

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

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CLIMA, SUELO Y EDAD EN LAS
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE *E. BOSISTOANA F. Muell*
CULTIVADO EN TRES LOCALIDADES DE URUGUAY

Mauricio de Carballo Alvarez

Tutora: Dra. Marcela Ibáñez

Co-tutor: Dr. Diego Passarella

Tacuarembó, 26 de noviembre de 2021

PÁGINA DE APROBACIÓN

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL NORESTE – SEDE TACUAREMBÓ

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

Título:

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CLIMA, SUELO Y EDAD EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE *E. BOSISTOANA* F. Muell CULTIVADO EN TRES LOCALIDADES DE URUGUAY

Autor:

Mauricio De Carballo Alvarez

Tutor:

Dra. Marcela Ibañez

Co-tutor:

Dr. Diego Passarella

Puntaje: _____

Tribunal:

.....(nombre y firma).
.....(nombre y firma).
.....(nombre y firma).

FECHA:

Agradecimientos

En primer lugar, reconocer la gracia y el cuidado de Dios a lo largo de toda mi vida, permitiendo que pueda culminar una etapa más de muchas otras que vendrán.

A mis padres, quienes fueron fundamentales en todos los aspectos, principalmente en lo emocional y económico; y a mi madrina quien dedicó una enorme carga horaria en la cocina para que tuviera semanalmente un menú distinto a los anteriores. A mi familia en general, que de una manera u otra me apoyaron en estos años en la universidad.

Agradezco a mis compañeros, muchos de los cuales se volvieron amigos, dispuestos inclusive a alojarme por algunos cuantos días en sus hogares para cada actividad que fuese necesaria realizar a lo referido a la carrera.

A doña Nina, encargada de la residencia en la cual viví por cinco años, la cual siempre colaborando con lo necesario y mostrando interés para que llegara a la meta.

Agradecer a mis tutores, quienes estuvieron dispuestos a acompañarme y guiarme de manera incondicional en este trabajo final. A Natalia Berberían por su apoyo en lo referido a la estadística del trabajo y motivando a continuar firme y adelante siempre. A Pablo Núñez, Gustavo Balmelli (y demás personal de INIA), Carmelo Centurión, al Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), Luis Guillenea, Fernando Bideau, Carolina Jorge, José Gándara, Álvaro Camargo, entre otros.

También a los profesores que estuvieron colaborando de manera quizá más puntual, lo cuales se identificarán con este simple agradecimiento y mención. No olvidar del personal en general de la universidad de Tacuarembó, quienes hacen parte del día a día de la vida del estudiante.

