diseños modificados, el segundo sobre estudios de densidades de siembra y su relación con el crecimiento de especies forestales y/o determinación de biomasa y el tercero concerniente al desarrollo y crecimiento de la especie *Cupressus lusitánica Mill.*

4.1 Grupo 1

Se evaluó el efecto que presenta la densidad de siembra de una plantación sobre las variables: diámetro, altura total, área basal, espesor relativo de corteza y densidad de la madera en la especie *Eucalyptus globulus*, mediante un ensayo de plantación bajo un diseño Nelder modificado durante 10 años y a nueve densidades iniciales, analizando que a una densidad de 761 plantas/ha se vio favorecido el crecimiento en diámetro pero afectó la altura, mientras que densidades intermedias facilitaron el área basal. Finalmente, concluyeron de que la mejor densidad para un excelente crecimiento individual y grupal es de 1095 plantas/ha (Ferrere et al., 2005).

Con el objetivo de determinar el efecto de la distancia de plantación inicial sobre el crecimiento de la especie *Eucaliptus grandis* y sus variaciones de acuerdo al sitio establecido, se utilizaron 3 ensayos de parcelas sinclinales lineales con diseño Nelder modificado, densidades entre 1000 a 1111 en pie/ha y destinados para varios usos como: aserradero, celulosa y postes, tomando datos de las variables: dap y alturas totales. Determinó que a mayor densidad inicial se presentó un aumento en el área basimétrica y disminución en el dap, alturas totales y supervivencia y por ello, recomendaron entre otros argumentos, que entre más grande sea el diámetro a alcanzar menor

deberá ser la densidad inicial, aumentar el turno de rotación y aplicar raleos intermedios para sitios con menor desarrollo de esta especie (Dalla Tea, 1995).

Torres & Vásquez (1985) presentan una interpretación de una recopilación bibliográfica sobre todo lo relacionado con el diseño sistemático Nelder, aspectos de instalación en campo, usos en la silvicultura, ventajas y desventajas del mismo, afirmando que los diseños Ia e Ib con características inversas (el primero mantiene fija su estructura pero su área es directamente proporcional a las distancias de siembra o radios, mientras que el segundo presenta un área fija y su forma varía de acuerdo a las distancias o radios de siembra) muestran mayor aceptación en el ámbito forestal ya que permite el análisis de variables en una misma área y la determinación de un adecuado espaciamiento debido al amplio número de opciones de distancias que permiten estos diseños, concluyendo que es una metodología bastante útil para obtener información sobre el efecto de las distancias de siembra sobre aspectos como la rectangularidad, el crecimiento, desarrollo y productividad de especies forestales, en el genotipo de los individuos, la forma del fuste, los raleos y en su actividad fotosintética.

Nelder (1962) plantea cinco diseños sistemáticos para el análisis del espaciamiento, cuatro basados en coordenadas polares de círculos concéntricos y uno rectangular bajo dos principios: el primero que muestren una relación entre rendimiento, densidad y rectangularidad y segundo que consideren las variables por cada bloque individualmente como una muestra aleatoria; con el fin de evitar valores similares en el error de la parcela principal y los cuadrados medios del error de un bloque en experimentos aleatorios con parcelas divididas y a su vez eludir el valor constante del error estándar por individuo para cada sub parcela, concluyendo que estos resultados se deben gracias a las variaciones del árbol y no del sitio. Además, por ser diseños de bloques aleatorios sin aleatorización, evalúa que la probabilidad de que los resultados manifiesten una variación

periódica es nula siempre y cuando se realice un diseño experimental adecuado que evite este tipo de periodicidad.

Parrott, Brinks, & Lhotka (2012) formula una metodología sencilla para determinar los parámetros requeridos en el establecimiento de las parcelas circulares Nelder utilizadas para determinar una óptima densidad en plantaciones forestales, mediante el diseño Ia que mantiene la forma entre la distancia de siembra de los individuos, debido a la facilidad de su establecimiento y concluye que expresar las ecuaciones planteadas por Nelder en términos de la densidad en lugar del área mejora el establecimiento en campo y la interpretación de sus resultados.

4.2 Grupo 2

Schlegel, Gayoso, & Guerra (2000) presentan una metodología destructiva para determinar la biomasa contenida en bosques y plantaciones con un bajo grado de error, mostrando con detalle aspectos como: la elección de los rodales, el establecimiento de las parcelas de árboles muestra y la medición de las variables de biomasa aérea y subterránea, hallando con ello los montos de carbono contenidos en esos ecosistemas resaltando la gran ventaja de esta metodología la cual es la facilidad de generar funciones para estimar biomasa más generales y complementarias entre ellas que facilitan el análisis e interpretación de los resultados.

Para medir el efecto de las densidades de siembra en el desarrollo de las especies *Tectona grandis* L.F., *Cordia megalantha* S.F. Blake, *Cybistax donnell smithii* Rose y *Triplaris cumingiana* Fisch. & Mey, establecidas en parcelas permanentes bajo un diseño de bloques al azar de parcelas divididas, se evaluaron las variables altura y diámetro en densidades de 9x9 m y 6x6 m. encontró de esta manera que los árboles de la primera densidad alcanzaron mayor volumen promedio y mayor IMA por individuo, pero el mayor volumen/ha y mayor IMA por hectáreas se presentó en

las cuatro especies de la segunda densidad; sin embargo, la especie *Tectona grandis L.F* presentó el mayor crecimiento diamétrico y el mayor volumen promedio de las cuatro especies analizadas (Cunuhay et al., 2010).

4.3 Grupo 3

Tschinkel (1972) compiló una completa investigación acerca de los factores que limitan el crecimiento de la especie *Cupressus lusitanica Mill* en algunos sitios del oriente Antioqueño. Analizó datos de humedad, densidad aparente y porosidad de varios perfiles de suelos indicando que sus propiedades físicas eran favorables para el crecimiento de esta especie pero con limitantes en sus propiedades químicas como la baja rotación de mineralización del nitrógeno y la escasa disponibilidad de fosforo en todos los sitios estudiados dándole solución con un tratamiento de urea y superfosfato triple que condujeron a un crecimiento adicional en la especie anual de 8 m³/ha.

Para analizar y medir la respuesta del *Cupressus lusitánica Mill* a cuatro intensidades de aclareo se empleó un diseño de bloques completos al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones, con el objetivo de encontrar la densidad adecuada para esta especie con fines de madera para aserrío, en los sitios estudiados, considerando aclareos fuertes, moderados y leves. Los dos primeros aclareos favorecieron el diámetro, el área basal y el volumen comercial, concluyendo que las variables diámetro y área basal se vieron afectadas por la densidad mientras que la altura dominante no presento alteración y recomendando realizar aclareos fuertes luego de alcanzar una altura dominante de 10 a 12 m en plantaciones de coníferas para las densidades propuestas en Costa Rica (1100 árboles/ha) (Chinchilla et al., 2011).

5. Marco Referencial

5.1 Marco Histórico

A nivel global, la superficie de bosques ha presentado una notable disminución debido al crecimiento poblacional y con ello, la demanda de alimentos y tierras es cada vez mayor; sin embargo, la gestión forestal sostenible y actividades de manejo y control sobre los mismos han permitido que la pérdida neta de bosque disminuya en grandes proporciones, apoyado de las ideas conservacionistas hacia la extensa biodiversidad que estos ecosistemas poseen (MacDicken et al., 2016). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estimó que entre 1990 y 2015 la superficie forestal del planeta pasó de un 31,6 % a un 30,6%; presentándose en mayores proporciones en los países en desarrollo, de manera particular, en el África subsahariana, América latina y Asia sudoriental. A su vez, programas de forestación a gran escala y la conversión natural de tierras agrícolas, desarrollados en países como Asia, América del Norte y Europa han ayudado al aumento de su propia superficie forestal desde 1990.

Por otro lado, el área de las plantaciones o bosques plantados ha presentado un incremento de 105 millones de hectáreas, mostrando su nivel máximo entre los años 2000 y 2005 en 5,9 millones de ha para luego disminuir a 3,3 millones de ha entre los años 2010 y 2015. Así mismo, en función al aumento en la demanda de madera presentada desde finales del último siglo, surgió la necesidad de implementar nuevos avances investigativos para optimizar y potencializar la producción del recurso (MacDicken et al., 2016).

5.2 Marco Teórico

El *Cupressus lusitanica Mill*, es una especie conífera perteneciente a la familia CUPRESSACEAE; es un árbol monoico siempre verde, resinoso y aromático, puede alcanzar una altura de más de 30 m y hasta 100 cm de diámetro a la altura del pecho (dap). Presenta un fuste recto, su corteza es desprendible en bandas largas color café ligeramente fibrosa; se encuentra distribuida desde el sur de México, Guatemala, Honduras y el Salvador entre los 2200 y 3300 m.s.n.m. (Chaves & Fonseca, 1991).

La siembra de esta especie generalmente es realizada con fines de aprovechamiento de su madera de alta calidad, aunque también es sembrada sin ningún diseño de siembra o trabajos silviculturales para usos más domésticos. Sin embargo, pueden ser empleados como elementos de captura de carbono, una herramienta útil en los últimos años como instrumento contra los efectos del calentamiento global, ya que los ecosistemas forestales poseen cinco depósitos en los cuales se distribuye el carbono: biomasa viva por encima del suelo (biomasa aérea), biomasa viva por debajo del suelo (biomasa subterránea), madera muerta sobre el suelo, mantillo y carbono orgánico del suelo (COS) (Bolaños, Bolaños, Paz, & Ponce, 2017) y la capacidad que tienen estos ecosistemas para almacenarlo varía de acuerdo a su composición florística, edad y densidad de población (Schulze, Wirth, & Heimann, 2000). La biomasa obtenida a partir del proceso biológico de los árboles, es aprovechada principalmente con fines industriales; pues parte de esta es empleada como materia prima para ser transformada (madera, pulpa, resinas, etc.) y otra es dispuesta como alternativa energética.

La productividad de una masa forestal puede determinarse mediante el uso de funciones de crecimiento, que describen el comportamiento de las variables dendrométricas de un árbol a lo largo del tiempo y que permiten entre otras utilidades, valorar bosques en pie y establecer los

turnos de máximo aprovechamiento de las masas forestales (Kiviste, González, Alboreca, & González, 2002; Cancino, 2012). Dichos modelos se pueden representar mediante una curva llamada “sigmoide” en conjunto con su primera derivada o forma diferencial de la función de crecimiento de la sigmoide quien es la que muestra realmente el crecimiento de dicha variable en un determinado tiempo (*Figura 1*). Dicho crecimiento está ligado a dos factores, el primero de ellos es la predisposición de crecer ilimitadamente que depende de las características biológicas del individuo, es decir la capacidad de absorción de nutrientes y su actividad fotosintética, entre otros; y como segundo factor están las restricciones de crecimiento que genere sobre él el medio en el que se desarrolla, como procesos de competencia, recursos limitados, estrés, sus propios procesos de crecimiento y senectud, entre otros (Kiviste et al., 2002).

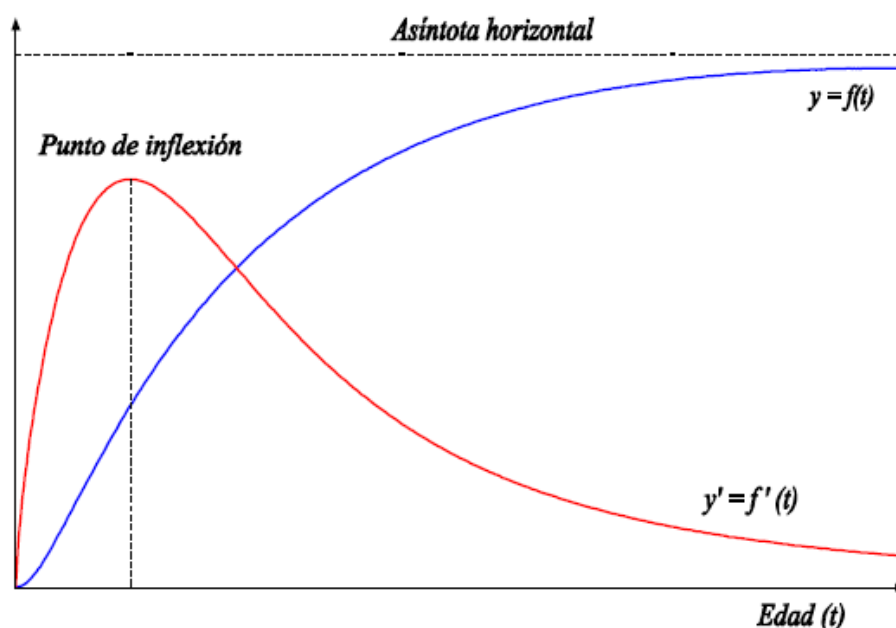


Figura 1. Forma diferencial de la función de crecimiento. Adaptado de Kiviste et al. (2002) Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal (No. 634.956 F8) Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/JG_Alvarez_Gonzalez/publication/305473874_Funciones_de_crecimiento_de_aplicacion_en_el_ambito_forestal/links/59ad673ba6fdcce55a414f8e/Funcion-es-de-crecimiento-de-aplicacion-en-el-ambito-forestal.pdf

Kiviste et al. (2002) describen que a edades tempranas la variable presentaría un crecimiento acelerado (primer factor) mostrando una curva cóncava hacia arriba hasta que se produce un punto de inflexión que determina la presencia de factores inhibidores de este crecimiento (segundo factor) produciendo un comportamiento inversamente proporcional entre las curvas, siguiendo este patrón hasta que ambos factores se nivelen estabilizando el crecimiento del individuo.

Kiviste et al. (2002) enuncian la implementación de gran cantidad de funciones de crecimiento en modelización forestal, dentro de las que se destacan ecuaciones como las de Hossfeld, Korf (Bailey-Clutter o Schumacher), Gompertz, Verhulst-Logística, Bertalanffy, Mitscherlich (Richards-Chapman) y Weibull, por su frecuente uso en este tipo de estudios.

El crecimiento expresado en el aumento de tamaño de alguna de las variables dendrometrías durante un lapso de tiempo determinado, es denominado incremento. En consideración al intervalo de tiempo, puede ser definido como incremento corriente anual (ica) cuando se habla de la diferencia entre el tamaño inicial y el tamaño final durante 12 meses. El cociente entre el tamaño acumulado a cierta edad y la edad del árbol, se distingue como incremento medio anual (ima). La variación entre el tamaño inicial y el tamaño final obtenido durante un periodo de crecimiento mayor a un año, se denomina incremento periódico (ip); y este valor, dividido entre el número de años del periodo indica el incremento periódico anual (ipa) (Imaña & Encinas, 2008).

El crecimiento está definido por las variables edáficas, climáticas, topográficas de un sitio, características genéticas del individuo y la influyente interacción con el medio (competencia) (Cancino, 2012). La competencia se refiere a la interacción entre individuos con espacio y recursos compartidos que se produce cuando la demanda supera la disponibilidad de estos, causando tanto situaciones de afectación (crecimiento, sobrevivencia) como de beneficio (adaptación al medio) en los implicados. Mayor será el efecto de la competencia si el número de individuos por unidad

de superficie también lo es; de esta manera se hace manifiesta la relación existente entre crecimiento, densidad y competencia (Cancino, 2012; Trepl, 1994).

La densidad es una de las variables dentro de las actividades silviculturales que mayor organización necesita en una plantación forestal debido a que ayuda a ejercer mayor control sobre la estructura, productividad y crecimiento de los individuos. Su planificación depende de los objetivos de plantación, la especie y la calidad de sitio, entre otros factores (Arias & Camacho, 2004). El desarrollo de los índices de densidad y competencia han contemplado determinar, comparar y analizar estos factores cuantificando la influencia que tienen los individuos que rodean a un árbol en específico en cuanto al espacio necesario para que este se desarrolle de manera óptima, permitiendo un manejo forestal más óptimo y preciso (Taboada, Anta, Varela, & González, 2003). Estos índices son modelos biométricos que determinan la relación tamaño-densidad desarrollado por Reineke (1933) para varias especies norteamericanas (Arias & Camacho, 2004). Tang, Meng, Meng, & Wang (1994) y Dean & Baldwin (1996) describen que estos modelos permiten maximizar el crecimiento de los individuos en un rodal y Lilieholm, Kessler, & Merrill (1993) narran que es posible plantear estrategias de conservación de la biodiversidad a partir de la planificación adecuada de este factor.

Los índices de competencia son clasificados según Munro (1974), en dos grupos, aquellos índices que no dependen de la distancia de siembra y aquellos dependientes de dicha distancia. El primer grupo asume que todos los individuos en un área específica compiten entre sí y evalúa la competencia con variables de masa, mientras que el segundo grupo requiere precisar un criterio que establezca los árboles que compiten con un árbol determinado y en qué grado se da esta competencia (Taboada et al., 2003).

El índice de densidad de rodal de Reineke (IDR) pertenece al primer grupo y relaciona en un plano logarítmico el número de árboles por unidad de superficie con su diámetro medio cuadrático (Corvalán & Hernández, 2006). Este índice expresa un valor numérico promedio de la densidad que un área puede soportar con relación al número de árboles y su tamaño por unidad de superficie, según Clutter, Fortson, Pienaar, Brister, & Bailey (1983) independientemente de la edad y de la calidad de sitio y para definirlo Reineke (1933) graficó su ecuación cuya pendiente es 1,605 considerada como coeficiente general para las especies forestales (Pérez, Domínguez, Martínez, & Etchevers, 2012).

El objetivo de realizar un análisis estadístico de las variables estudiadas en un experimento es adquirir nueva información sobre los efectos que tienen los tratamientos sobre estas variables y para observar si las medias aritméticas de los tratamientos presentan diferencias significativas entre ellas, se llevan a cabo los análisis de varianza o ANOVA (Villalpando, Morales, Guzmán, Sánchez, & Saavedra, 2001). Existen varios métodos de comparaciones múltiples entre las que se encuentran Tukey, Duncan y Dunnett. Díaz et al. (2007) recomiendan el uso del primer método por presentar rangos de confianza y su sencillez en su modelo. Estas comparaciones son de gran ayuda para determinar en qué medida los tratamientos afectan las variables cuando se obtienen un valor de significancia entre ellas y encontrar los puntos exactos donde se obtienen esta significancia permite al investigador una mejor toma de decisiones.

Otro análisis estadístico útil en investigación es el análisis multivariante, que consiste en una agrupación de métodos estadísticos y algebraicos que tiene como objetivo analizar e interpretar datos provenientes de varias variables estudiadas simultáneamente (Cuadras, 1981) y de la cual hace parte el método jerárquico de análisis Clúster el cual permite ordenar y clasificar los individuos de una población o muestra en grupos que contengan un grado fuerte de similitud entre

sus individuos y que a su vez este grado no presente semejanza entre clústers; permitiendo descubrir relaciones en los datos que no son percibidas a simple vista y que son de gran utilidad para la interpretación de los mismos (Villardón, 2007). Entre estos métodos se encuentra el método de Ward o método de varianza mínima, la cual determina la distancia entre dos clústers como la suma de los cuadrados en el ANOVA entre grupos para todas las variables, agrupando dos clústers con la mínima distancia entre ellos Villardón, (2007).

5.3 Marco Conceptual

Los conceptos enunciados a continuación son propios de su correspondiente autor.

dac: Es el diámetro del tallo principal de la plántula en la línea de tierra; debido a que el diámetro del tallo puede cambiar significativamente en esta área las mediciones deben realizarse en una medida estandarizada (1 cm por encima de la primera raíz lateral) (Mexal & Landis, 1990).

Altura Total: Distancia lineal a lo largo del eje principal del árbol desde el nivel del suelo hasta el punto más alto de la copa (Quiroz Marchant, García Rivas, González Ortega, Chung Guin-Po, & Soto Guevara, 2017).

Diámetro de Copa: Diámetro de la proyección sobre el plano horizontal de la copa de un árbol (Quiroz Marchant et al., 2017).

Competencia: En el campo forestal es el término que se le atribuye a la interacción espacial con otros árboles cercanos (Taboada et al., 2003). y según Trepl (1994) puede provocar situaciones que favorezcan a todos los individuos en pie, como la protección o adaptación mutua al medio o en su defecto traer procesos antagónicos.

Facilitación: Interacción a través de la cual se benefician procesos de crecimiento, estructura, diversidad y supervivencia en los individuos de una comunidad vegetal (Callaway, 1995).

Alelopatía: Interacciones de todos los organismos vegetales, microorganismos y plantas superiores entre sí, causadas por productos del metabolismo de las plantas (Börner, 1960) .

Biomasa: Peso o estimación equivalente de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo (Martí, 2006).

Turnos de corta rotación: Práctica silvícola caracterizada por plantaciones de alta densidad con especies de árboles de crecimiento rápido en sitios fértiles y un período de rotación de menos de 10 a 12 años (Weih, 2004).

AIC: Conocido como criterio de información de Akaike, brinda un método simple y objetivo para la selección del mejor modelo para la caracterización de datos experimentales (Martinez et al., 2009).

5.4 Marco Legal

En Colombia la entidad encargada de formular las políticas del sector forestal y sistemas agroforestales es el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el cual es el organismo rector en la producción agropecuaria, forestal y pesquera en el país, incluyendo el otorgamiento y reglamentación del Certificado de Incentivo forestal (CIF) para apoyos de programas de reforestación comercial. Por esto, el congreso de la Republica decretó la ley 1377 de 2010, en la cual define y reglamenta las plantaciones forestales y sistemas agroforestales con fines comerciales, así como su certificado de incentivo forestal.

Por otra parte, mediante la ley 164 de 1994 se aprobó la convención Marco de las naciones unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) el cual tiene como fin equilibrar los gases de efecto invernadero en la atmosfera minimizando los impactos negativos en el clima del planeta; que sirvió de base para que el 10 de octubre del 2017 se formulara el decreto 1655, con el cual se permitió

adicionar cinco nuevas secciones al Libro 2, Título 8, Capítulo 9 del decreto 1076 de 2015, estableciendo la organización y funcionamiento del sistema nacional de información forestal, el inventario forestal nacional y el sistema de monitoreo de bosques y carbono que hacen parte del sistema de información ambiental para Colombia.

6. Metodología

6.1 Área de estudio

El municipio de Málaga, capital de la provincia de García Rovira, se encuentra ubicado al sur oriente del departamento de Santander sobre la troncal central del norte (*Figura 2*). Geográficamente se sitúa en la cordillera oriental en el extremo meridional del macizo de Santander, en la parte sur del páramo del Almorzadero.

La parcela triangular con diseño Nelder se encuentra ubicada en la finca propiedad de la Universidad industrial de Santander - Sede Málaga, en la vereda Pescaderito del municipio de Málaga (*Figura 3*) a una distancia aproximada de seis km del casco urbano (Moreno, 2010) cuya extensión total es de 10,1 hectáreas distribuidas de la siguiente manera: los predios El Arrayan y Pie de Cortadera, Llano Largo, El Roble y Palo Santo presentan un área de 3,1487; 1,5739; 3,1294 y 2,2405 hectáreas, respectivamente (Maldonado & Castro, 2017).

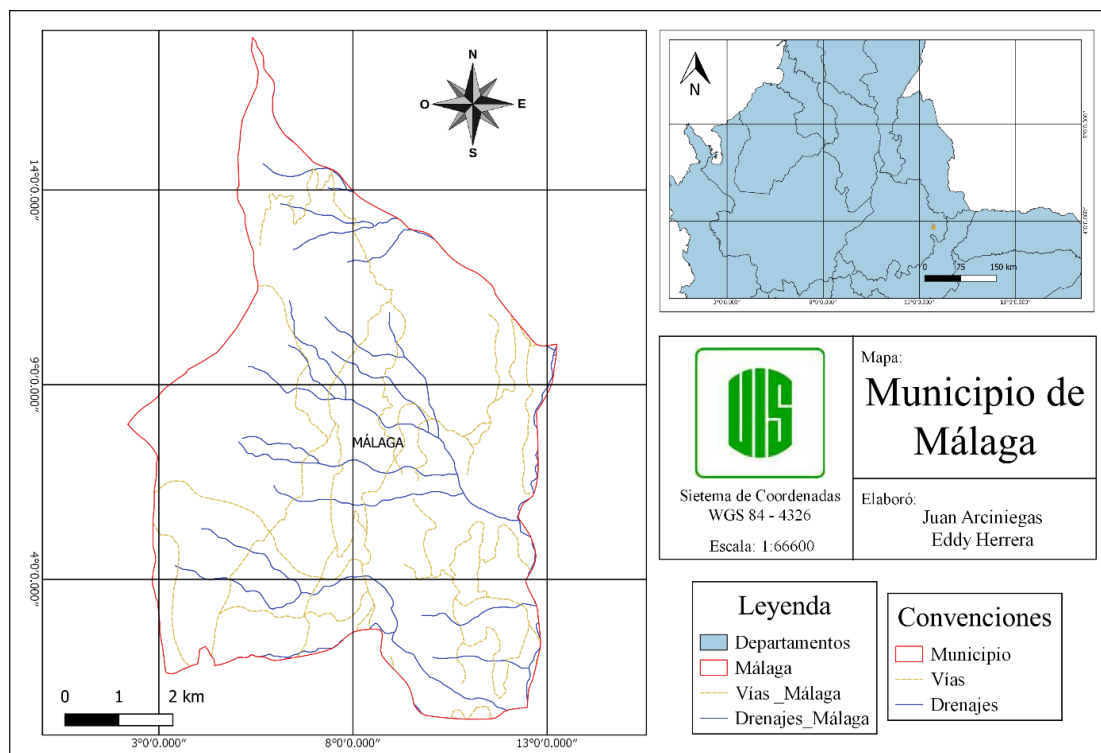


Figura 2. Municipio de Málaga, Santander.

6.1.1 Vías de acceso. Maldonado & Castro (2017) identificaron dos rutas posibles a la finca de la Universidad Industrial de Santander; la primera corresponde a una vía terciaria, la cual recorre diferentes predios, con una longitud de 1617 m desde la vía Curos-Málaga ubicada entre las cotas 2661 y 2835 m.s.n.m.; pero no llega directamente hasta los predios de la finca. La segunda vía es una unión entre una vía principal que conduce a la vereda Pantano Hondo, con una longitud de 1073 m y la otra, una vía propuesta para el acceso a la finca UIS, con una longitud de 570 m que pasa por los linderos de varios predios y se encuentran sobre las cotas 2627 y 2687 m.s.n.m.

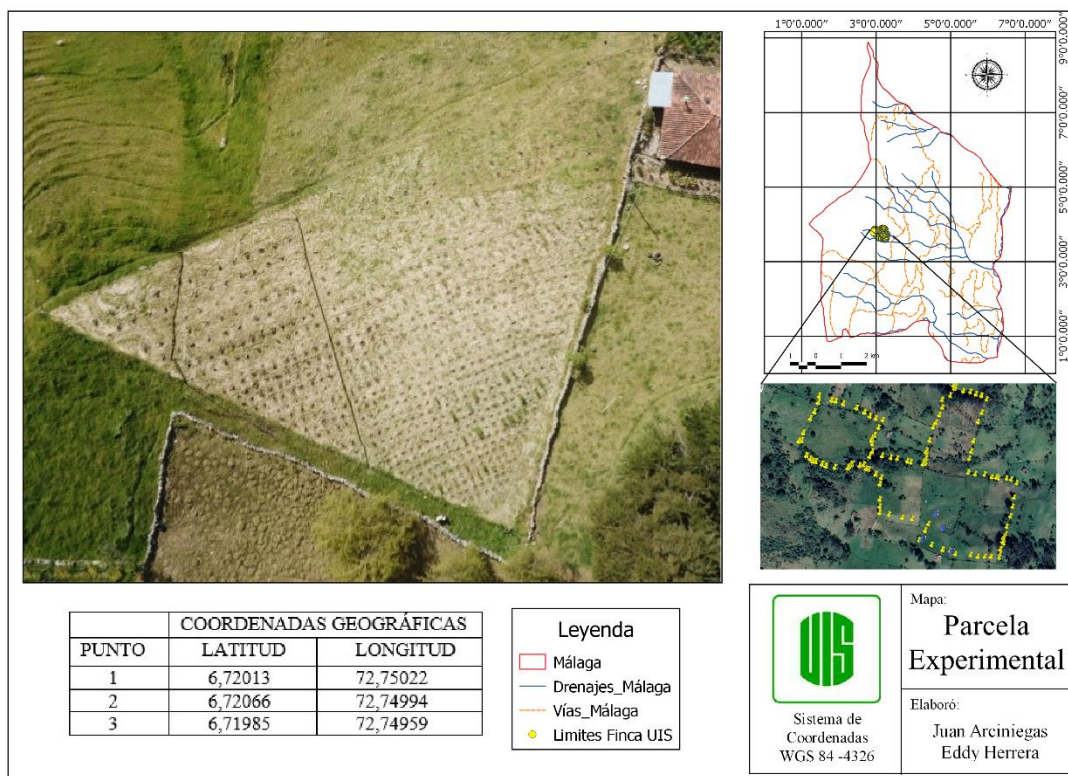


Figura 3. Ubicación de la Parcela en Finca propiedad de la UIS en el municipio de Málaga, Santander.

6.1.2 Zona de vida. El lugar donde se instaló la parcela experimental tipo Nelder presenta según la clasificación de Holdridge la zona de vida, bosque húmedo montano bajo (bh-MB), con una temperatura media anual entre los 12 y 24 °C, una precipitación total anual entre los 1000 y 2000 mm/año y altitudes que van desde los 1900 a los 2900 m.s.n.m; con una topografía de pendientes inclinadas de relieve quebrada (EOT, 2015).

6.1.3 Suelos. Un estudio de laboratorio realizado por el laboratorio químico de la Universidad Industrial de Santander, señala que los suelos presentes en este predio muestran un pH entre 5,1 y 6,1, es decir, que van desde fuertemente a ligeramente ácidos. Contiene un nivel medio de materia orgánica y nitrógeno (N) y bajos niveles de Magnesio (Mg). En cuanto a los elementos sodio (Na),

potasio (K) y fósforo (P) se encuentran en niveles adecuados; la relación calcio-magnesio esta desbalanceada y su textura está entre franco arcilloso a suelos arcillosos con contenidos de arcilla del 50% (Apéndice 29 y Apéndice 30).

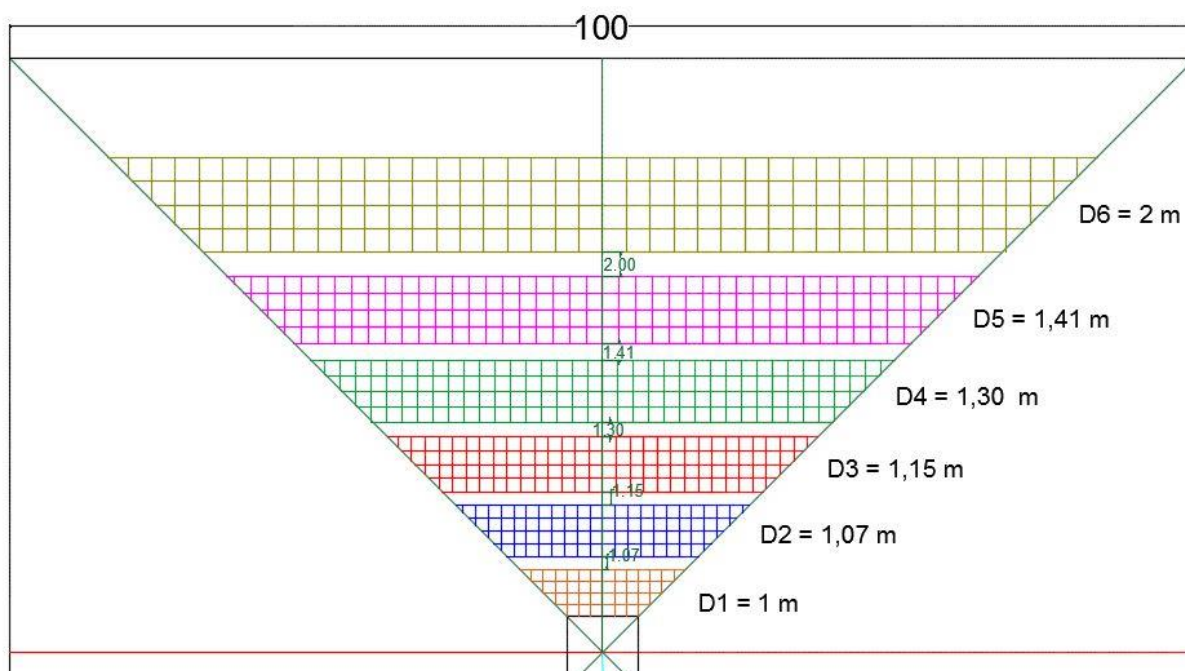


Figura 4. Esquema de la parcela triangular bajo un diseño Nelder modificado. D: densidad de siembra.

6.2 Diseño y toma de datos

El ensayo de investigación sigue la estructura del diseño II planteado por Nelder (1962), la cual consiste en una cuadrícula simple establecida a 45 grados hacia sus lados (Figura 5). Contiene una población de 794 plántulas de la especie *Cupressus lusitanica Mill* distribuidas en seis diferentes densidades de siembra en un área de 2500 m² (Tabla 1) implantada bajo condiciones de pendientes poco pronunciadas, una capa freática y un sistema climático variado. Cada densidad de siembra está compuesta por cinco líneas (Figura 4) de las cuales solo a los individuos de las terceras líneas

se les realizó la medición de las variables diámetro a la altura del cuello (dac), altura (Ht) y apertura de copas en dirección norte-sur (DC1) y este-oeste (DC2) cada 15 días durante nueve meses y a partir de ellas determinar las variables índice de biomasa (IndBiomasa) y área de copa (AreaCopa), a partir de las siguientes formulas:

$$IndBiomasa = dac^2 * Ht$$

$$AreaCopa = \frac{\pi}{4} * DC1 * DC2$$

Las líneas primera, segunda, cuarta y quinta de cada densidad cumplen la función de brindar barrera y protección a las terceras líneas.

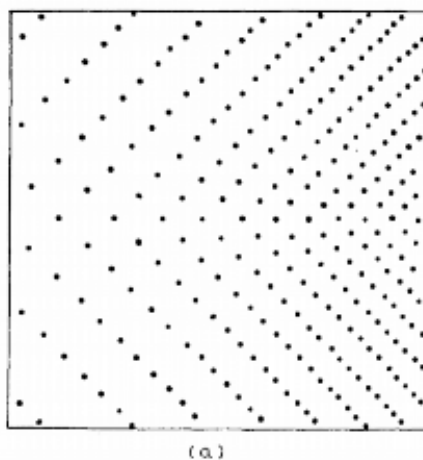


Figura 5. Diseño II. Equal-area contours = vertical /lines.equal-shape contours = horizontal lines. Adaptado de Nelder (1962) New kinds of systematic designs for spacing experiments. *Biometrics*. Recuperado de <https://sci-hub.tw/10.2307/2527473>

Tabla 1
Densidades de siembra.

Plántulas/ha	Distanciamiento (m)	Plántulas/densidad
10000	1 x 1	55
8750	1,07 x 1,07	94
7500	1,15 x 1,15	130
6250	1,30 x 1,30	162
5000	1,41 x 1,41	190
2500	2 x 2	163

6.3 Elección de los individuos a muestrear

Mediante el programa estadístico CRAN R-project se desarrolló la elección de los individuos por medio del método jerárquico de Ward el cual concentra los individuos en clústers de tal manera que al agruparse dos de ellos la pérdida o alteración de los datos originales sea mínima y define dicha pérdida de información como la suma de las distancias a los cuadrados de error de cada elemento con respecto al centro del clúster originado.

El proceso de conglomeración se realizó por densidad y teniendo en cuenta las variables índice de biomasa (IndBiomasa) y diámetro a la altura del cuello (dac) en los ejes Y y X, respectivamente, realizando con anterioridad una estandarización de los datos.

6.4 Análisis estadístico

Para esta investigación fue utilizado el análisis de varianza o ANOVA efectuada en el programa CRAN R-project, en conjunto con la prueba de Tukey con el objetivo de observar con mayor facilidad los efectos que tiene la densidad inicial de siembra sobre las variables estudiadas (diámetro, altura, índice de biomasa y diámetro de copa) determinando el nivel de significancia de cada una de las comparaciones realizadas entre las variables.

6.5 Modelos de crecimiento

Con los datos recolectados en campo, registrados en una base de datos y con ayuda del programa estadístico CRAN R-project se desarrollaron varios modelos de crecimiento con el fin de buscar el que mejor se ajustara a la especie y a las condiciones de la plantación. Los modelos utilizados fueron el lineal logarítmico, Polinómica II grado, Polinómica III grado, Moiseev I, Moiseev II, Trull, Didkorsky, Tretyakow, Hossfeld I, Hossfeld I modificado, Hossfeld II, Smalian, Todorovic I, Alométrica, Hossfeld IV, Yoshida I, Terazaki, Korsun, Gram y Siven. Los ocho primeros hacen parte del grupo uno que permite su ajuste mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios. Los siguientes cinco modelos entran en el grupo dos cuyas funciones son cocientes de polinomios. Las funciones cuya variable independiente se encuentran elevados a un exponente hacen parte del grupo tres y en él se ubican los tres siguientes modelos. En el grupo cuatro hacen parte los siguientes 3 modelos que tienen como característica tener un exponente en la variable t (edad) y el último de ellos corresponde al grupo seis cuya potencia está en función de t (Kiviste et al., 2002).

6.6 Medición de la biomasa aérea

A los individuos seleccionados como los más significativos de cada densidad se les realizó el procedimiento propuesto por Rodríguez & Ramírez (2008) para la determinación de la biomasa aérea. Se tomaron datos de las variables diámetro, altura y diámetros de copa antes de comenzar con el apeo de los árboles. Cada individuo fue seccionado por componentes (fuste, follaje, corteza y ramas) separadas cada una de ellas en bolsas herméticas debidamente marcadas buscando que se pierda la menor cantidad de humedad en el proceso de traslado.

A cada una de las muestras se les efectuó su respectivo pesado en el laboratorio y para el proceso de secado en horno, se sacaron muestras significativas de aquellos árboles con cantidades muy

grandes en sus componentes. Los componentes de cada individuo muestreado se introdujeron en sobres de manila a una temperatura de 65°C durante 24 horas y con el fin de observar la estabilidad del peso seco de las estructuras se realizó otro proceso de secado durante una hora a la misma temperatura; realizando el respectivo pesado al finalizar cada proceso.

6.7 Medición del carbono contenido por componente en cada individuo

Tomando como guía la metodología propuesta por (Acosta, Carrillo, & Díaz, 2009) que toma como base el argumento de Díaz et al. (2007) de que la biomasa está conformada en un 50% de carbono, se determinaron los contenidos de carbono de los componentes de cada árbol, multiplicando los pesos secos de cada uno de ellos por la constante 0,5.

6.8 Medición de Carbono Total

Con los modelos de crecimiento que mejor se ajustaron a los datos obtenidos y realizando un ajuste en sus parámetros se determinó el total de carbono (TC) presente en los individuos a los cuales se les midieron las variables dasométricas antes mencionadas.

6.9 Medición de Competencia

Teniendo en cuenta los dos grupos en las cuales Munro (1974) clasifica los índices de competencia, se desarrolló el índice de Reineke (IDR) para cada una de las densidades analizadas, el cual relaciona el crecimiento de los árboles y la densidad a partir de la evaluación de variables dasométricas, mediante la siguiente formula (Taboada et al., 2003):

$$IDR = 10^{\log_{10}(N)+1,605*\log_{10}(dm)-1,605}$$

Donde N es el número de árboles/ha y dm es el diámetro medio por densidad.

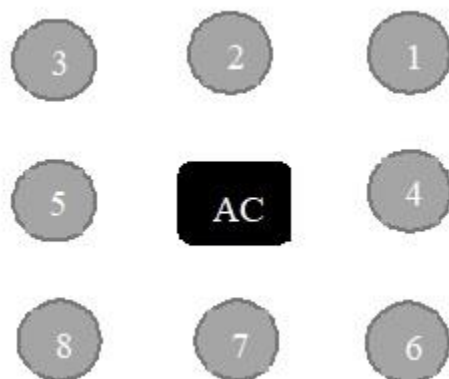


Figura 6. Diagrama del proceso de selección de los arboles competidores. AC: árbol control.

Para aquellos índices que consideran que la determinación de competencia bajo la relación de variables diámetro y altura no es suficiente para explicar este proceso, se llevó a cabo la identificación de aquellos posibles competidores de los arboles más representativos de cada densidad de acuerdo al criterio cinco planteado por Taboada et al. (2003) basado en la definición de zona de influencia que consiste en un círculo con centro en la base del árbol control, la cual elige a todos aquellos individuos cercanos a este árbol y cuyas zonas de influencia se crucen con la de este individuo, como posibles competidores. Para el presente estudio se realizó una modificación a este criterio describiendo a la zona de influencia del árbol control en forma rectangular, como se muestra en la *Figura 6* y se tomó las mediciones de las variables diámetro, altura y diámetros de copa de cada uno de ellos en sentido contrario a las manecillas de reloj.

7. Resultados

Mediante el método de Ward, el cual hace parte del análisis jerárquico clústers se asociaron los individuos de cada densidad en familias o grupos con un alto grado de similitudes entre ellos como se muestra en la *Figura 7* representando dicha unión mediante enlaces dispuestos en el dendrograma y que determinan el nivel de similitud de los árboles de las densidades 10000 y 2500. En la Tabla 2 se aprecian los resultados de cada clúster mostrando la selección de los árboles más representativos de cada densidad.

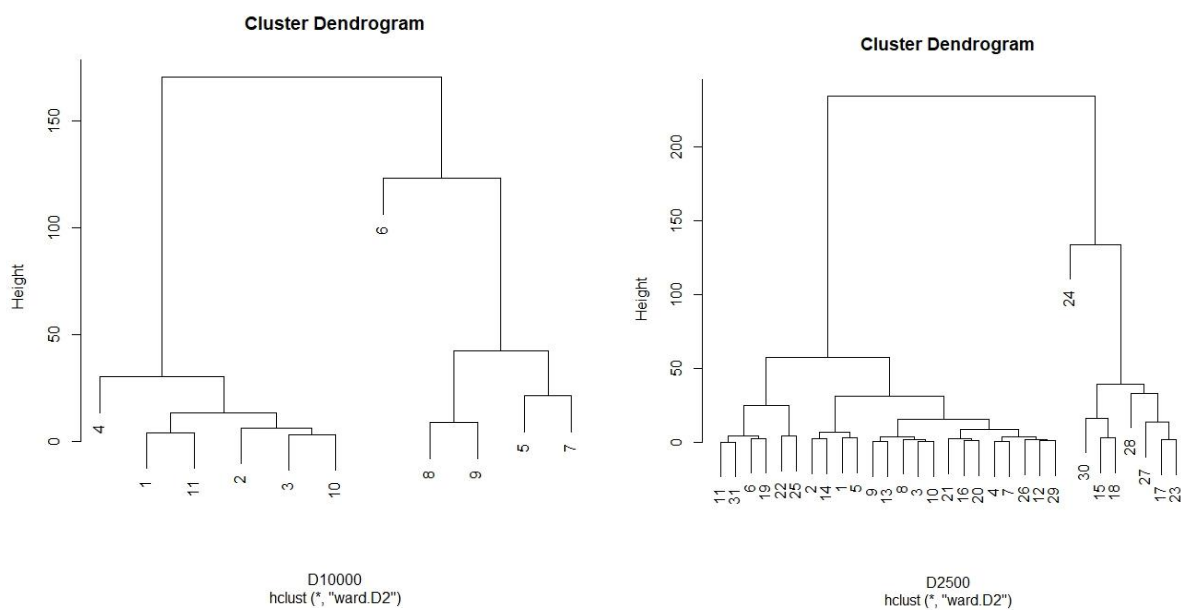


Figura 7. Dendrograma de las densidades 10000 y 2500 árboles/ha.