RESUMEN

El *Eucalyptus bosistoana* se presenta como una especie con un buen potencial para utilizarse a escala comercial dado que su madera posee alta dureza y durabilidad natural, así como buena capacidad para brindar sombra y abrigo al ganado. En Uruguay esta especie aun no es plantada a nivel comercial, disponiéndose de poca superficie forestada la cual tiene fines de estudio. El conocimiento sobre *E. bosistoana* aún es escaso, por lo que este trabajo aporta a la base de datos existente tanto a nivel nacional como internacional, dando una perspectiva y oportunidades de esta especie en el sector forestal, permitiendo la diversificación de especies a plantar y por lo tanto diversificar usos y propiedades maderables. Si bien las propiedades de la madera son propias de cada especie en particular, están influenciadas por el lugar donde los árboles crecen y se desarrollan, repercutiendo en las propiedades maderables. Para analizar y comprender esta influencia se propone una primera evaluación del efecto combinado del clima, del suelo y la edad sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *E. bosistoana*. Para ello, se trabajó con árboles procedentes de tres localidades de Uruguay: García y El Chajá (en Río Negro) y Glencoe (en Paysandú). Sobre esas localidades se realizó una caracterización respecto a temperaturas, precipitaciones y radiación (definiendo la variable clima); y la profundidad, pH, pendiente, textura y agua potencialmente disponible de los suelos de cada localidad (definiendo la variable suelo). Se contó con trozas basales de 9 árboles, de las que se obtuvieron probetas con las dimensiones establecidas por las normas técnicas norteamericanas ASTM y las uruguayas UNIT para la realización de los ensayos para determinar las propiedades físicas (densidad básica, anhídrica y estabilidad dimensional) y las propiedades mecánicas (flexión estática, compresión paralela a la fibra y dureza, en las tres orientaciones). En los resultados de la variable clima, no se encontraron diferencias significativas entre las localidades por lo que no puede atribuirse un efecto distintivo de esta variable sobre las propiedades de la madera. Para la variable suelo, se observó un contraste entre la profundidad y textura de los horizontes así como el agua disponible (comparando entre localidades), las cuales tendrían un efecto notorio en el crecimiento de los árboles repercutiendo sobre las propiedades de la madera. Durante el desarrollo del trabajo se debieron descartar dos individuos de la localidad 3 (Glencoe), los cuales no pudieron ser repuestos. Este hecho derivó en que no se pudiera estudiar de forma separada el efecto de la edad y parámetros contrastantes del suelo entre dos localidades (Loc. 1 y 3). Se encontraron diferencias significativas entre las propiedades de la madera de las localidades 1 y 2, las cuales se atribuyen al efecto combinado del suelo y edad, dado que no se puede distinguir la preponderancia de cada una. Los resultados indican que es una madera de alta densidad, dureza y resistencia, comparada a otras especies de *Eucalyptus*, y que puede ser utilizada en construcción y aplicaciones que requieran alta densidad y durabilidad, como pisos u otros. Por otro lado, los coeficientes de contracción y anisotropía indican que la madera de *E. bosistoana* se clasifica como “apta para secado o normal” y “estable” según la estabilidad dimensional.

Palabras clave: *Eucalyptus bosistoana*; Propiedades físicas y mecánicas; Clima; Suelo.

ABSTRACT

Eucalyptus bosistoana has a good potential for use on a commercial scale since its wood has high hardness and natural durability, as well as a good capacity to provide shade and shelter for livestock. In Uruguay this species is not yet commercially planted, with little forested area available for study purposes. Knowledge about *E. bosistoana* is still scarce, so this work contributes to the existing database both nationally and internationally, giving a perspective and opportunities of this species in the forestry sector, allowing the diversification of species to be planted and therefore diversify uses and timber properties. Although the properties of wood are specific to each species in particular, the truth is that they are influenced by the place where the trees grow and develop, affecting the timber properties. To analyze and understand this influence, a first evaluation of the combined effect of climate, soil and age on the physical and mechanical properties of *E. bosistoana* wood is proposed. Trees from three localities in Uruguay: García and El Chajá (in Río Negro) and Glencoe (in Paysandú) were used in this work. A characterization regarding temperatures, rainfall and radiation was carried out on these locations (defining the climate variable); and the depth, pH, slope, texture and potentially available water of the soils of each locality (defining the soil variable). Basal logs from 9 trees were used, from which specimens were obtained with the dimensions established by the USA and Uruguayan standards to carry out the tests to determine the physical properties (basic density, dry density and dimensional stability) and the mechanical properties (static bending, compression parallel to the fiber and hardness, along the three main orientations). Regarding the results for the climate variable, no significant differences were found between the localities, so a distinctive effect of this variable on the properties of the wood cannot be attributed. For the soil variable, a contrast was observed between the depth and texture of the horizons as well as the available water (comparing between locations), which would have a noticeable effect on the growth of the trees, affecting the properties of the wood. During the development of the work, two individuals from locality 3 (Glencoe) had to be discarded, whose could not be replaced. This event led to the fact that the effect of age between two localities of similar age and contrasting soil parameters could not be studied separately (Loc. 1 and 3). As a consequence, in this work the effect of the soil and age, cannot be separated. Significant differences were found between the properties of the wood from localities 1 and 2, which are attributed to the combined effect of soil and age, since the preponderance of each cannot be distinguished. The results indicate that it is a wood of high density, hardness and resistance, compared to other *Eucalyptus* species, and that it can be used in construction and applications that require high density and durability, such as floors or others. On the other hand, the contraction and anisotropy coefficients indicate that *E. bosistoana* wood is classified as "suitable for drying or normal" and "stable" according to dimensional stability.