Tabla 2
Árboles más representativos por densidad.

Densidad	Árbol	Densidad	Árbol
10000	2	6250	67
	5		76
	6		88
8750	19	5000	110
	20		112
	27		119
7500	38	2500	135
	50		142
	56		151

7.1 Modelos de crecimiento

Los modelos de crecimiento que mejor se ajustaron a las variables dac y Ht , fueron las funciones de Lineal logarítmica, Moiseev I, Moiseev II, Hossfeld I (modificado), Strand y Terazaki, cuyos parámetros mostraron ser muy significativos para estos datos ($P < 0,05$). En la Tabla 3 se describen estos modelos de acuerdo al grupo al cual hacen parte, donde los tres primeros pertenecen al grupo uno cuya característica es que tienden a mostrar un comportamiento lineal y sus parámetros a y b , c , d representan el intercepto y la pendiente de su función, respectivamente. Los siguientes dos modelos son funciones de operaciones con polinomios en sus denominadores, afectando con su parámetro “ a ” el diámetro al que se va a presentar el punto de inflexión (Apéndice 24) y este a su vez será junto con la asíntota horizontal, dependiente del parámetro “ b ”. El último modelo corresponde al grupo cuatro en el cual la variable t (edad) se encuentra como exponente del término Euler (e) en el que el parámetro “ a ” afecta la asíntota horizontal y “ b ” el punto de inflexión.

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica mill*

Para graficar estos modelos se utilizó el rango entre el valor mínimo (0,05) y máximo (1,80) de la variable *dac*, estas graficas se observan desde la *Figura 8* hasta la

Figura 13 mostrando en cada una de ellas el comportamiento del crecimiento de estas dos variables.

Tabla 3

Modelos de regresión no lineal evaluados en esta investigación.

Referencia	Expresión matemática del modelo	Número de parámetros	Ámbito de definición	Pasa por el origen	Asíntota horizontal	Máximo	Punto de inflexión	y'=f(y)	Grupo
Lineal logarítmica	$y = a + b \ln(t) \quad a < 0, \quad b > 0$	2	$\forall t > 0$	No	No	No	No	Si	--
Moiseev I	$y = a + b \log(t) + c \log^2(t)$	3	$\forall t > 0$	No	No	Si	Si	No	--
Moiseev II	$y = a + b \log(t) + c \log^2(t) + d \log^3(t)$	4	$\forall t > 0$	No	No	Si	Si	No	--
Hossfel I (mod.)	$y = \frac{t^2}{(a + bt)^2} \quad a > 0$	2	$\forall t \geq 0 / t \neq \frac{-a}{b}$	Si	Si	No	Si	Si	PD
Strand	$y = \left(\frac{t}{a + bt} \right)^3 \quad a > 0, \quad b > 0$	2	$\forall t \geq 0$	Si	Si	No	Si	Si	PD
Terazaki	$y = e^{a-b/t} \quad a > 0, \quad b > 0$	2	$\forall t > 0$	No	Si	No	Si	Si	PD

Nota: Modelos de crecimiento de regresión no lineal pertenecientes a los grupos 1, 2 y 4 que presentaron mejor ajuste a las variables evaluadas en esta investigación. y= altura (Ht), t= diámetro a la altura del cuello (dac). Adaptado de Kiviste et al. (2002) Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal (No. 634.956 F8). Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.

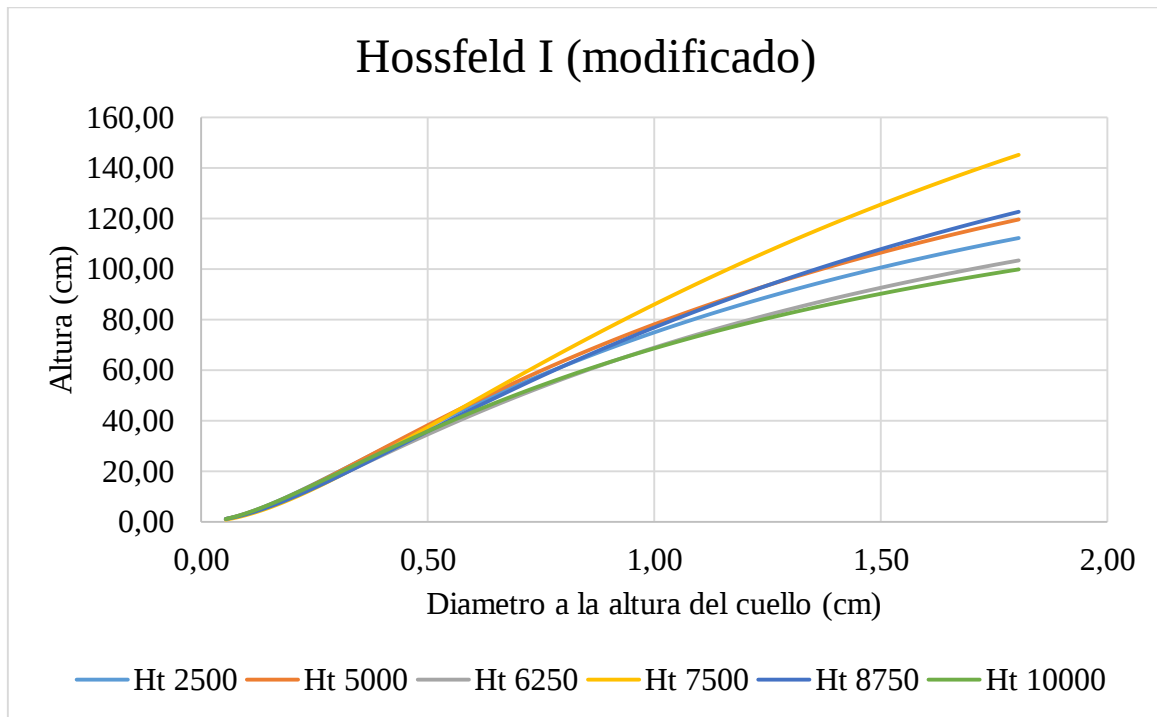


Figura 8. Función de crecimiento Hossfeld I modificado.

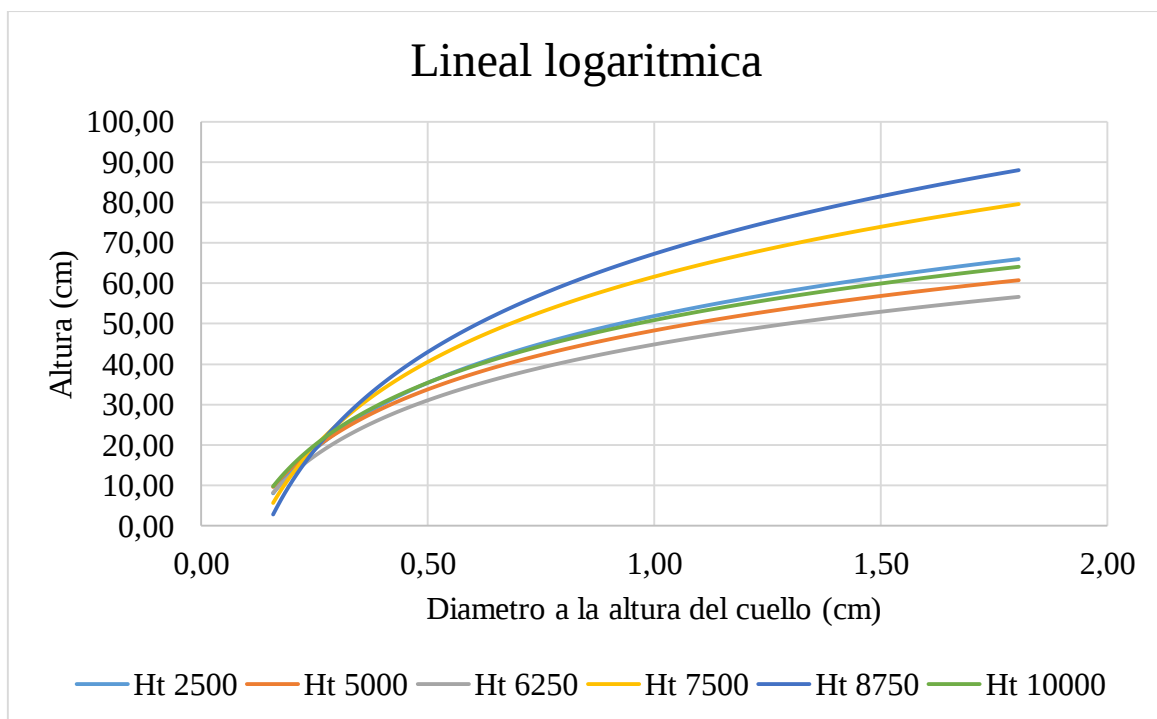


Figura 9. Función de crecimiento lineal logarítmica.

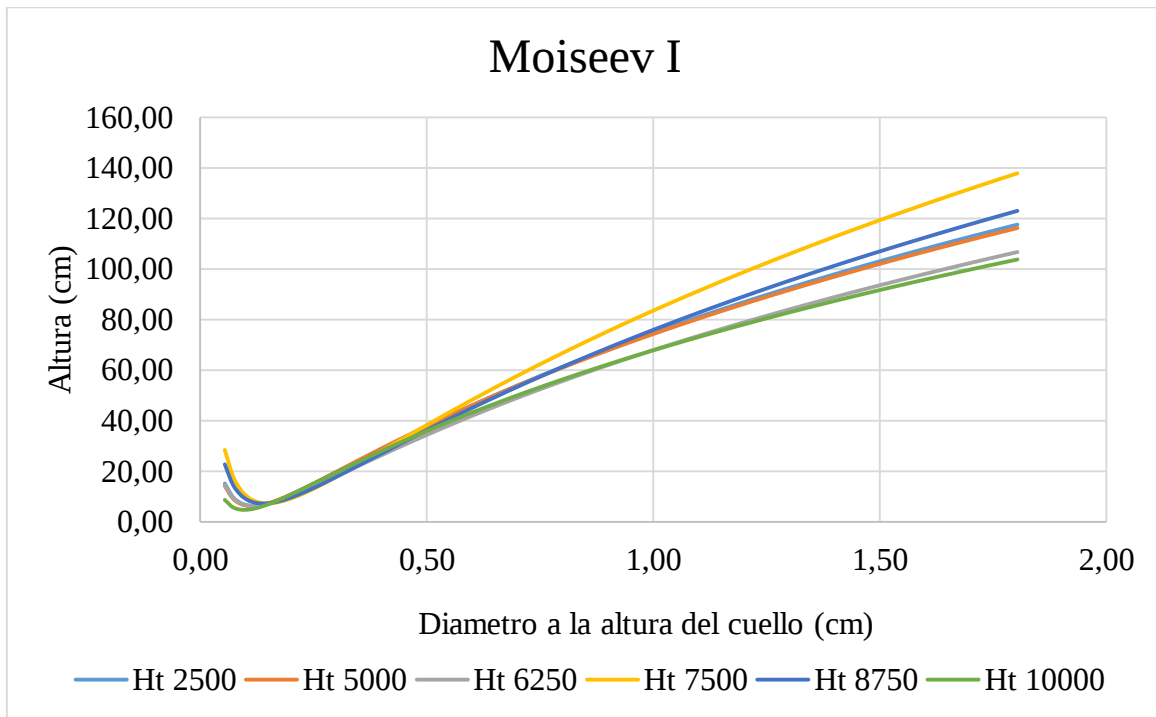


Figura 10. Función de crecimiento Moiseev I.

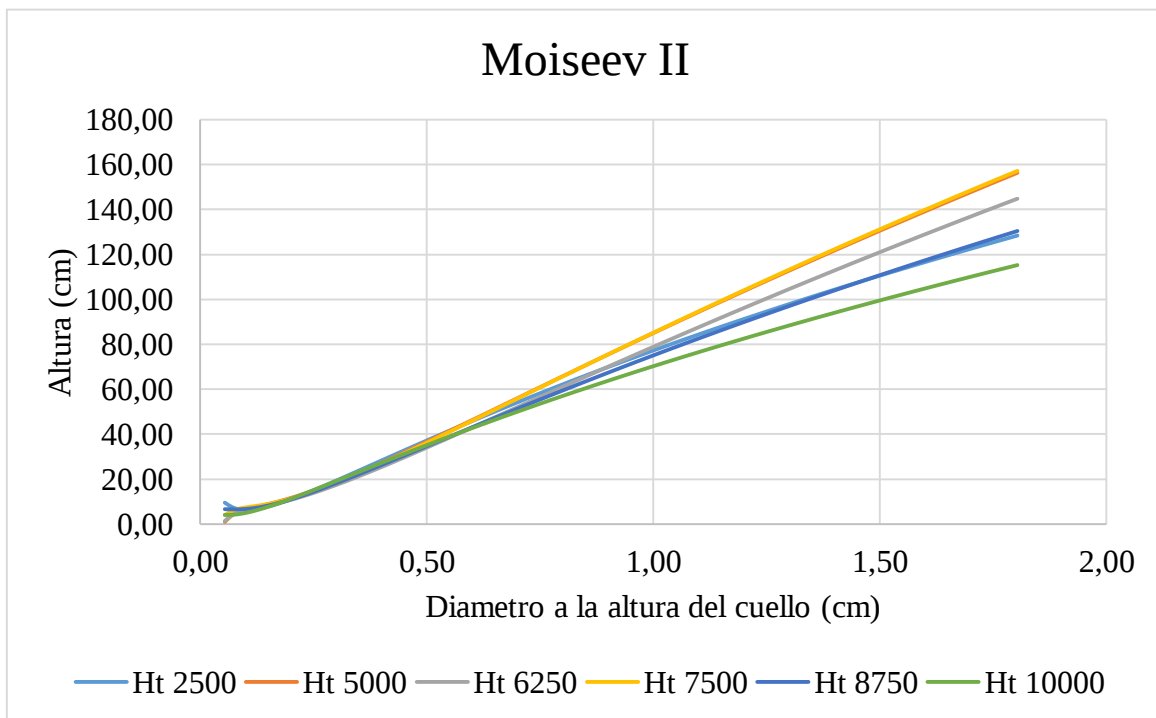


Figura 11. Función de crecimiento Moiseev II.

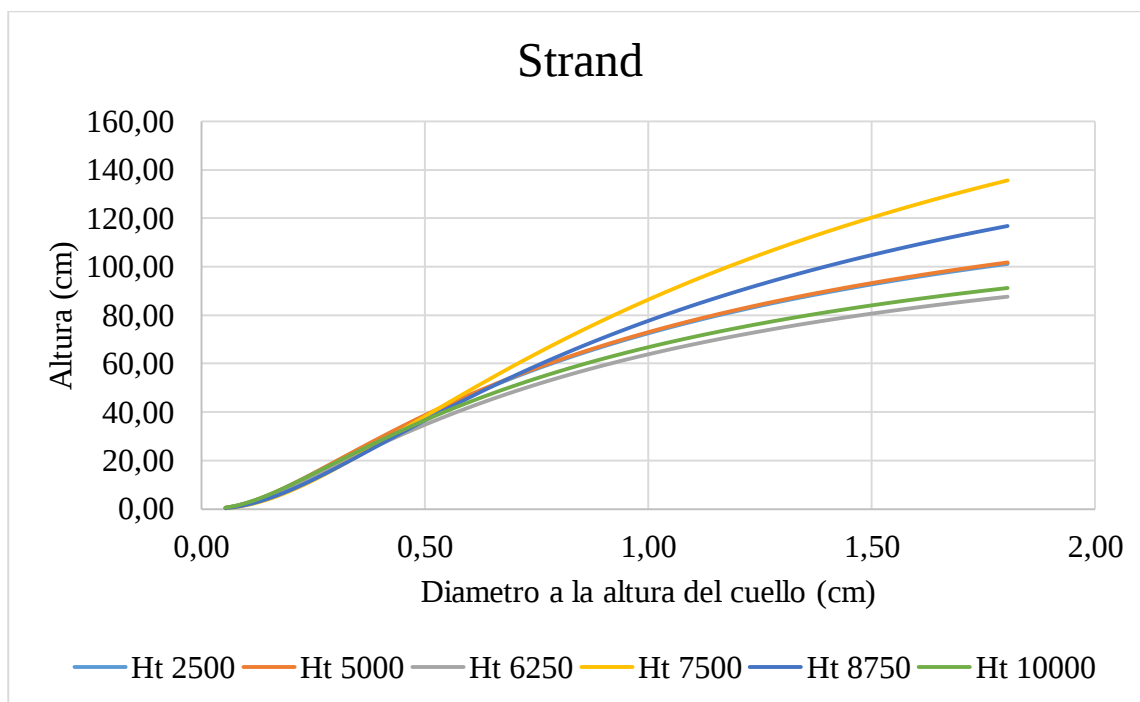


Figura 12. Función de crecimiento Strand.

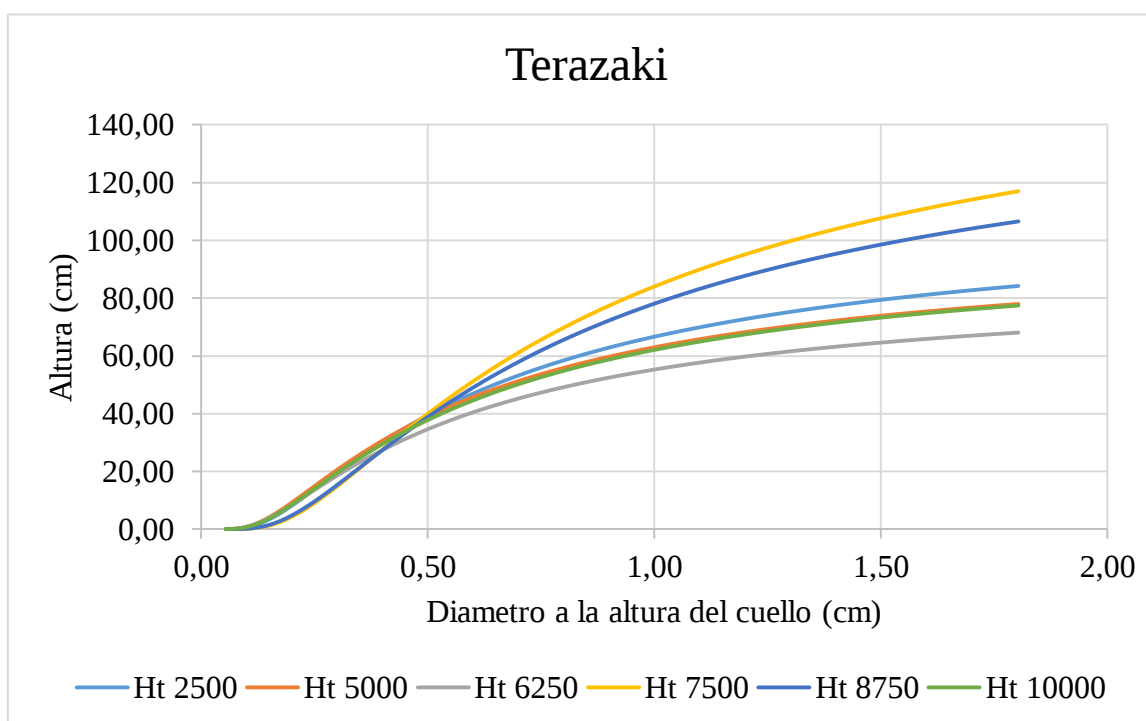


Figura 13. Función de crecimiento Terazaki.

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica* mill

En la Tabla 4 se observan los modelos de regresión no lineal con sus respectivos parámetros y AIC, considerándose a partir del menor valor de este último, el modelo que mejor representa el crecimiento de las variables por densidad. Exceptuando la densidad 10000, para la que el mejor modelo fue el Hossfeld I modificado con un valor de AIC de 1248,0280 las demás densidades coincidieron en el modelo Moiseev II que mejor caracterizó sus variables.

Tabla 4

Coeficientes de regresión estimadas en los modelos no lineales.

Modelos	Densidad	a	b	c	d	AIC
Hossfeld I (mod)	2500	0,0474***	0,0681***			3719,99
	5000	0,0487***	0,0645***			4196,01
	6250	0,0497***	0,0708***			3910,18
	7500	0,05***	0,05***			3125,31
	8750	0,05***	0,06***			2344,85
	10000	0,04***	0,07***			1248,02
Lineal logarítmica	2500	51,97***	23,85***			4033,17
	5000	48,29***	20,99***			4726,97
	6250	44,86***	19,95***			4077,22
	7500	61,66***	30,43***			3655,48
	8750	67,31***	35,10***			2618,72
	10000	50,90***	22,33**			1393,54
Moiseev I	2500	74,71***	146,83***	78,71***		3719,32
	5000	74,21***	144,14***	76,29***		4202,46
	6250	67,85***	133,05***	71,76***		3909,14
	7500	83,48***	183,69***	110,60**		3145,45
	8750	75,86***	159,95***	93,07***		2344,79

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica* mill

Modelos	Densidad	a	b	c	d	AIC
Moiseev II	10000	67,77***	124,55***	61,43***		1253,47
	2500	77,25***	167,14***	120,56***	24,34*	3716,93
	5000	85,00***	218,58***	214,61***	74,54***	4112,45
	6250	78,87***	202,29***	197,54***	67,98***	3896,17
	7500	85,16***	221,06***	215,83***	72,57***	3084,97
	8750	75,07***	175,21***	148,73***	41,89**	2336,26
Strand	10000	70,24***	146,63***	106,89***	25,56***	1250,53
	2500	0,05**	0,18***			3734,97
	5000	0,05***	0,18***			4273,70
	6250	0,05***	0,19***			3925,71
	7500	0,07***	0,15***			3180,77
	8750	0,06***	0,16***			2364,50
Terazaki	10000	0,05***	0,19***			1258,76
	2500	4,72***	0,52***			3810,13
	5000	4,62***	0,47***			4463,96
	6250	4,47***	0,46***			3974,65
	7500	5,17***	0,74***			3344,22
	8750	5,05***	0,69***			2428,65
	10000	4,62***	0,49***			1298,39

a, b, c y d: parámetros del modelo no lineal, AIC: criterio de información de Akaike

*significativo $P < 0,05$

**Muy significativo $P < 0,01$

***Extremadamente significativo $P < 0,001$

En la *Figura 14* se muestra el análisis exploratorio entre las variables diámetro a la altura del cuello, altura y área de copa con el fin de observar el comportamiento entre ellas. De esta manera se aprecia que la altura con respecto al diámetro tiende a mostrar una tendencia lineal. Estas dos

variables con respecto al área de copa expresan una predisposición a ser parabólico, señalando algunos valores atípicos en sus datos.

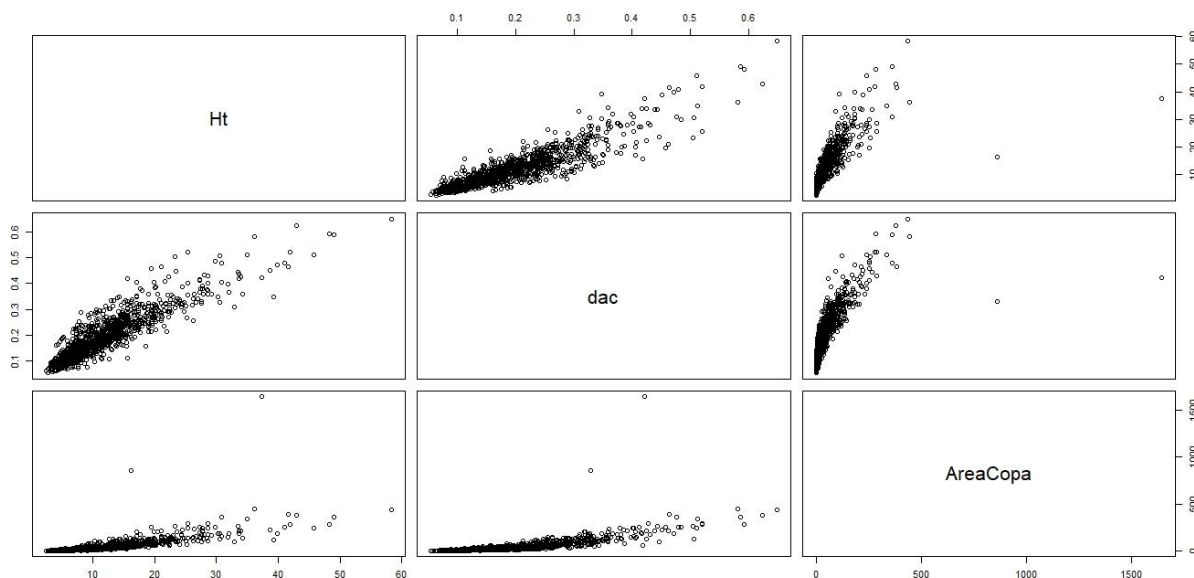


Figura 14. Análisis exploratorio de las variables dac, Ht y AreaCopa.

7.2 Diámetro a la altura del cuello

El análisis que se obtuvo de la ANOVA para la variable dac mostró que su interacción con la densidad de siembra era significativa ($P < 0,001$) y de acuerdo a los resultados arrojados por el método de comparaciones múltiples Tukey se encontraron que las densidades con mayor significancia fueron las relaciones 8750-2500, 8750-5000 y 8750-6250 (Apéndice 1). En la Tabla 5 se muestran los tres grupos en los cuales se subdividen estas densidades, siendo parte del primero de ellos las densidades mayores e iguales a 7500 árboles/ha con los coeficientes de variación más altos de todas las densidades, lo que denota una alta heterogeneidad entre sus individuos y un crecimiento alto en relación a esta variable (Tabla 6) y a pesar de que no presentan diferencias

significativas entre ellas son las densidades con mayor crecimiento, como se muestra en la *Figura 15*.

Tabla 5
Agrupación de la variable diámetro a la altura del cuello por densidad según el método de Tukey.

Densidad	Dac	Grupos
TTR_8750	0,82	a
TTR_7500	0,65	a b
TTR_10000	0,61	a b c
TTR_2500	0,50	b c
TTR_6250	0,49	b c
TTR_5000	0,44	c

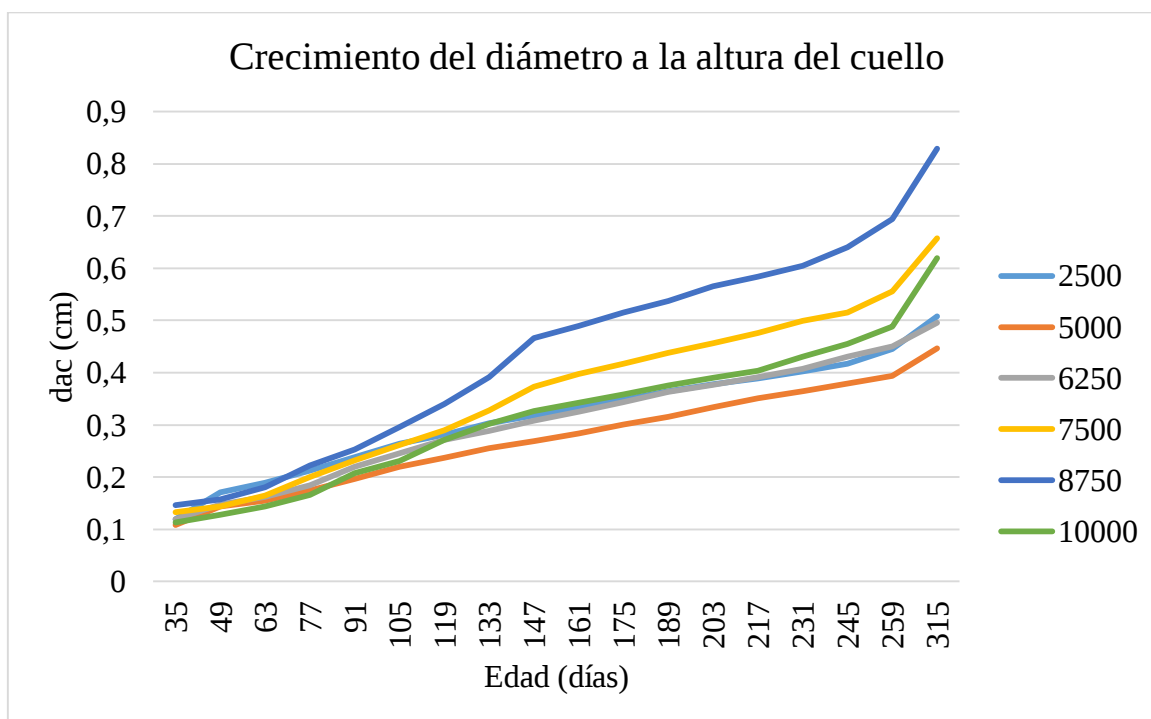


Figura 15. Comportamiento del crecimiento de la variable dac.

En el segundo grupo se encuentran las densidades 2500, 6250, 7500 y 10000, la tercera de ella con el coeficiente de variación más alto ($Cv=0,51$) y finalmente en el tercer grupo se encuentran las densidades 2500, 5000, 6250 y 10000. Estos dos últimos grupos no presentan variaciones altas en el crecimiento de esta variable y las densidades 6250 y 5000 son aquellas con menor crecimiento de esta especie, consecuencia del bajo desarrollo de sus individuos ubicados en una zona de la parcela con suelos completamente inundados y con un drenaje pobre. En la *Figura 16* se observan con mejor detalle el agrupamiento de esta variable representando la densidad 8750 como aquella con mayor diferenciación de las demás densidades.

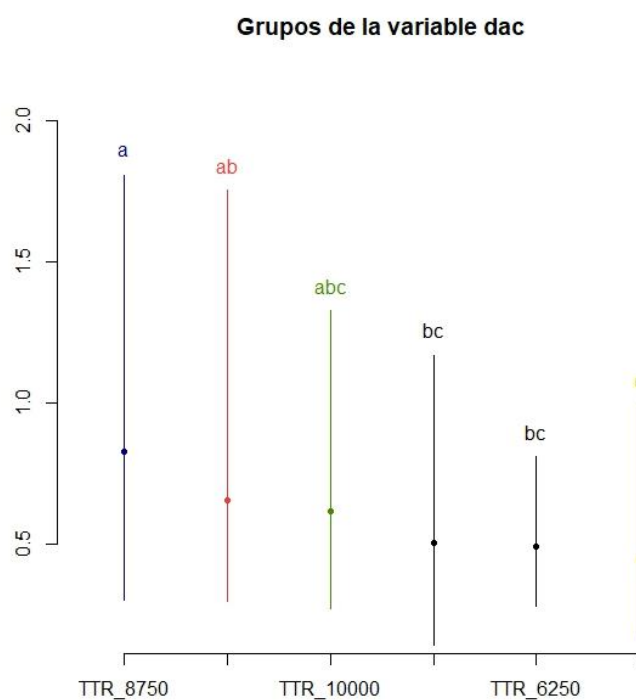


Figura 16. Representación gráfica de los grupos de la variable diámetro a la altura del cuello.

Tabla 6
Parámetros estadísticos para la variable dac.

Densidad	Media	n	Min	Max	Cv
TTR_10000	0,61	11	0,27	1,32	0,50
TTR_2500	0,50	31	0,14	1,17	0,46
TTR_5000	0,44	38	0,18	0,98	0,41
TTR_6250	0,49	32	0,28	0,81	0,27
TTR_7500	0,65	26	0,29	1,75	0,51
TTR_8750	0,82	17	0,30	1,80	0,66

Media: promedio aritmético (cm), n: número de individuos evaluados, Min: diámetro mínimo a la altura del cuello (cm), Max: diámetro máximo a la altura del cuello (cm), Cv; coeficiente de variación.

7.3 Altura

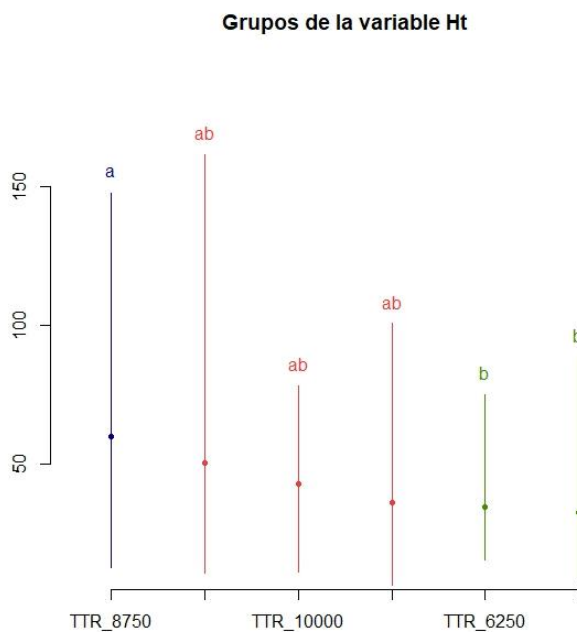


Figura 17. Representación gráfica de los grupos de la variable altura.

La interacción entre la variable altura con la densidad, según datos de la ANOVA es muy significativa ($P < 0,01$) y con la comparación entre las densidades se encontraron diferencias entre las densidades 8750-2500, 8750-5000 y 8750-6250 (Apéndice 2). En la Tabla 7 se observan la distribución de estas densidades en dos grupos, mostrando que el crecimiento de esta variable presenta igual comportamiento que la variable dasométrica anterior. En el grupo “a” se encuentran las densidades que presentaron mayor crecimiento (*Figura 18*), siendo la 8750 aquella con mayor coeficiente de variación (Tabla 8), sin embargo, este valor no es muy alto comparado con las demás densidades. En el grupo “b” se encuentran aquellas con menor crecimiento, similar al de la variable diámetro. Esta agrupación se observa mejor en la *Figura 17* representando con mayor diferencia la densidad 7500.

Tabla 7
Agrupación de la variable altura por densidad según el método de Tukey.

Densidad	Ht	Grupos	
TTR_8750	59,97	a	
TTR_7500	50,59	a	b
TTR_10000	43,08	a	b
TTR_2500	36,43	a	b
TTR_6250	34,79		b
TTR_5000	32,77		b

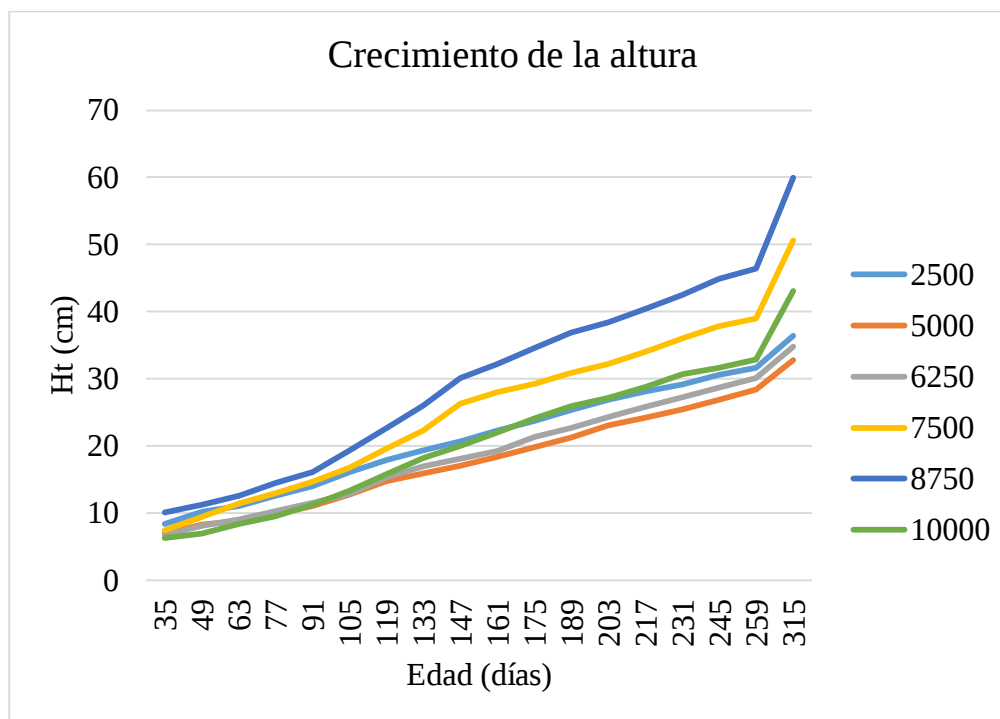


Figura 18. Comportamiento del crecimiento de la variable Ht.

Tabla 8

Parámetros estadísticos para la variable altura.

Densidad	Media	n	Min	Max	Cv
TTR_10000	43,08	11	11,44	78,20	0,60
TTR_2500	36,43	31	6,47	100,60	0,65
TTR_5000	32,77	38	9,53	88,40	0,62
TTR_6250	34,79	32	15,53	75,20	0,48
TTR_7500	50,59	26	11,14	161,40	0,68
TTR_8750	59,97	17	13,017	147,40	0,80

Media: promedio aritmético (cm), n: número de individuos evaluados, Min: altura mínima (cm), Max: altura máxima (cm), Cv; coeficiente de variación.

7.4 Índice de Biomasa

Tabla 9

Parámetros estadísticos para la variable Índice de biomasa.

Densidad	Media	n	Min	Max	Cv
TTR_10000	29,68	11	0,86	137,49	1,39
TTR_2500	17,43	31	0,13	137,71	1,61
TTR_5000	11,49	38	0,32	83,43	1,68
TTR_6250	10,94	32	1,27	46,25	1,03
TTR_7500	46,89	26	1,09	495,41	2,11
TTR_8750	106,44	17	1,30	422,14	1,48

Media: promedio aritmético (cm³), n: número de individuos evaluados, Min: índice de biomasa mínimo (cm³), Max: índice de biomasa máximo (cm³), Cv; coeficiente de variación.

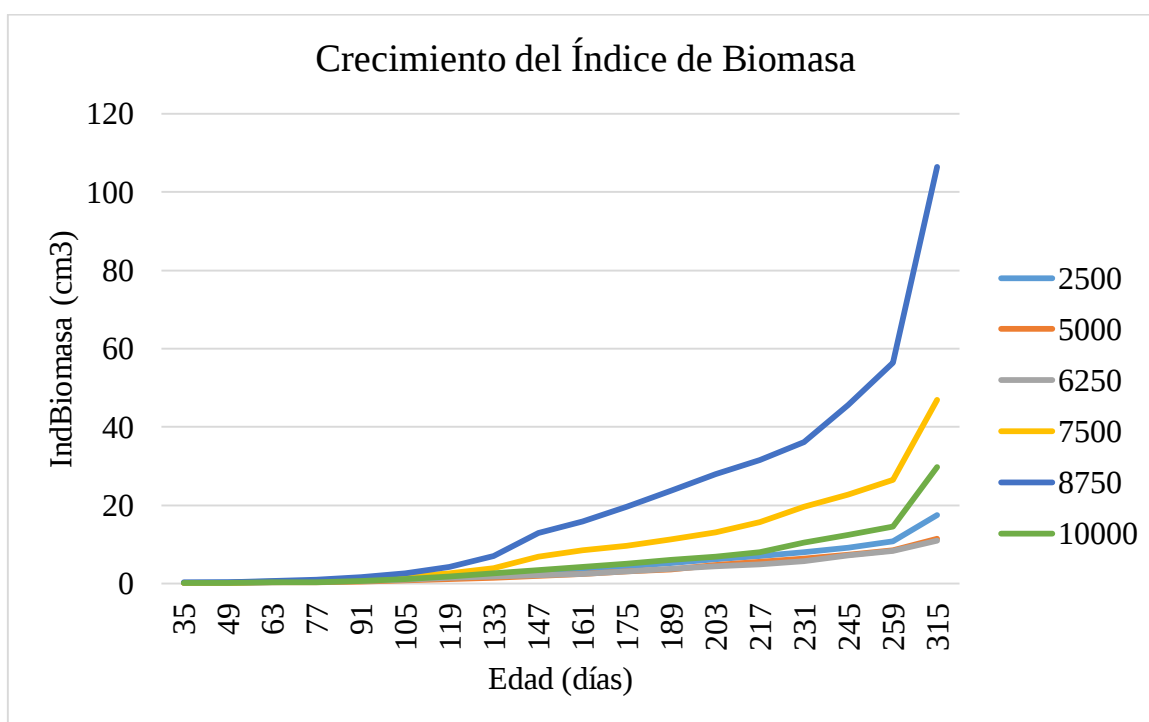


Figura 19. Comportamiento del crecimiento de la variable IndBiomasa.

De acuerdo al análisis estadístico se obtuvo que la relación índice de biomasa y densidad fue significativa con un $P < 0,001$ y con el método de Tukey se halló que las densidades 8750-2500, 8750-5000 y 8750-6250 son las relaciones que mayor significancia presentan para esta variable (Apéndice 3). Se encuentra dividida en dos grupos, en el primero de ellos se localizan las dos densidades con mayor crecimiento (Tabla 10) mostrando una gran diferencia en sus promedios, la cual se debe a la alta heterogeneidad de los individuos de la densidad 7500 reflejada en su coeficiente de variación (Tabla 9). En el segundo grupo están las densidades con un menor crecimiento y un comportamiento similar entre ellas, presentándose el valor más bajo en la densidad 6250 (Figura 19). En la Figura 20 se observa que la densidad 8750 presenta la mayor diferencia en relación con las demás densidades, a pesar de que la 7500 posee un rango más alto que la anterior causado por valores atípicos.

Tabla 10

Agrupación de la variable índice de biomasa por densidad según el método de Tukey.