Keywords: Eucalyptus bosistoana; Physical and mechanical properties; Climate; Soil.

Índice de Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo general	12
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
1.2 Organización de la monografía	13
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Generalidades de <i>Eucalyptus bosistoana</i>	14
2.2 Descripción de la especie	14
2.3 Anatomía de la madera.....	15
2.4 Usos.....	16
2.5 Estudios realizados	16
3. LOCALIDADES	18
3.1 Caracterización de las localidades.....	18
3.3.1 Suelo.....	18
3.3.1.1 Textura del suelo	19
3.3.1.2 Profundidad	19
3.3.1.3 Pendientes.....	20
3.3.1.4 pH.....	20
3.3.1.5 Agua potencialmente disponible	20
3.3.2 Clima	21
3.3.2.1 Temperaturas.....	21
3.3.2.2 Precipitaciones	22
3.3.2.3 Radiación.....	22
3.2 Materiales y métodos	23
3.2.1 Ubicación de las localidades	23
3.2.1.1 Localidad 1 - García	23
3.2.1.2 Localidad 2 - El Chajá.....	24
3.2.1.3 Localidad 3 - Glencoe	24
3.2.1.4 Edades de las plantaciones	25
3.2.2 Variable suelo.....	25
3.2.3 Variable clima	27
3.2.3.1 Temperaturas.....	27
3.2.3.2 Precipitaciones	29
3.2.3.3 Radiación.....	29
3.2.4 Análisis estadístico.....	30
3.3 Resultados	30

3.3.1 Variable suelo.....	30
3.3.1.1 Localidad 1 - García.....	31
3.3.1.2 Localidad 2 - El Chajá.....	33
3.3.1.3 Localidad 3 - Glencoe.....	35
3.3.1.4 Aptitud forestal.....	36
3.3.2 Variable clima.....	37
3.3.2.1 Temperaturas.....	37
3.3.2.2 Precipitaciones.....	39
3.3.2.3 Radiación.....	40
3.3.3 Análisis estadístico.....	41
3.4 Discusión de la sección.....	42
4. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.....	44
4.1 Propiedades físicas.....	44
4.1.1 Densidad.....	44
4.1.2 Estabilidad dimensional.....	45
4.2 Propiedades mecánicas.....	46
4.2.1 Factores que afectan las propiedades físicas y mecánicas.....	46
4.2.2 Flexión estática.....	47
4.2.3 Compresión paralela a la fibra.....	48
4.2.4 Dureza.....	49
4.2.5 Obtención de probetas.....	49
4.3 Materiales y métodos.....	50
4.3.1 Ensayos.....	50
4.3.1.1 Recolección de las muestras.....	50
4.3.1.2 Preparación y acondicionamiento de probetas.....	51
4.3.1.3 Contenido de humedad.....	52
4.3.2 Propiedades físicas.....	53
4.3.2.1 Densidad básica.....	53
4.3.2.1.1 Variación de la densidad básica en el radio.....	54
4.3.2.2 Densidad anhidra.....	55
4.3.2.3 Estabilidad dimensional.....	55
4.3.3 Propiedades mecánicas.....	56
4.3.3.1 Máquina de ensayos.....	56
4.3.3.2 Resistencia a la flexión estática.....	57
4.3.3.3 Resistencia a la compresión paralela a la fibra.....	58
4.3.3.4 Dureza.....	60
4.3.4 Análisis de datos.....	60

4.3.5 Modelos estadísticos	61
4.4 Resultados	62
4.4.1 Propiedades físicas	64
4.4.1.1 Densidad básica.....	64
4.4.1.1.1 Variación de la densidad básica en la dirección radial.....	65
4.4.1.2 Densidad anhidra.....	66
4.4.1.3 Estabilidad dimensional	66
4.4.2 Propiedades mecánicas.....	68
4.4.2.1 Flexión estática.....	68
4.4.2.2 Compresión paralela a la fibra.....	71
4.4.2.3 Dureza	73
4.4.3 Análisis estadístico.....	76
4.4.3.1 Grado de correlación entre las propiedades físicas y mecánicas.....	76
4.4.3.2 Modelo de regresión.....	77
4.5 Discusión de la sección	77
5. DISCUSIÓN GENERAL	80
6. CONCLUSIONES GENERALES	82
6.1 Perspectivas a futuro	83
7. BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXO A: Variable suelo.....	91
ANEXO B: Variable clima.....	92
ANEXO C: Análisis de anatomía.....	96
ANEXO D: Diagrama de cajas.....	98