Densidad	IndBiomasa	Grupos	
TTR_8750	106,44	a	
TTR_7500	46,89	a	b
TTR_10000	29,68	a	b
TTR_2500	17,43		b
TTR_5000	11,49		b
TTR_6250	10,94		b

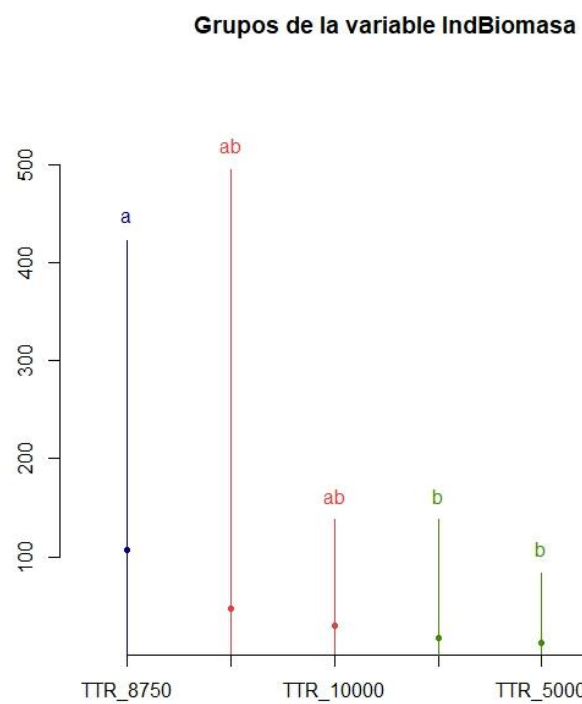


Figura 20. Representación gráfica de las clases de la variable índice de biomasa.

7.5 Área de Copa

Tabla 11
Agrupación en grupos de la variable área de copa.

Densidad	AreaCopa	Grupos
TTR_8750	1027,10	a
TTR_7500	362,19	b
TTR_10000	351,36	b
TTR_2500	218,45	b
TTR_5000	192,10	b
TTR_6250	187,31	b

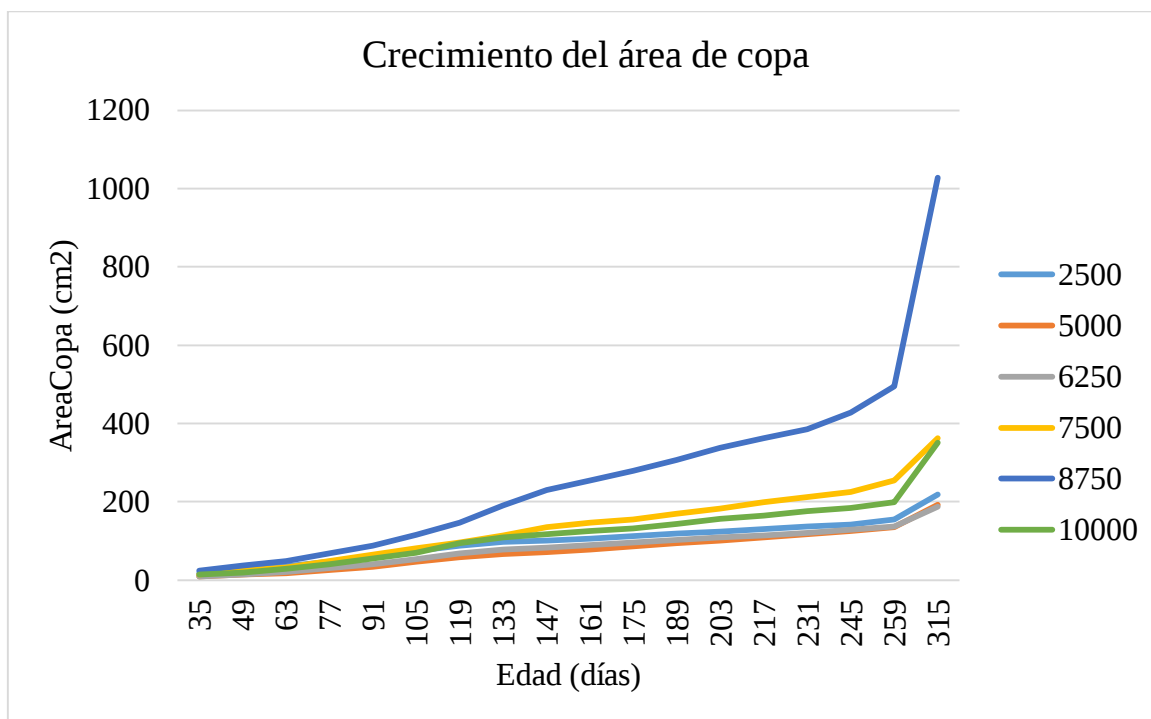


Figura 21. Comportamiento del crecimiento de la variable AreaCopa.

La relación área de copa y densidad muestra una significancia alta con un $P < 0,001$ determinando la misma relación entre densidades observadas en las anteriores variables (8750-2500, 8750-5000 y 8750-6250) con alta significancia (Apéndice 4). Se clasifica en dos grupos (Tabla 11), el primero de ellos con la densidad 8750, la cual contiene el mayor promedio, muy por encima de las demás densidades, debido a la presencia de individuos con características de crecimiento variadas (Figura 21), aunque sin tanta heterogeneidad como se presenta en la densidad 7500 con un coeficiente de variación de 1,65 (Tabla 12). En el segundo grupo las densidades muestran un comportamiento similar en el desarrollo de esta variable, con el mínimo valor en la densidad 6250 pero con individuos más homogéneos en sus características. En la Figura 22 se muestran las densidades 8750 y 7500 como las de mayor diferenciación en cada uno de los grupos a los cuales cada uno hace parte.

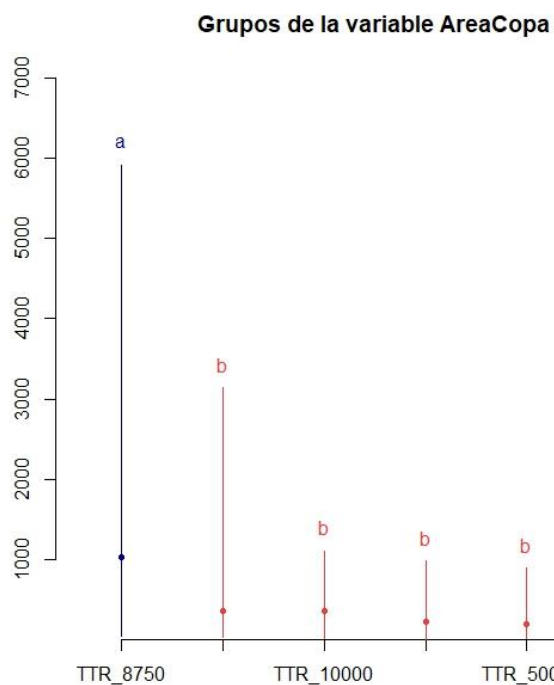


Figura 22. Representación gráfica de los grupos para la variable área de copa.

Tabla 12

Parámetros estadísticos para la variable área de copa.

Densidad	media	n	Min	Max	Cv
TTR_10000	351,36	11	19,19	1103,96	1,00
TTR_2500	218,45	31	5,87	977,72	0,99
TTR_5000	192,10	38	14,58	891,11	1,05
TTR_6250	187,31	32	41,01	650,80	0,84
TTR_7500	362,19	26	31,11	3134,23	1,65
TTR_8750	1027,10	17	40,45	5917,34	1,63

Media: promedio aritmético (cm²), n: número de individuos evaluados, Min: área de copa mínima (cm²), Max: área de copa máxima (cm²), Cv; coeficiente de variación.

7.6 Carbono contenido en los componentes estructurales por densidad

Con los pesos secos obtenidos mediante el procedimiento de secado al horno, se obtuvo la proporción de carbono contenido en los componentes estructurales corteza, follaje, fuste y ramas para cada densidad, como se muestra en la *Figura 23* en la que se observa que el follaje es el componente que mayor contenido de carbono presenta, muy por encima de los demás, con un promedio de 32,69 g seguido de las ramas con una media de 8,83 g; mientras que el contenido de carbono en la corteza es la de menor promedio de todos los componentes. Las densidades 8750, 2500 y 7500 contienen la mayor proporción de carbono en el componente follaje y un coeficiente de variación de 1,36; 1,45 y 1,30; respectivamente (Tabla 13), lo que indica que los arboles no son homogéneos, presentándose individuos muy grandes comparados con otros más pequeños dentro de estas densidades. La densidad 8750 muestra el mayor contenido de carbono en todos los componentes estructurales.

Tabla 13
Contenido de carbono por componente estructural.

D	Corteza		Follaje		Fuste		Ramas	
	Cv	Media	Cv	Media	Cv	Media	Cv	Media
2500	1,21	2,25	1,45	47,48	1,45	6,99	1,32	1,33
5000	0,92	2,31	1,24	27,24	1,24	7,49	1,14	4,70
6250	0,84	1,40	1,16	11,53	1,16	3,45	0,97	3,00
7500	1,24	4,22	1,30	46,49	1,30	14,47	1,40	16,27
8750	1,11	4,32	1,36	53,45	1,36	15,95	1,21	23,23
10000	1,04	2,19	0,87	17,01	0,87	5,69	1,02	6,36

D: densidad, Cv: coeficiente de variación, Media: media aritmética (g).

7.7 Biomasa contenido en los componentes estructurales por densidad

El contenido de biomasa en los componentes mostro el mismo comportamiento que el contenido de carbono dejando ver la relación biomasa-carbono. El follaje y las ramas almacenan la mayor cantidad de biomasa con un promedio de 68,79 y 18,57 g respectivamente; y siendo las densidades 8750, 2500 y 7500 las que mayor proporción contienen del primero de estos componentes (*Figura 24*). El coeficiente de variación señala de igual manera la heterogeneidad existente entre los individuos para cada una de las densidades (Tabla 14).

Tabla 14
Contenido de biomasa por componente estructural.

D	Corteza		Follaje		Fuste		Ramas	
	Cv	Media	Cv	Media	Cv	Media	Cv	Media
2500	1,21	4,50	1,45	94,96	1,32	13,98	0,73	2,66
5000	0,92	4,62	1,24	54,49	1,14	14,99	1,04	9,40
6250	0,76	3,35	0,98	29,40	0,84	8,50	0,89	7,64
7500	1,24	8,44	1,30	92,99	1,40	28,95	1,59	32,54
8750	1,11	8,64	1,36	106,90	1,21	31,90	1,46	46,46
10000	1,04	4,39	0,87	34,03	1,02	11,39	0,92	12,73

D: densidad, Cv: coeficiente de variación, Media: media aritmética (g).

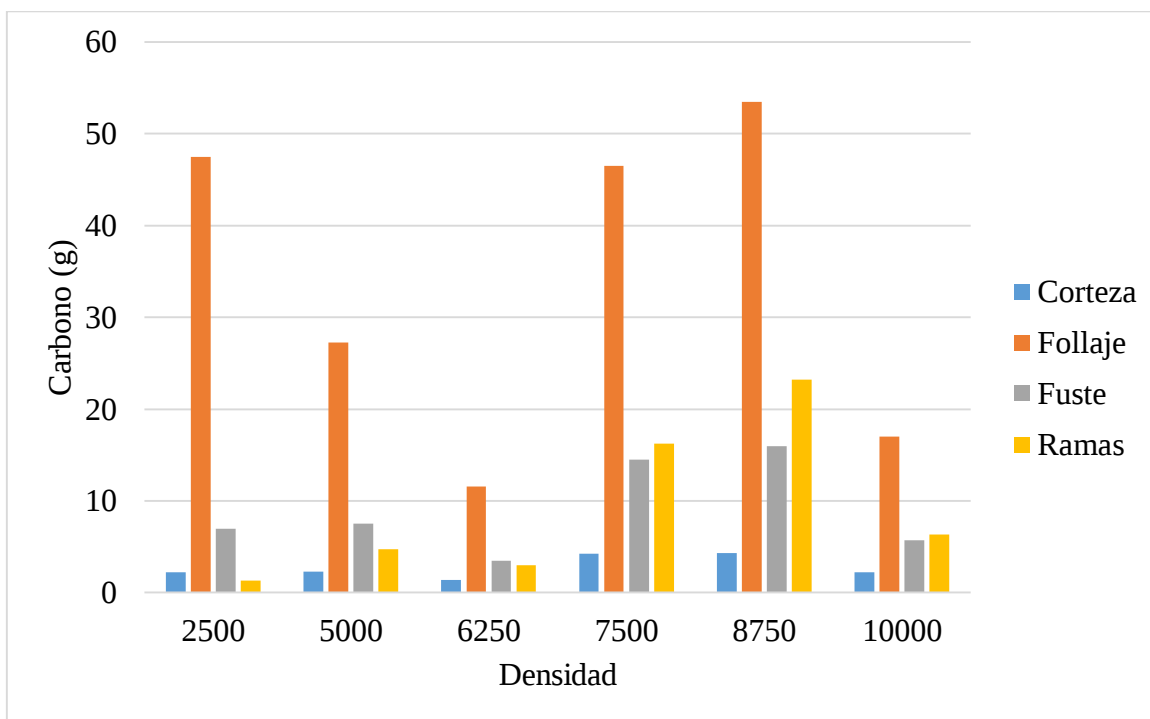


Figura 23. Carbono promedio contenida en cada componente estructural de los arboles muestra por densidad.

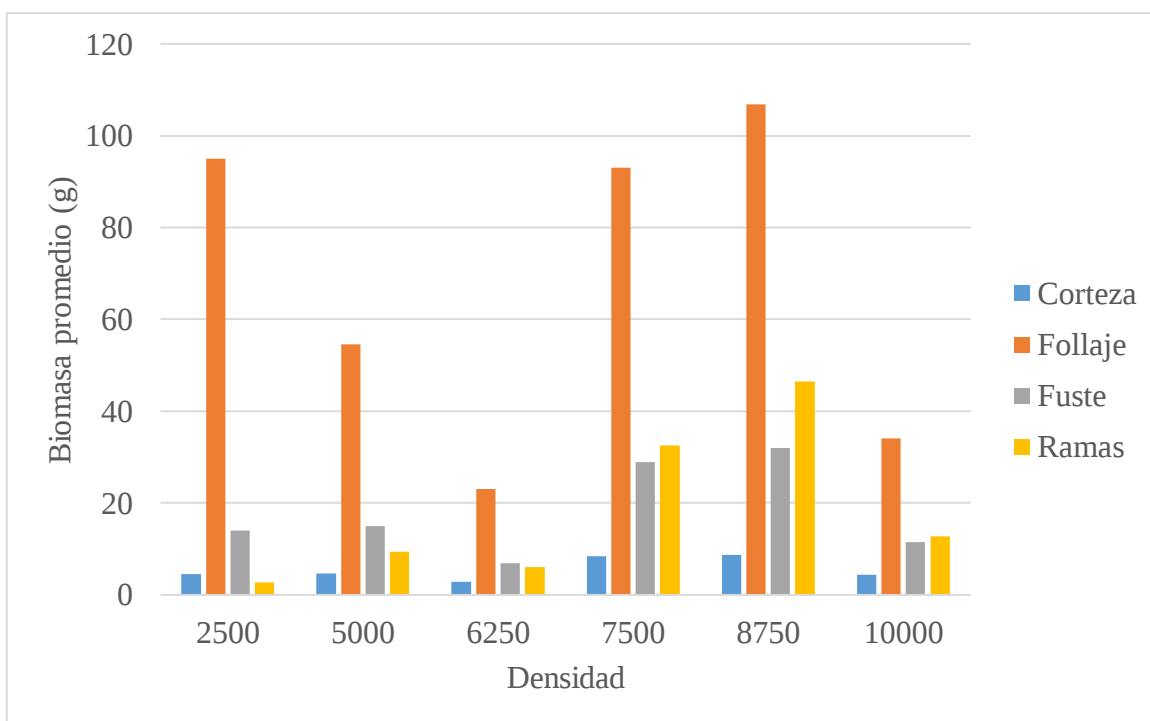


Figura 24. Biomasa promedio contenido en cada componente estructural de los arboles muestra por densidad.

7.8 Competencia

El índice de Reineke (IDR) permite relacionar el número de árboles con su diámetro cuadrático promedio para determinar el número de árboles/ha que se necesita en una determinada zona para evitar que estos individuos presenten procesos de competencia (Cancino, 2012). Debido a que la plantación posee individuos en sus primeras etapas de crecimiento el IDR arroja valores muy pequeños por lo que la determinación de competencia mediante la comparación de variables dasométricas no presenta gran relevancia.

Tabla 15

Relación entre la variable diámetro a la altura del cuello del árbol control y el de sus posibles competidores.

Árbol	Densidad	n	dac	media	Max	Min	Cv
2	10000	7	0,53	0,80	2,34	0,22	0,97
5	10000	8	1,28	0,96	1,74	0,14	0,53
6	10000	8	1,74	1,18	2,03	0,70	0,38
19	8750	5	1,50	0,32	0,57	0,08	0,68
20	8750	7	0,48	0,70	2,48	0,08	1,33
27	8750	6	2,72	1,23	2,76	0,18	0,96
38	7500	6	0,52	0,38	0,64	0,21	0,38
50	7500	7	2,47	0,84	1,84	0,37	0,58
56	7500	4	1,18	0,59	1,14	0,19	0,69
67	6250	3	1,05	0,41	0,56	0,25	0,37
76	6250	8	0,62	0,50	0,65	0,37	0,24
88	6250	3	1,35	0,51	0,81	0,36	0,49
110	5000	7	0,42	0,58	1,05	0,31	0,43
112	5000	4	2,09	0,61	0,90	0,31	0,44
119	5000	7	1,00	1,67	6,04	0,44	1,17
135	2500	4	1,84	0,35	0,60	0,15	0,58
142	2500	6	1,03	0,39	0,51	0,23	0,29
151	2500	5	1,84	0,63	1,40	0,34	0,68

Árbol: árbol control, n: cantidad de árboles competencia, dac: diámetro del árbol control (cm), media: promedio de los diámetros de los árboles competencia (cm), Max: diámetro máximo de los árboles competencia (cm), Min: diámetro mínimo de los árboles competencia (cm).

Sin embargo, mediante el criterio de zona de influencia es posible realizar un análisis comparativo de sus variables diámetro y altura entre un árbol control y sus posibles competidores y con ello estimar el comportamiento que presentan estos individuos para estas dos variables. Para ejecutar esta comparación se tuvo en cuenta la distancia entre ellos y la zona de la plantación donde se encontraban dispuestos, ya que debido a la poca capa freática y escaso drenaje de los suelos en una zona de la plantación se observó un crecimiento deficiente en aquellos que confluían allí, comparados con los demás individuos de la plantación.

Tabla 16

Relación entre la variable altura del árbol control y el de sus posibles competidores.

Árbol	Densidad	n	Ht	media	Max	Min	Cv
2	10000	7	31,10	54,22	134,60	14,58	0,83
5	10000	8	98,20	71,06	111,80	7,55	0,48
6	10000	8	106,80	89,05	149,80	49,20	0,35
19	8750	5	112	21,99	49,70	5,58	0,92
20	8750	7	49,70	44,72	153,40	5,58	1,37
27	8750	6	166	79,32	179,70	8,81	0,98
38	7500	6	28,90	31,40	54,80	11,55	0,44
50	7500	7	184,20	70,17	149,30	32,70	0,57
56	7500	4	97,60	52,69	93,70	13,96	0,63
67	6250	3	105	34,20	46,30	13,41	0,52
76	6250	8	56	53,81	86,00	38,80	0,29
88	6250	3	118,10	48,30	61,40	40,20	0,23
110	5000	7	52,80	56,48	97,00	31,50	0,43
112	5000	4	138,60	60,75	92,20	31,50	0,44
119	5000	7	89,10	70,58	110,80	36,70	0,36
135	2500	4	144,10	23,77	35,40	14,78	0,37
142	2500	6	79	33,75	63,40	12,11	0,52
151	2500	5	144,10	59,70	98,00	41,20	0,39

Árbol: árbol control, n: cantidad de árboles competencia, Ht: altura del árbol control (cm), media: promedio de las alturas de los árboles competencia (cm), Max: altura máxima de los árboles competencia (cm), Min: altura mínima de los árboles competencia (cm).

La densidad 8750 contiene el coeficiente de variación más alto para los árboles competidores tanto en la variable diámetro a la altura del cuello (0,99) como de la altura (1,09). El número de competidores vivos disminuye a medida que se aumenta el espaciamiento de siembra ya sea por pérdida de borde o por mortalidad. Se observa que a densidades mayores el crecimiento en ambas variables del árbol control y sus competidores es constante mostrando poca variabilidad, mientras que a densidades menores se contemplan individuos con gran desarrollo y otros con un crecimiento menor. El desarrollo del área de copa y de altura aun no es lo suficientemente grande y extensa para generar procesos de competencia por luz y espacio. No fue posible determinar con precisión los procesos de competencia a nivel radicular, sin embargo de acuerdo a la observación del crecimiento de los individuos este proceso aún no presenta riesgos para su óptimo desarrollo. Con esto, se afirma que los árboles a mayores densidades aún no presentan procesos de competencia, al contrario la presencia cercana de otros individuos ha permitido el crecimiento constante de todos los individuos.

7.9 Carbono total de la plantación

Haciendo uso del modelo de crecimiento Moiseev II, que presentó el mejor ajuste a la mayoría de las densidades de acuerdo al AIC (Tabla 4) y efectuando una relación diámetro - altura se determinó la cantidad de carbono en la plantación mediante la siguiente formula:

$$TC = a + b * \log_{10}(IndBiomasa) + c * \log_{10}^2(IndBiomasa) + d * \log_{20}^3(IndBiomasa)$$

A partir de esta fórmula se ordenaron las densidades de mayor a menor de acuerdo a la cantidad de carbono que almacenan, siendo la de mayor cantidad de carbono la densidad 7500 con un

promedio de 950,54 g de carbono, seguida de la 8750 con una diferencia mínima en comparación a las demás (901,11 g de C) y la de menor cantidad de carbono es la densidad 2500 (377,32 g de C), mostrando correlación con los resultados obtenidos por componente en las primeras dos densidades mencionadas (Tabla 17).

Tabla 17
Promedio total de carbono por densidad.

Densidades	Media TC
2500	377,32
5000	475,31
6250	498,68
7500	950,54
8750	901,11
10000	450,60

8. Discusión

Ferrere et. al (2005) encontró que los tratamientos con densidades mayores a 1800 plantas/ha presentan el menor crecimiento con diámetros de 12cm, mientras las densidades por debajo de 1000 plantas/ha poseen mejor crecimiento con hasta 22 cm; reflejando así las diferencias más significativa ($P < 0,001$) entre los tratamientos 761-1894 y 761-2083. La altura tuvo en general un comportamiento similar al diámetro, pues aumentó con la disminución de la densidad; aunque sin mostrar gran diferencia de crecimiento entre mayores y menores densidades.

Dalla Tea (1995) obtuvo para un ensayo implementado de *Eucalyptus grandis* en tres sitios distintos, que el dap aumentó con el mayor espaciamiento variando desde 11 cm hasta 22cm. Para la altura, solo se apreció variación significativa para la última medición en el sitio 1 correspondiente a un aumento de la altura con el mayor espaciamiento.

Evaluando el efecto de las densidades de siembra bajo espaciamientos de 9x9 y 6x6 m en diferentes especies, (Cunuhay, 2010) halló que no hay diferencias significativas entre las densidades pero sí entre especies; donde la *Tectona grandis* obtuvo el mayor crecimiento en altura bajo el segundo espaciamiento antes mencionado y el *Cyristax donnell smithii* Rose lo consiguió con el espaciamiento 9 x 9 m. El diámetro mostro diferencias significativas entre densidades y especies, siendo la distancia 9 x 9 m la que obtuvo el mayor, junto con la especie *Tectona grandis*.

Los crecimientos encontrados en la presente investigación difieren de los anteriormente citados. Así, para una densidad de 7500 plantas/ha, se hallaron un diámetro medio de 0,65 cm y una altura media de 50,5 cm. Al aumentar la densidad a 8750 plantas/ha, el diámetro fue de 0,82 cm y la altura de 59,9 cm. El comportamiento en general de estas variables tiende a ser de aumento en la medida en que se aumenta la densidad, pudiendo evidenciar las diferencias significativas ($P<0,001$) entre los tratamientos 8750-2500, 8750-6500 y 8750-5000.

9. Conclusiones y Recomendaciones

El espaciamiento empleado en este ensayo determinó una productividad diferencial en los tratamientos estudiados. La tendencia general fue aumentar el crecimiento en diámetro y altura a mayores densidades, aunque se manifiesta menos en la variable diámetro. Según las condiciones del ensayo, los mejores rendimientos se demostraron en las densidades 8750 y 7500. Además, se encontró poca diferenciación en la productividad de las densidades 2500, 6250 y 5000, por lo que empleando cualquiera de estas, se obtendrá los mismos rendimientos.

Los procesos de competencia en esta etapa de desarrollo de los individuos son casi nulos mediante modelos de densidad que utilizan las relaciones diámetros y alturas. Se recomienda su uso y determinación para una edad más madura de la plantación para indicar y planear el tiempo óptimo para efectuar aclareos que potencialicen el crecimiento de los individuos presentes en cada densidad. Sin embargo, el método de zona de influencia fue más efectiva para determinar esta interacción entre los individuos.

El método destructivo para la determinación de la biomasa contenida en plantaciones, rodales o bosques es realmente útil para observar la distribución de la biomasa y carbono en los diferentes componentes estructurales de los árboles, contenido que mostró ser mayor en el follaje y ramas que en los otros dos componentes.

El presente estudio se desarrolló con un esquema de fertilización que se limitó solo a las fases de vivero e instalación de la plantación, ya que se buscaba ver el rendimiento de esta especie con las condiciones propias del sitio en sus primeras etapas, pero se recomienda a partir del año y medio de instalada la plantación efectuar un plan de fertilización con el fin de ayudar a homogeneizar los individuos y maximizar su rendimiento en cada densidad.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, M., Carrillo, F., & Díaz, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792009000200003&script=sci_abstract&tlng=en
- Arias, D., & Camacho, P. (2004). Validación del Índice de Densidad del Rodal para el manejo de plantaciones forestales de *Tectona grandis* en el trópico. *Kurú: Revista Forestal*, 1(1), 1-9. Recuperado de http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/16408/mod_resource/content/1/Arias%20%20Camacho_2004.pdf
- Bolaños, Y., Bolaños, M., Paz, F., & Ponce, J. (2017). Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 73-86. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792017000100073
- Börner, Horst. (1960). Liberation of organic substances from higher plants and their role in the soil sickness problem. *The Botanical Review*, 26(3), 393-424. doi:10.1007/bf02860808
- Bravo, F., González, G. M., & Del Río, M. (1997). Índices de densidad de las masas forestales. *Ecología*(11), 177-187. Recuperado de http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/1997_Bravoetal_IndicesDensidad.pdf
- Callaway, R. (1995). Positive interactions among plants. *The Botanical Review*, 61(4), 306-349. doi:10.1007/bf02912621
- Cancino, J. (2012). Dendrometría básica. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente. Recuperado de http://repositorio.udec.cl/bitstream/handle/11594/407/Dendrometria_Basica.pdf?sequence=1
- Clutter, J., Fortson, J., Pienaar, L., Brister, G., & Bailey, R. (1983). Timber management: a quantitative approach. Nueva York, EE.UU: John Wiley & Sons, Inc. Recuperado de <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19840691762>
- Coetzee, J. (1991). The influence of stand density on the yield of *Eucalyptus grandis*: a comparison between a good site and a poor site at age 4 years. Paper presented at the Proceedings of an IUFRO Symposium: Intensive Forestry: The Role of Eucalypts.

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica mill*

- Corvalán, P., & Hernández, J. (2006). Densidad de rodal. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/74869411/4-DENSIDAD-DE-RODAL>
- Cuadras, C. (1981). Análisis multivariante. Recuperado de <http://www.ub.edu/stat/personal/cuadras/amcast.pdf>
- Cunuhay, P. S., Coronel, T. G. D., & Cruzatty, L. G. (2010). Efecto de la densidad de plantación en el crecimiento de cuatros especies forestales tropicales. *Ciencia y Tecnología*, 3(1), 23-26. Recuperado de http://www.uteq.edu.ec/revistacyt/publico/archivos/C1_4n12010.pdf
- Curtis, R. O. (1970). Stand density measures: an interpretation. *Forest Science*, 16(4), 403-414. Recuperado de <https://cmapspublic3.ihmc.us/rid=1N4TSMV32-WWCXX1-14QR/Stand%20density%20measures-%20an%20interpretation.pdf>
- Chaves, E., & Fonseca, W. (1991). Ciprés: *Cupressus lusitanica* Mill.: especie de árbol de uso múltiple en América Central. Turrialba, Costa Rica: CATIE. Recuperado de [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=GuP8Av8MPzMC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Chaves,+E.,+%26+Fonseca,+W.+\(1991\).+Ciprés:+Cupressus+lusitanica+Mill.:+especie+de+árbol+de+uso+múltiple+en+América+Central&ots=NKEBtB924D&sig=n43mWLBdZnarA48PwCrRsD7X0mo&redir_esc=y#v=onepage&q=Chaves%2C%20E.%2C%20%26%20Fonseca%2C%20W.%20\(1991\).%20Ciprés%3A%20Cupressus%20lusitanica%20Mill.%3A%20especie%20de%20árbol%20de%20uso%20múltiple%20en%20América%20Central&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=GuP8Av8MPzMC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Chaves,+E.,+%26+Fonseca,+W.+(1991).+Ciprés:+Cupressus+lusitanica+Mill.:+especie+de+árbol+de+uso+múltiple+en+América+Central&ots=NKEBtB924D&sig=n43mWLBdZnarA48PwCrRsD7X0mo&redir_esc=y#v=onepage&q=Chaves%2C%20E.%2C%20%26%20Fonseca%2C%20W.%20(1991).%20Ciprés%3A%20Cupressus%20lusitanica%20Mill.%3A%20especie%20de%20árbol%20de%20uso%20múltiple%20en%20América%20Central&f=false)
- Chinchilla, O., Chaves, E., & Mora, F. (2011). Comparación de crecimientos bajo diferentes intensidades de manejo en plantaciones de ciprés (*Cupressus lusitanica* Miller) en dos sitios de Costa Rica. *Revista Baracoa*, 30, 1-19. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Fernando_Mora8/publication/318659150_COMPARACION_DE_CRECIMIENTOS_BAJO_DIFERENTES_INTENSIDADES_DE_MANEJO_EN_PLANTACIONES_DE_CIPRES_Cupressus_lusitanica_Miller_EN_DOS_SITIOS_DE_COSTA_RICA/links/597603fba6fdcc8348a414ec/COMPARACION-DE-CRECIMIENTOS-BAJO-DIFERENTES-INTENSIDADES-DE-MANEJO-EN-PLANTACIONES-DE-CIPRES-Cupressus-lusitanica-Miller-EN-DOS-SITIOS-DE-COSTA-RICA.pdf
- Dalla Tea, F. (1995). Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus grandis* en Entre Ríos, Argentina. *Forest Systems*, 4(1), 57-71. Recuperado de <https://recyt.fecyt.es/index.php/IA/article/view/4851/4130>
- Dean, T. J., & Baldwin Jr, V. C. (1996). Growth in loblolly pine plantations as a function of stand density and canopy properties. *Forest Ecology and Management*, 82(1-3), 49-58. doi:10.1016/0378-1127(95)03694-6

- Díaz, R., Acosta, M., Carrillo, F., Buendía, E., Flores, E., & Etchevers, J. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y bosques*, 13(1), 25-34. doi:10.21829/myb.2007.1311233
- Alcaldía Municipal-Málaga. (2015). Revision excepcional del esquema de ordenamiento territorial del municipio de Málaga- Santander. Málaga, Colombia: Alcaldía Municipal.
- Ferrere, P., López, G., Boca, R., Galetti, M.A., Esparrach, C., & Pathauer, P. (2005). Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus globulus* en un ensayo Nelder modificado. *Invest Agrar: Sist. Recur. For*, 14(2), 174-184. Recuperado de [http://www.inia.es/GCONTREC/PUB/174-184-\(61_04\)-Efecto_1162281329671.pdf](http://www.inia.es/GCONTREC/PUB/174-184-(61_04)-Efecto_1162281329671.pdf)
- Imaña, J., & Encinas, O. (2008). Epidometria forestal. Recuperado de http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/9740/1/LIVRO_EpidometriaForestal.pdf
- Kiviste, A., González, J., Alboreca, A., & González, A. (2002). Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/JG_Alvarez_Gonzalez/publication/305473874_Funciones_de_crecimiento_de_aplicacion_en_el_ambito_forestal/links/59ad673ba6fdcce55a414f8e/Funciones-de-crecimiento-de-aplicacion-en-el-ambito-forestal.pdf
- Liliehholm, Robert J, Kessler, Winifred B, & Merrill, Karren. (1993). Stand density index applied to timber and goshawk habitat objectives in Douglas-fir. *Environmental Management*, 17(6), 773-779. doi:10.1007 / BF02393898
- Long, J. N. (1985). A practical approach to density management. *The Forestry Chronicle*, 61(1), 23-27. Recuperado de <https://pubs.cif-ifc.org/doi/pdf/10.5558/tfc61023-1>
- MacDicken, K., Jonsson, Ö., Piña, L., Maulo, S., Contessa, V., Adikari, Y., . . . D'Annunzio, R. (2016). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015: cómo están cambiando los bosques del mundo?. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i4793s.pdf>
- Maldonado, H., & Castro, D. (2017). Levantamiento Planimetrico, Altimétrico y Realización del Trazado de la Vía de Acceso a la Finca de la Universidad Industrial de Santander, Sede Málaga (Campamento). Universidad Industrial de Santander, Málaga, Colombia.
- Martí, B. V. (2006). Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. *Revista Ecosistemas*, 15(1). Recuperado de <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/519>
- Martinez, D., Albin, J., Cabaleiro, J., Pena, T., Rivera, F., & Blanco, V. (2009). El Criterio de Información de Akaike en la Obtención de Modelos Estadísticos de Rendimiento. Paper presented at the Conference: XX Jornadas de Paralelismo. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Tomas_Pena/publication/236279245_El_criterio_de_informacion_de_Akaike_en_la_obtencion_de_modelos_estadisticos_de_Rendimiento/li

nks/58904f334585157323404fd4/El-criterio-de-informacion-de-Akaike-en-la-obtencion-de-modelos-estadisticos-de-Rendimiento.pdf

- Mexal, J. G., & Landis, T. D. (1990). Target seedling concepts: height and diameter. In *Proceedings, western Forest nursery association* (pp. 13-17). Recuperado de <https://rngr.net/publications/proceedings/1990/mexal.pdf>
- Moreno, E. (2010). Avaluo Comercial Rural, Predios Universidad Industrial de Santander, Vereda Pesacaderito (Campamento). Universidad Industrial de Santander, Málaga, Colombia.
- Munro, D. D. (1974). Forest growth models-a prognosis. In *Growth models for tree and stand simulation*, 30,(7-21).
- Murillo, A. (1983). Relación entre factores edáficos e índice de sitio para *Cupressus lusitanica* (Mill.) en el Valle Central, Costa Rica (Tesis de pregrado). Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Nelder, J. A. (1962). New kinds of systematic designs for spacing experiments. *Biometrics*, 18(3), 283-307. doi:10.2307/2527473
- Parrott, D., Brinks, J., & Lhotka, J. (2012). Designing Nelder wheel plots for tree density experiments. *New forests*, 43(2), 245-254. Recuperado de https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/18400/serc_fulltext_5.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pérez, G., Domínguez, M., Martínez, P., & Etchevers, J. (2012). Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y bosques*, 18(1), 7-24. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712012000100002&script=sci_arttext
- Quiroz, I., García, E., González, M., Chung, P., & Soto, H. (2017). Vivero forestal: producción de plantas nativas. Recuperado de <https://rngr.net/publications/vivero-forestal-produccion-de-plantas-nativas-a-raiz-cubierta/vivero-forestal-produccion-de-plantas-nativas-a-raiz-cubierta-completo>
- Reineke, L. (1933). Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*, 48(7), 627-638. Recuperado de <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968212/PDF>
- Rodríguez, J., & Ramírez, M. (2008). Modelación de carbono aérea y subterráneo de *Tectona grandis* y *Pinus patula* del Neotrópico (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2000). Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Recuperado de https://www.uach.cl/procarbono/pdf/manuales/guia_destructivo.pdf

- Schulze, E., Wirth, C., & Heimann, M. (2000). Managing forests after Kyoto. *Science*, 289(5487), 2058-2059. doi:0.1126/science.289.5487.2058
- Sixto, H., Hernández, M.J., Barrio, M., Carrasco, J., & Cañellas, I. (2007). Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 16(3), 277-294. Recuperado de http://www.inia.es/GCONTREC/PUB/277-294-Plantaciones_1200655086640.pdf
- Taboada, M., Anta, M., Varela, J., & González, J. (2003). Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For*, 12(2), 25-35. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Jose_Gorgoso-Varela/publication/311844875_Influencia_de_la_competencia_en_el_crecimiento_en_seccion_en_Pinus_radiata_D_Don/links/585d07e508ae6eb8719fd250/Influencia-de-la-competencia-en-el-crecimiento-en-seccion-en-Pinus-radiata-D-Don.pdf
- Tang, S., Meng, C. H., Meng, F. R., & Wang, Y. H. (1994). A growth and self-thinning model for pure even-age stands: theory and applications. *Forest Ecology and Management*, 70(1-3), 67-73. doi:10.1016/0378-1127(94)90075-2
- Torres, S., & Vásquez, W. (1985). El diseño sistemático Nelder en la investigación forestal. Recuperado de <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6156/A7112e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Trepl, L. (1994). Competition and coexistence: on the historical background in ecology and the influence of economy and social sciences. *Ecological Modelling*, 75, 99-110. doi:10.1016/0304-3800(94)90010-8
- Tschinkel, H. (1972). Factores limitantes del crecimiento de plantaciones de *Cupressus lusitanica* en Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 27(2), 3-55. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/29961/30221>
- Villalpando, J., Morales, A., Guzmán, M., Sánchez, G., & Saavedra, M. (2001). Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, HSU y Bechhofer para selección de medias. *Agrociencia*, 35(1), 79-86. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/302/30235107.pdf>
- Villardón, J. (2007). Introducción al análisis de clúster. Recuperado de <http://benjamindespensa.tripod.com/spss/AC.pdf>
- Weih, M. (2004). Intensive short rotation forestry in boreal climates: present and future perspectives. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(7), 1369-1378. doi:10.1139/x04-090

Apéndices

Apéndice 1. Comparación de las densidades por el método Tukey para la variable diámetro.

Densidad	diff	lwr	Upr	p adj
TTR_2500-TTR_10000	-0,11	-0,4018	0,1785	0,8763
TTR_5000-TTR_10000	-0,17	-0,45	0,11	0,49
TTR_6250-TTR_10000	-0,12	-0,41	0,16	0,81
TTR_7500-TTR_10000	0,03	-0,25	0,33	0,99
TTR_8750-TTR_10000	0,20	-0,11	0,52	0,40
TTR_5000-TTR_2500	-0,06	-0,26	0,13	0,95
TTR_6250-TTR_2500	-0,01	-0,22	0,19	0,99
TTR_7500-TTR_2500	0,14	-0,07	0,36	0,36
TTR_8750-TTR_2500	0,32	0,07	0,57	0,003
TTR_6250-TTR_5000	0,04	-0,15	0,24	0,98
TTR_7500-TTR_5000	0,21	0,001	0,42	0,04
TTR_8750-TTR_5000	0,38	0,14	0,62	0,001
TTR_7500-TTR_6250	0,16	-0,05	0,38	0,26
TTR_8750-TTR_6250	0,33	0,08	0,58	0,002
TTR_8750-TTR_7500	0,17	-0,08	0,42	0,39

Apéndice 2. Comparación de las densidades por el método Tukey para la variable altura.

Densidad	diff	lwr	Upr	p adj
TTR_2500-TTR_10000	-6,64	-34,88022	21,58770	0,98395
TTR_5000-TTR_10000	-10,30	-37,85	17,23	0,88
TTR_6250-TTR_10000	-8,28	-36,40	19,83	0,95
TTR_7500-TTR_10000	7,51	-21,41	36,45	0,97
TTR_8750-TTR_10000	16,89	-14,23	48,02	0,62
TTR_5000-TTR_2500	-3,66	-23,13	15,80	0,99
TTR_6250-TTR_2500	-1,63	-21,91	18,63	0,99
TTR_7500-TTR_2500	14,16	-7,22	35,55	0,39
TTR_8750-TTR_2500	23,53	-0,73	47,81	0,06
TTR_6250-TTR_5000	2,024	-17,27	21,32	0,99
TTR_7500-TTR_5000	17,82	-2,64	38,30	0,12
TTR_8750-TTR_5000	27,20	3,72	50,67	0,01
TTR_7500-TTR_6250	15,80	-5,43	37,04	0,26
TTR_8750-TTR_6250	25,17	1,03	49,32	0,03
TTR_8750-TTR_7500	9,37	-15,71	34,46	0,88

Apéndice 3. Comparación de las densidades por el método Tukey para la variable índice de biomasa.

Densidad	diff	lwr	upr	p adj
TTR_2500-TTR_10000	-12,25	-81,92734	57,42528	0,99582
TTR_5000-TTR_10000	-18,19	-86,17	49,77	0,97
TTR_6250-TTR_10000	-18,74	-88,13	50,64	0,97
TTR_7500-TTR_10000	17,20	-54,20	88,61	0,98
TTR_8750-TTR_10000	76,76	-0,06	153,58	0,05
TTR_5000-TTR_2500	-5,94	-53,99	42,10	0,99
TTR_6250-TTR_2500	-6,49	-56,52	43,54	0,99
TTR_7500-TTR_2500	29,45	-23,33	82,25	0,59
TTR_8750-TTR_2500	89,01	29,09	148,92	0,004
TTR_6250-TTR_5000	-0,54	-48,17	47,08	1,00
TTR_7500-TTR_5000	35,40	-15,12	85,93	0,33
TTR_8750-TTR_5000	94,95	37,02	152,88	0,07
TTR_7500-TTR_6250	35,94	-16,47	88,36	0,35
TTR_8750-TTR_6250	95,50	35,91	155,08	0,001
TTR_8750-TTR_7500	59,55	-2,37	121,47	0,06

Apéndice 4. Comparación de las densidades por el método Tukey para la variable área de copa.

Densidad	diff	Lwr	Upr	p adj
TTR_2500-TTR_10000	-132,90	-769,80954	504,00320	0,99072
TTR_5000-TTR_10000	-159,25	-780,60	462,09	0,97
TTR_6250-TTR_10000	-164,04	-798,34	470,24	0,97
TTR_7500-TTR_10000	10,83	-641,91	663,58	1,00
TTR_8750-TTR_10000	675,74	-26,49	1377,98	0,06
TTR_5000-TTR_2500	-26,35	-465,56	412,86	0,99
TTR_6250-TTR_2500	-31,14	-488,48	426,19	0,99
TTR_7500-TTR_2500	143,73	-338,87	626,34	0,95
TTR_8750-TTR_2500	808,64	260,94	1356,34	0,005
TTR_6250-TTR_5000	-4,79	-440,21	430,62	1,00
TTR_7500-TTR_5000	170,08	-291,80	631,97	0,89
TTR_8750-TTR_5000	834,99	305,46	1364,52	0,001
TTR_7500-TTR_6250	174,87	-304,28	654,03	0,89
TTR_8750-TTR_6250	839,78	295,12	1384,45	0,002
TTR_8750-TTR_7500	664,91	98,86	1230,95	0,01

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica* mill

Apéndice 5. Plántulas en la fase de vivero.



Apéndice 6. Fertilización de las plántulas con Raizal.



Apéndice 7. Diseño y distribución de las densidades de siembra.

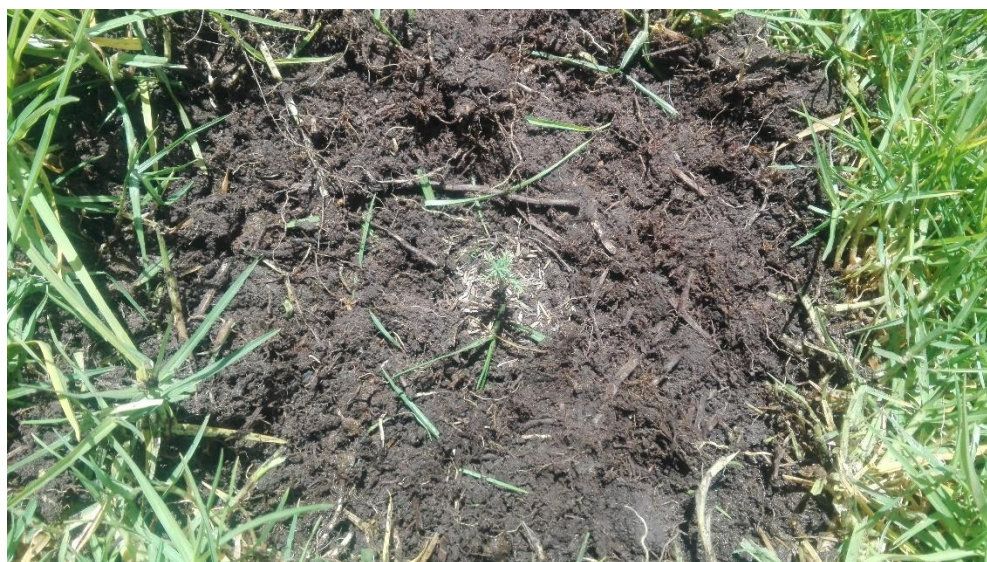


PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica* mill

Apéndice 8. Limpieza y fumigación de gramíneas.



Apéndice 9. Siembra de las plántulas.



PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica* mill

Apéndice 10. Medición de las variables dac y altura.



Apéndice 11. Control y corte de gramíneas.



PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica* mill

Apéndice 12. Corte de los arboles muestra.



Apéndice 13. Proceso de pesado en húmedo de las muestras.



Apéndice 14. Proceso de secado de las muestras.



Apéndice 15. Determinación del pesado en seco de las muestras.



Apéndice 16. Comandos de la prueba de Tukey en el programa estadístico Tinn-R.

```
#=====#
# Autor   : Eddy Y Juan Carlos
# Director: J. Andrés Rodríguez Toro, Ph.D.
# Fecha   : Julio/2019
#=====#
```

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica mill*

```

#=====#
# Importar base de datos
#=====#
library(readxl)
library(dplyr)
Cupressus <- read_excel("C:/Users/HENRY/Desktop/Datos Tesis/2019-07 (Jul)-05 Base de
Datos Tukey.xlsx", sheet = 1, col_names = TRUE, col_types = NULL, na = "", skip = 0)
View(Cupressus)

summary(aov(dac~Densidad,Cupressus))
TukeyHSD(aov(dac~Densidad,Cupressus))

summary(aov(Ht~Densidad,Cupressus))
TukeyHSD(aov(Ht~Densidad,Cupressus))

summary(aov(IndBiomasa~Densidad,Cupressus))
TukeyHSD(aov(IndBiomasa~Densidad,Cupressus))

summary(aov(AreaCopa~Densidad,Cupressus))
TukeyHSD(aov(AreaCopa~Densidad,Cupressus))

#=====#
#Dividir en grupos
#=====#
install.packages(c("agricolae"))
library(agricolae)
model <- aov(dac~Densidad,Cupressus)
out <- HSD.test(model,"Densidad", group=TRUE,console=TRUE,)
plot(out)

library(agricolae)
model <- aov(Ht~Densidad,Cupressus)
out <- HSD.test(model,"Densidad", group=TRUE,console=TRUE,)
plot(out)

library(agricolae)
model <- aov(IndBiomasa~Densidad,Cupressus)
out <- HSD.test(model,"Densidad", group=TRUE,console=TRUE,)
plot(out)

library(agricolae)
model <- aov(AreaCopa~Densidad,Cupressus)
out <- HSD.test(model,"Densidad", group=TRUE,console=TRUE,)
plot(out)
#=====#

```

Apéndice 17. Comandos del método de Ward en el programa estadístico Tinn-R.

```

#=====
# Autor   : Eddy & Juan Carlos
# Director: J. Andrés Rodríguez Toro, PhD.
# Fecha   : Julio/2019
#=====

#=====
# Importar base de datos directamente desde Excel
#=====
library(readxl)
library(dplyr)
Cupressus = read_excel("C:/Users/HENRY/Desktop/Datos Tesis/Multivariado.xlsx")
head(Cupressus)
View(Cupressus)

#=====
# Importar la densidad 10000
#=====
Cupressus _10000=subset(f00, Densidad == 10000)
View(Cupressus _10000)

#=====
# Método de ward utilizando la distancia euclidean
#=====
library(cluster)
library(purrr)
dm1 <- dist(Cupressus _10000 [, c("dac", "Ht", "IndBiomasa")])
dm1
ward <- hclust(dm1, method ="ward.D2")
ward
plot(ward <- hclust(dm1, method ="ward.D2"))

#=====
# Importar la densidad 2500
#=====

Cupressus _2500=subset(f00, Densidad == 2500)
View(Cupressus _2500)

#=====
# Método de ward utilizando la distancia euclidean
#=====
library(cluster)

```

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica* mill

```
library(purrr)
dm1 <- dist(Cupressus _2500 [, c("dac", "Ht", "IndBiomasa")])
dm1
ward <- hclust(dm1, method ="ward.D2")
ward
plot(ward <- hclust(dm1, method ="ward.D2"))
```

Apéndice 18. Comandos de los modelos no lineales más representativos para esta plantación en el programa estadístico Tinn-R.

```
#=====
# Autor   : Eddy & Juan Carlos
# Director: J. Andrés Rodríguez Toro, Ph.D.
# Fecha   : Julio/2019
#=====

#=====
# Importar base de datos directamente desde Excel
#=====
library(readxl)
f00 <- read_excel("D:/JSK/Dcts/TESIS/Modelos/Base/2019-05 (Mayo)-22 Base de Datos.xlsx",
sheet = 1, col_names = TRUE, col_types = NULL, na = "", skip = 0)
View(f00)
summary(f00)

#=====
# Crear las bases de datos por Especie & Densidad
#=====
Cupressus_2500 <- subset(f00, Densidad == 2500)
View(Cupressus_2500)
Cupressus_5000 <- subset(f00, Densidad == 5000)
View(Cupressus_5000)
Cupressus_6250 <- subset(f00, Densidad == 6250)
View(Cupressus_6250)
Cupressus_7500 <- subset(f00, Densidad == 7500)
View(Cupressus_7500)
Cupressus_8750 <- subset(f00, Densidad == 8750)
View(Cupressus_8750)
Cupressus_10000 <- subset(f00, Densidad == 10000)
View(Cupressus_10000)

#=====
# Regresión no lineal Hossfeld I (mod)
#=====
Hossfeld <- Ht~dac^2/(a+b*dac)^2
```

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica* mill

```

nlsCupressus_2500 <- nls(Hossfeld, data=Cupressus_2500, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_2500)
nlsCupressus_5000 <- nls(Hossfeld, data=Cupressus_5000, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_5000)
nlsCupressus_6250 <- nls(Hossfeld, data=Cupressus_6250, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_6250)
nlsCupressus_7500 <- nls(Hossfeld, data=Cupressus_7500, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_7500)
nlsCupressus_8750 <- nls(Hossfeld, data=Cupressus_8750, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_8750)
nlsCupressus_10000 <- nls(Hossfeld, data=Cupressus_10000, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_10000)

```

```

(c(AIC(nlsCupressus_2500),AIC(nlsCupressus_5000),AIC(nlsCupressus_6250),AIC(nlsCupressus_7500),AIC(nlsCupressus_8750),AIC(nlsCupressus_10000)))

```

```

#=====
#Lineal Logaritmica
#=====

```

```

lnlog<- Ht~(a+b*log(dac))
nlsCupressus_2500 <- nls(lnlog, data=Cupressus_2500, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_2500)
nlsCupressus_5000 <- nls(lnlog, data=Cupressus_5000, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_5000)
nlsCupressus_6250 <- nls(lnlog, data=Cupressus_6250, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_6250)
nlsCupressus_7500 <- nls(lnlog, data=Cupressus_7500, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_7500)
nlsCupressus_8750 <- nls(lnlog, data=Cupressus_8750, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_8750)
nlsCupressus_10000 <- nls(lnlog, data=Cupressus_10000, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_10000)

```

```

(c(AIC(nlsCupressus_2500),AIC(nlsCupressus_5000),AIC(nlsCupressus_6250),AIC(nlsCupressus_7500),AIC(nlsCupressus_8750),AIC(nlsCupressus_10000)))

```

```

#=====
#Moiseev I
#=====

```

```

moiseevI <- Ht~(a+b*log10(dac)+d*(log10(dac)*log10(dac)))
nlsCupressus_2500 <- nls(moiseevI, data=Cupressus_2500, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1))
summary(nlsCupressus_2500)
nlsCupressus_5000 <- nls(moiseevI, data=Cupressus_5000, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1))
summary(nlsCupressus_5000)
nlsCupressus_6250 <- nls(moiseevI, data=Cupressus_6250, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1))

```

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica mill*

```

summary(nlsCupressus_6250)
nlsCupressus_7500 <- nls(moiseevI, data=Cupressus_7500, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1))
summary(nlsCupressus_7500)
nlsCupressus_8750 <- nls(moiseevI, data=Cupressus_8750, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1))
summary(nlsCupressus_8750)
nlsCupressus_10000 <- nls(moiseevI, data=Cupressus_10000, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1))
summary(nlsCupressus_10000)

(c(AIC(nlsCupressus_2500),AIC(nlsCupressus_5000),AIC(nlsCupressus_6250),AIC(nlsCupressus_7500),AIC(nlsCupressus_8750),AIC(nlsCupressus_10000)))

#=====
#Moiseev II
#=====
moiseevII <-
Ht~(a+b*log10(dac)+d*(log10(dac)*log10(dac))+e*(log10(dac)*log10(dac)*log10(dac)))
nlsCupressus_2500 <- nls(moiseevII, data=Cupressus_2500, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1, e=0.1))
summary(nlsCupressus_2500)
nlsCupressus_5000 <- nls(moiseevII, data=Cupressus_5000, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1, e=0.1))
summary(nlsCupressus_5000)
nlsCupressus_6250 <- nls(moiseevII, data=Cupressus_6250, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1, e=0.1))
summary(nlsCupressus_6250)
nlsCupressus_7500 <- nls(moiseevII, data=Cupressus_7500, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1, e=0.1))
summary(nlsCupressus_7500)
nlsCupressus_8750 <- nls(moiseevII, data=Cupressus_8750, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1, e=0.1))
summary(nlsCupressus_8750)
nlsCupressus_10000 <- nls(moiseevII, data=Cupressus_10000, start=list(a=0.1, b=0.1, d=0.1, e=0.1))
summary(nlsCupressus_10000)

(c(AIC(nlsCupressus_2500),AIC(nlsCupressus_5000),AIC(nlsCupressus_6250),AIC(nlsCupressus_7500),AIC(nlsCupressus_8750),AIC(nlsCupressus_10000)))

#=====
#Strand
#=====
strand <- Ht~(dac/(a+b*dac))^3
nlsCupressus_2500 <- nls(strand, data=Cupressus_2500, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_2500)
nlsCupressus_5000 <- nls(strand, data=Cupressus_5000, start=list(a=0.1, b=0.1))

```

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica* mill

```

summary(nlsCupressus_5000)
nlsCupressus_6250 <- nls(strand, data=Cupressus_6250, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_6250)
nlsCupressus_7500 <- nls(strand, data=Cupressus_7500, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_7500)
nlsCupressus_8750 <- nls(strand, data=Cupressus_8750, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_8750)
nlsCupressus_10000 <- nls(strand, data=Cupressus_10000, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_10000)

(c(AIC(nlsCupressus_2500),AIC(nlsCupressus_5000),AIC(nlsCupressus_6250),AIC(nlsCupressus_7500),AIC(nlsCupressus_8750),AIC(nlsCupressus_10000)))

#=====
#Terazaki
#=====
terazaki <- Ht~ exp(a-(b/dac))
nlsCupressus_2500 <- nls(terazaki, data=Cupressus_2500, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_2500)
nlsCupressus_5000 <- nls(terazaki, data=Cupressus_5000, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_5000)
nlsCupressus_6250 <- nls(terazaki, data=Cupressus_6250, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_6250)
nlsCupressus_7500 <- nls(terazaki, data=Cupressus_7500, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_7500)
nlsCupressus_8750 <- nls(terazaki, data=Cupressus_8750, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_8750)
nlsCupressus_10000 <- nls(terazaki, data=Cupressus_10000, start=list(a=0.1, b=0.1))
summary(nlsCupressus_10000)

(c(AIC(nlsCupressus_2500),AIC(nlsCupressus_5000),AIC(nlsCupressus_6250),AIC(nlsCupressus_7500),AIC(nlsCupressus_8750),AIC(nlsCupressus_10000)))

```

Apéndice 19. Ficha de descripción de los modelos de regresión no lineal

Nº de Grupo y orden. Nombre (Fecha de publicación)

- ❶ *Expresión matemática, restricciones de los parámetros y ámbito de aplicación*
- ❷ *Crecimiento corriente (primera derivada)*
- ❸ *Crecimiento medio. Edad a la que se igualan el crecimiento medio y el corriente*
- ❹ *Valores en el origen de la función y su primera derivada*
- ❺ *Puntos de corte de la función*
- ❻ *Asíntota horizontal*
- ❼ *Máximo de la función*
- ❽ *Punto de inflexión*
- ❾ *Expresión del modelo en forma lineal*
- ❿ *Relación entre la primera derivada y la función*
- ⓫ *Derivadas parciales con respecto a los parámetros*
- ⓬ *Grupo de la clasificación de Shvets y Zeide (1996) al que pertenece el modelo y su descomposición*

Apéndice 20. Características del modelo Lineal logarítmico.

1.2 LINEAL LOGARÍTMICA

1.	$y = a + b \ln(t) \quad a < 0 \quad b > 0 \quad \{\forall t > 0\}$
2.	$C.C. = y' = \frac{b}{t}$
3.	$C.M. = \frac{y}{t} = \frac{a + b \ln(t)}{t} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow t = e^{\frac{b-a}{b}}$
4.	$\lim_{t \rightarrow 0+} y = -\infty \quad \lim_{t \rightarrow 0+} y' = \infty$
5.	Pto. Corte Eje X: $\left(e^{\frac{-a}{b}}, 0 \right)$ No existe punto de corte con el Eje Y
6.	$\lim_{t \rightarrow \infty} y = \infty$
7.	Función estrictamente creciente, $y < 0$ para $t < e^{\frac{-a}{b}}$
8.	No existen puntos de inflexión
9.	El modelo es lineal en los parámetros
10.	$y' = b e^{\frac{a-y}{b}}$
11.	$\frac{\partial y}{\partial a} = 1 \quad \frac{\partial y}{\partial b} = \ln(t)$
12.	El modelo no pertenece a ninguno de los dos grupos de la clasificación

Apéndice 21. Características del modelo Moiseev I.

1.7 MOISEEV I (1970) Citado en Kiviste (1988)

1.	$y = a + b\text{Log}(t) + c\text{Log}^2(t) \quad \{\forall t > 0\}$
2.	$C.C. = y' = \frac{b}{t\text{Ln}(10)} + \frac{2c\text{Ln}(t)}{t\text{Ln}^2(10)}$
3.	$C.M. = \frac{y}{t} = \frac{a + b\text{Log}(t) + c\text{Log}^2(t)}{t}$ $C.M. = C.C. \Rightarrow b\text{Ln}(10) - a\text{Ln}^2(10) + \text{Ln}(t)[2c - b\text{Ln}(10)] - c\text{Ln}^2(t) = 0$
4.	$\lim_{t \rightarrow 0^+} y = \begin{cases} +\infty & \text{si } c > 0 \\ -\infty & \text{si } c < 0 \end{cases} \quad \lim_{t \rightarrow 0^+} y' = \begin{cases} -\infty & \text{si } c > 0 \\ +\infty & \text{si } c < 0 \end{cases}$
5.	Pto. Corte Eje X: $\left(10^{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c}}, 0 \right)$ No existe punto de corte con el Eje Y
6.	$\lim_{t \rightarrow \infty} y = \begin{cases} +\infty & \text{si } c > 0 \\ -\infty & \text{si } c < 0 \end{cases}$
7.	$t_{\max} = e^{\frac{-b\text{Ln}(10)}{2c}}$
8.	$t_{\text{pto.infl.}} = e^{\frac{1 - b\text{Ln}(10)}{2c}}$
9.	El modelo es lineal en los parámetros
10.	No es posible relacionar la primera derivada exclusivamente con la primitiva
11.	$\frac{\partial y}{\partial a} = 1 \quad \frac{\partial y}{\partial b} = \text{Log}(t) \quad \frac{\partial y}{\partial c} = \text{Log}^2(t)$
12.	El modelo no pertenece a ninguno de los dos grupos de la clasificación

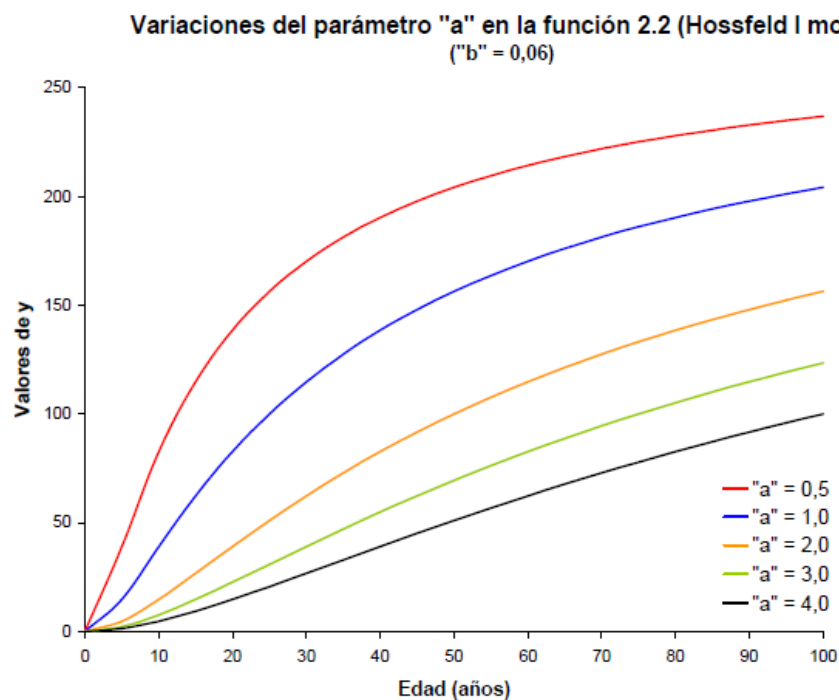
Apéndice 22. Características del modelo Moiseev II.

1.8 MOISEEV _I II (1971) Citado en Kiviste (1988)	
1.	$y = a + b\text{Log}(t) + c\text{Log}^2(t) + d\text{Log}^3(t) \quad \{\forall t > 0\}$
2.	$C.C. = y' = \frac{b}{t\text{Ln}(10)} + \frac{2c\text{Ln}(t)}{t\text{Ln}^2(10)} + \frac{3d\text{Ln}^2(t)}{t\text{Ln}^3(10)}$
3.	$C.M. = \frac{y}{t} = \frac{a + b\text{Log}(t) + c\text{Log}^2(t) + d\text{Log}^3(t)}{t}$ $C.M. = C.C. \Rightarrow b\text{Ln}^2(10) - a\text{Ln}^3(10) + \text{Ln}(t)[2c\text{Ln}(10) - b\text{Ln}^2(10)] +$ $+ \text{Ln}^2(t)[3d - c\text{Ln}(10)] - d\text{Ln}^3(t) = 0$
4.	$\lim_{t \rightarrow 0^+} y = \begin{cases} -\infty & \text{si } d > 0 \\ +\infty & \text{si } d < 0 \end{cases} \quad \lim_{t \rightarrow 0^+} y' = \begin{cases} +\infty & \text{si } d > 0 \\ -\infty & \text{si } d < 0 \end{cases}$
5.	Pto. Corte Eje X: $(a + b\text{Log}(t) + c\text{Log}^2(t) + d\text{Log}^3(t) = 0, 0)$ No existe punto de corte con el Eje Y
6.	$\lim_{t \rightarrow \infty} y = \begin{cases} +\infty & \text{si } d > 0 \\ -\infty & \text{si } d < 0 \end{cases}$
7.	$t_{\max} = e^{\frac{\text{Ln}(10) \left[-c \pm \sqrt{c^2 - 3bd} \right]}{3d}}$
8.	$t_{\text{pto.infl.}} = e^{1 - \frac{c\text{Ln}(10)}{3d} \pm \sqrt{1 + \left[\frac{c\text{Ln}(10)}{3d} \right]^2 - \frac{b\text{Ln}^2(10)}{3d}}}$
9.	El modelo es lineal en los parámetros
10.	No es posible relacionar la primera derivada exclusivamente con la primitiva
11.	$\frac{\partial y}{\partial a} = 1 \quad \frac{\partial y}{\partial b} = \text{Log}(t) \quad \frac{\partial y}{\partial c} = \text{Log}^2(t) \quad \frac{\partial y}{\partial d} = \text{Log}^3(t)$
12.	El modelo no pertenece a ninguno de los dos grupos de la clasificación

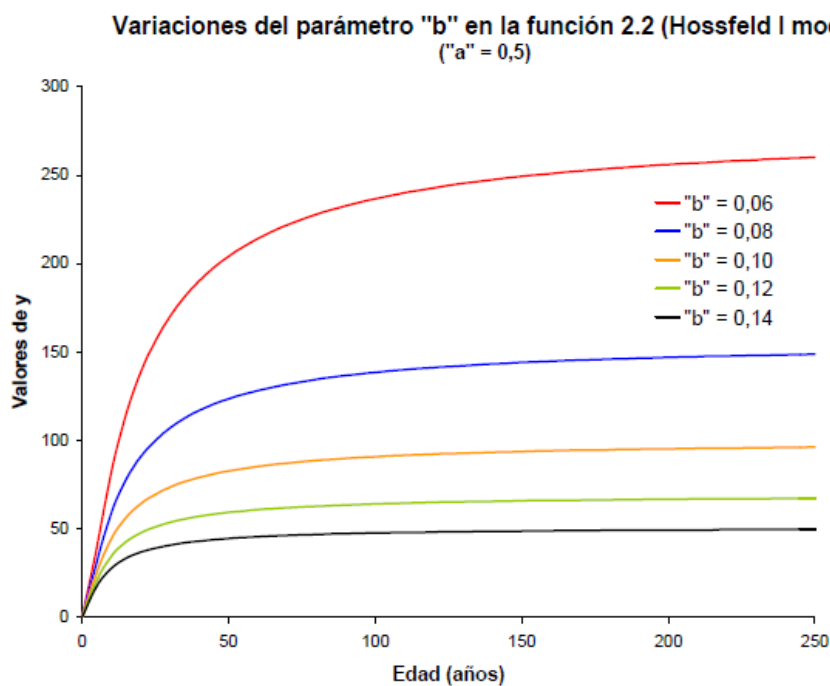
Apéndice 23. Características de modelos Hossfeld I modificado.

2.2 HOSSFELD I (Modificado)	
1.	$y = \frac{t^2}{(a+bt)^2} \quad a > 0 \quad \left\{ \forall t \geq 0 / t \neq \frac{-a}{b} \right\}$
2.	$C.C. = y' = \frac{2at}{(a+bt)^3}$
3.	$C.M. = \frac{y}{t} = \frac{t}{(a+bt)^2} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow t = \frac{a}{b}$
4.	$y(0) = 0 \quad y'(0) = 0$
5.	Pto. Corte Eje X: (0,0) Pto. Corte Eje Y: (0,0)
6.	$\lim_{t \rightarrow \infty} y = \frac{1}{b^2}$
7.	Función estrictamente creciente
8.	$t_{pto. \text{ inf. }} = \frac{a}{2b}$
9.	Expresión lineal del modelo: $\frac{1}{\sqrt{y}} = \frac{a}{t} + b$
10.	$y' = \frac{2\sqrt{y}(1-b\sqrt{y})^2}{a}$
11.	$\frac{\partial y}{\partial a} = \frac{-2t^2}{(a+bt)^3} \quad \frac{\partial y}{\partial b} = \frac{-2t^3}{(a+bt)^3}$
12.	El modelo pertenece al grupo de los potenciales (PD) $\ln(y') = k + \frac{3}{2}\ln(y) - 2\ln(t) \Rightarrow y' = k_1 y^{\frac{3}{2}} t^{-2} \quad \text{con } k = \ln(2a); k_1 = 2a$ Término de Crecimiento: $2ay^{\frac{3}{2}}$ Término de Decrecimiento: t^2

Apéndice 24. Variaciones en los parámetros del modelo Hossfeld I modificado.



El parámetro "a" afecta a la edad a la que se alcanza el punto de inflexión del modelo, de modo que un aumento del valor de "a" provoca un aumento de dicha edad.

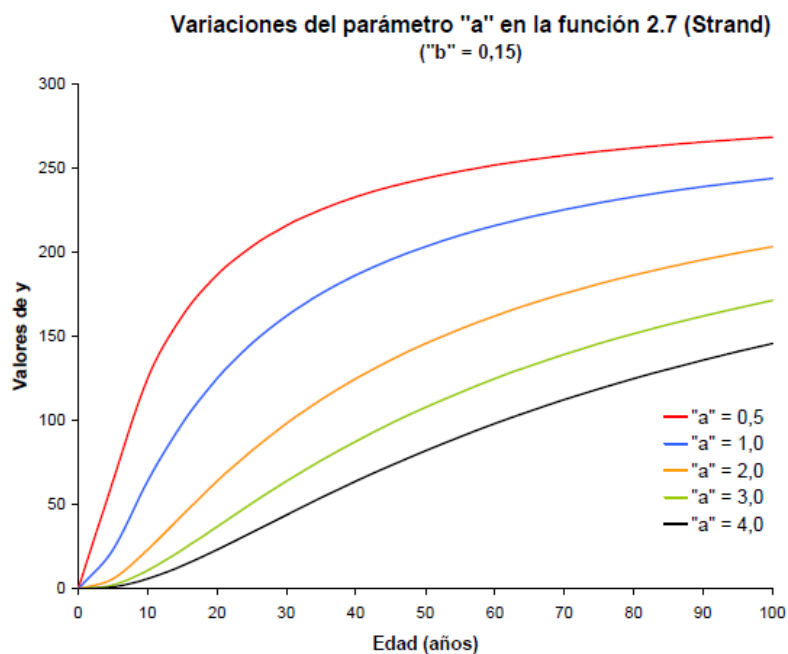


El parámetro "b" afecta a la asíntota horizontal y a la edad a la que se alcanza el punto de inflexión del modelo, de modo que un aumento del valor de "b" supone una disminución de ambos.

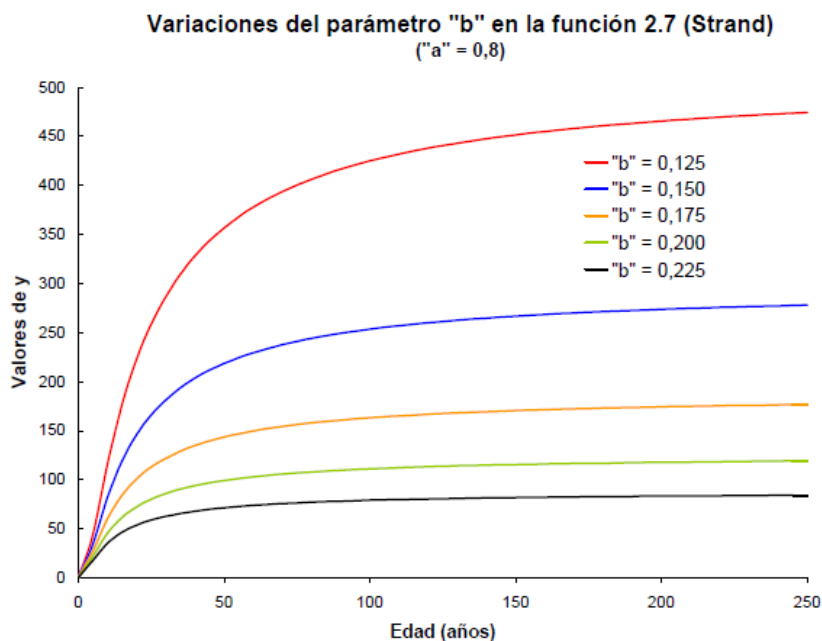
Apéndice 25. Características del modelo Strand.

2.7 STRAND (1964)	
1.	$y = \left(\frac{t}{a+bt} \right)^3 \quad a > 0, \quad b > 0 \quad \{\forall t \geq 0\}$
2.	$C.C. = y' = \frac{3at^2}{(a+bt)^4}$
3.	$C.M. = \frac{y}{t} = \frac{t^2}{(a+bt)^3} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow t = \frac{2a}{b}$
4.	$y(0) = 0 \quad y'(0) = 0$
5.	<i>Pto. Corte Eje X: (0,0) Pto. Corte Eje Y: (0,0)</i>
6.	$\lim_{t \rightarrow \infty} y = \frac{1}{b^3}$
7.	<i>Función estrictamente creciente</i>
8.	$t_{pto.infl.} = \frac{a}{b}$
9.	<i>Expresión lineal del modelo: $\frac{1}{y^{1/3}} = \frac{a}{t} + b$</i>
10.	$y' = 3y^{2/3} a^{-1} \left(1 - by^{1/3} \right)^2$
11.	$\frac{\partial y}{\partial a} = \frac{-3t^3}{(a+bt)^4} \quad \frac{\partial y}{\partial b} = \frac{-3t^4}{(a+bt)^4}$
12.	<i>El modelo pertenece al grupo de los potenciales (PD)</i> $Ln(y') = k + \frac{4}{3}Ln(y) - 2Ln(t) \Rightarrow y' = k_1 y^{4/3} t^{-2} \quad \text{con } k = Ln(3a); k_1 = 3a$ <i>Término de Crecimiento: $3ay^{4/3}$ Término de Decrecimiento: t^2</i>

Apéndice 26. Variaciones en los parámetros del modelo Strand.



El parámetro "a" afecta a la edad a la que se alcanza el punto de inflexión del modelo, de modo que un aumento del valor de "a" provoca un aumento de dicha edad.



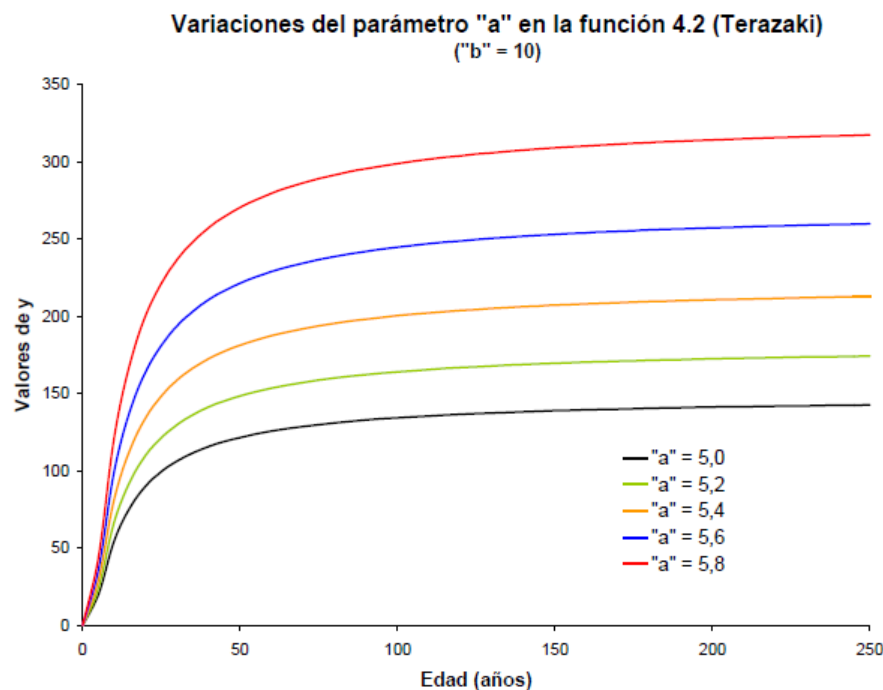
El parámetro "b" afecta a la asíntota horizontal y a la edad a la que se alcanza el punto de inflexión del modelo, de modo que un aumento del valor de "b" supone una disminución de ambos.

Apéndice 27. Características del modelo Terazaki.

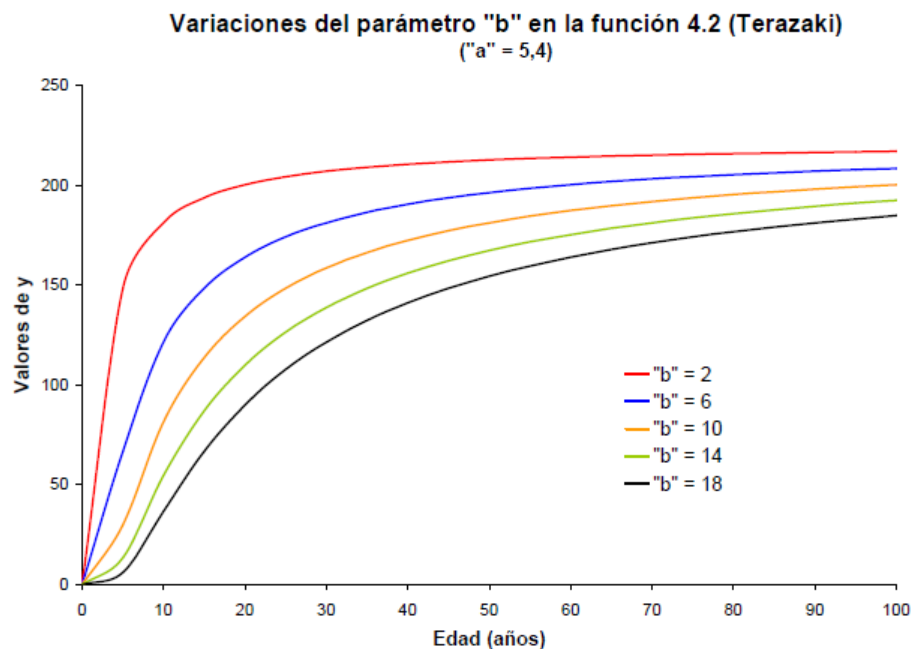
4.2 TERAZAKI (1915) Citado en Peschel (1938)

1.	$y = e^{a-b/t} \quad a > 0 \quad b > 0 \quad \{\forall t > 0\}$
2.	$C.C. = y' = \frac{be^{a-b/t}}{t^2}$
3.	$C.M. = \frac{y}{t} = \frac{e^{a-b/t}}{t} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow t = b$
4.	$\lim_{t \rightarrow 0+} y = 0 \quad \lim_{t \rightarrow 0+} y' = 0$
5.	<i>No existe punto de corte con ninguno de los dos ejes</i>
6.	$\lim_{t \rightarrow \infty} y = e^a$
7.	<i>Función estrictamente creciente</i>
8.	$t_{pto.infl.} = \frac{b}{2}$
9.	<i>Expresión lineal del modelo: $Ln(y) = a - \frac{b}{t}$</i>
10.	$y' = \frac{y[a - Ln(y)]^2}{b}$
11.	$\frac{\partial y}{\partial a} = e^{a-b/t} \quad \frac{\partial y}{\partial b} = -\frac{e^{a-b/t}}{t}$
12.	<i>El modelo pertenece al grupo de los potenciales (PD)</i> $Ln(y') = k + Ln(y) - 2Ln(t) \Rightarrow y' = k_1 y t^{-2} \quad \text{con } k = Ln(b); k_1 = b$ <i>Término de Crecimiento: by Término de Decrecimiento: t^2</i>

Apéndice 28. Variaciones en los parámetros del modelo Terazaki.



El parámetro " a " afecta a la asintota horizontal del modelo, de modo que un aumento del valor de " a " supone un aumento de la asintota.



El parámetro " b " afecta a la edad a la que se alcanza el punto de inflexión del modelo, de modo que un aumento del valor de " b " supone un aumento de dicha edad.

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica mill*

Apéndice 29. Análisis de resultados y recomendaciones de la muestra número 1 de suelo de la finca propiedad de la universidad Industrial de Santander –Sede Málaga

	 	LABORATORIO QUÍMICO DE SUELOS CONVENIO UIS-GOVERNACIÓN DE SANTANDER. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES		Código: F-LQS-23
				Versión: 02
				Página 99 de 102

Fecha de Emisión:	Marzo 07 de 2017	Cultivo :	PINO Y EUCALIPTO
Código Muestra:	17-0073	Edad:	Iniciar

ANÁLISIS DE RESULTADOS: Suelo Fuertemente Ácido. pH: 5.4 No óptimo. Contenidos Altos de Materia Orgánica, Nitrógeno y Calcio. Niveles bajos en Fósforo y Magnesio. Adecuados en Sodio y Potasio. Relación Calcio: Magnesio Desbalanceada. Textura del suelo (Franco-Arcilloso) adecuada para el cultivo de Pino y Eucalipto.

RECOMENDACIONES: Mezclar 1 kilogramo de **Abono Orgánico** con el suelo de rellenar y colocar 100 gramos de **Micorrizas** en el fondo el hoyo a sembrar. Dos meses después de efectuada la siembra, aplicar por planta 15 gramos de **Fosfato Diamónico (DAP)** y repetir la misma cantidad (15 gramos) cada tres meses hasta completar el año. Seis meses después de efectuada la siembra, realizar fertilizaciones foliares con: **Sulfato de Magnesio**, en dosis de 200 gramos en 100 litros de agua (repetir a los 20 y 40 días); aplicados después de un día de lluvia o de aplicar riego, en las primeras horas de la mañana. Realizar nuevamente análisis de suelos en 12 meses.

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica mill*

		LABORATORIO QUÍMICO DE SUELOS CONVENIO UIS-GOBERNACIÓN DE SANTANDER. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES		Código: F-LQS-23 Versión: 02 Página 2 de 102
---	---	---	---	--

NOTAS Nota 1: Las recomendaciones almacenadas en la base de datos y las enviadas por fax o correo electrónico se conservarán durante tres meses a partir de la entrega de las mismas. Nota 2: Prohibida la reproducción total o parcial de este documento. Nota 3: Estas recomendaciones son válidas únicamente para las muestras suministradas por el cliente. Nota 4: Favor comunicar su sugerencia, observación o reclamo al teléfono 6324861 o a los correos electrónicos: laboratorioquimicodesuelos_uis@yahoo.com y labquimicodesuelos@uis.edu.co	OBSERVACIONES	VoBo: ALFREDO ORLANDO GÓMEZ R T.P. 10891 Ingeniero Agrónomo Profesional Universitario SADER
--	-----------------------------	---

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica mill*

Apéndice 30. Análisis de resultados y recomendaciones de la muestra número 2 de suelo de la finca propiedad de la universidad Industrial de Santander –Sede Málaga.

	 	LABORATORIO QUÍMICO DE SUELOS CONVENIO UIS-GOBERNACIÓN DE SANTANDER. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES		Código: F-LQS-23
				Versión: 02
				Página 101 de 102

Fecha de Emisión:	Marzo 07 de 2017	Cultivo :	PINO Y EUCALIPTO
Código Muestra:	17-0074	Edad:	Iniciar

ANÁLISIS DE RESULTADOS: Suelo Ligeramente Ácido. pH: 6.1 óptimo. Contenidos Medios de Materia Orgánica y Nitrógeno. Niveles bajos en Magnesio. Adecuados en Sodio, Fósforo y Potasio. Altos en Calcio. Relación Calcio: Magnesio Desbalanceada. Textura del suelo (Arcilloso) con porcentaje elevado de Arcilla (50 %).

RECOMENDACIONES: Mezclar 2 kilogramos de **Abono Orgánico** con el suelo de rellenar y colocar 100 gramos de **Micorrizas** en el fondo el hoyo a sembrar. Periódicamente aplicar 2 kilogramos de **Abono Orgánico** por planta para mejorar la textura del suelo. Seis meses después de efectuada la siembra, realizar fertilizaciones foliares con: **Sulfato de Magnesio**, en dosis de 200 gramos en 100 litros de agua (repetir a los 20 y 40 días); aplicados después de un día de lluvia o de aplicar riego, en las primeras horas de la mañana. Realizar nuevamente análisis de suelos en 12 meses.

PLANTACIÓN NELDER DE *Cupressus lusitanica mill*

	 	LABORATORIO QUÍMICO DE SUELOS CONVENIO UIS-GOBERNACIÓN DE SANTANDER. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES		Código: F-LQS-23 Versión: 02 Página 102 de 102
---	---	---	---	--

NOTAS Nota 1: Las recomendaciones almacenadas en la base de datos y las enviadas por fax o correo electrónico se conservarán durante tres meses a partir de la entrega de las mismas. Nota 2: Prohibida la reproducción total o parcial de este documento. Nota 3: Estas recomendaciones son válidas únicamente para las muestras suministradas por el cliente. Nota 4: Favor comunicar su sugerencia, observación o reclamo al teléfono 6324861 o a los correos electrónicos: laboratorioquimicodesuelos_uis@yahoo.com y labquimicodesuelos@uis.edu.co	OBSERVACIONES	VoBo: ALFREDO ORLANDO GÓMEZ R T.P. 10891 Ingeniero Agrónomo Profesional Universitario SADER
--	-----------------------------	---