1. INTRODUCCIÓN

El sector forestal en Uruguay, a partir de la Ley Forestal N° 15.939 del año 1987, tuvo un incremento considerable en las plantaciones forestales de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*. Este incremento se puede visualizar comparando la situación desde el año 1990 hasta 2010 cuando el área total forestada aumentó de 45.000 a 830.000 ha. Además, en el período considerado, la tasa media anual de forestación pasó de 3.000 a 27.000 ha y las exportaciones de productos forestales pasaron de 13 millones a 570 millones de dólares anuales [1].

Actualmente, el sector forestal uruguayo alcanza cerca de 1,15 millones de hectáreas forestadas. Las especies que predominan en la zona Litoral Oeste (Paysandú y Río Negro) corresponden a las especies *Eucalyptus grandis*, *E. dunnii* y *E. globulus* (con destino a celulosa mayormente); en la zona Norte (Rivera y Tacuarembó) el 60% de las plantaciones forestales corresponden a pinos y un 40% a eucaliptos, para madera sólida como destino principal; en el Sureste (Cerro Largo y Treinta y Tres) la especie principal es *E. globulus*, y en la zona Centro-Este predomina del *E. grandis* [2]–[4].

En los últimos años, las especies utilizadas con fines industriales en Uruguay se mantiene constante y no se observan grandes cambios en cuanto a la elección de las especies a cultivar con destino industrial [5]. Por otro lado, no existen especies de prioridad forestal, lo que permite la utilización de otras especies para distintos usos y por ende plantaciones. Muchas especies han sido ampliamente estudiadas y se utilizan en gran escala en plantaciones forestales, aunque otras no han tenido el mismo nivel de investigación y/o plantación; este es el caso del *Eucalyptus bosistoana* F. Muell.

De los pocos resultados reportados para esta especie, se destacan su alta durabilidad natural y dureza de la madera [6], las cuales son propiedades buscadas para fines como la construcción con madera. Desde esta perspectiva, en Uruguay ha ido creciendo permitiendo la diversificación de especies, lo que abre un abanico de especies con las características adecuadas para cada fin específico [7].

Las plantaciones de *E. bosistoana* en Uruguay no se encuentran cuantificadas de manera oficial por la Dirección General Forestal debido a la poca cantidad de hectáreas forestadas con esta especie. Sin embargo, las mismas se encuentran distribuidas en cortinas y montes de abrigo [8], y en pequeñas parcelas con fines de estudio en los departamentos de Río Negro, Cerro Largo y Paysandú. En este último, se evaluó la sobrevivencia y la capacidad de brindar sombra y abrigo al ganado [9], y en Cerro Largo, se realizó un estudio respecto a las propiedades físicas y mecánicas de *E. bosistoana* [7], [10] en Uruguay.

Al considerar la necesidad de profundizar el estudio sobre esta especie tanto en sus propiedades maderables como en su posible uso a nivel industrial, se plantea estudiar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *E. bosistoana*. A su vez, evaluar el efecto de las variables edad, clima y suelo donde crecieron los árboles sobre las mismas, en tres localidades distintas de Uruguay. De esta manera, es posible una mejor caracterización de la especie en nuestro país, aportando a la base de datos existente y orienta a los mejores lugares para la plantación de esta especie, la cual puede ser de provecho para el sector forestal.

Para explicar el efecto del clima, edad y del suelo sobre las propiedades de la madera se debe identificar una multiplicidad de factores que interactúan entre sí e influyen en el crecimiento

de los árboles y se reflejan en las propiedades de la madera [11]–[13]. Entre estos factores se encuentran la radiación, precipitaciones, temperaturas, factores edáficos, origen de semilla, manejo, entre otros. Estos factores tienen una marcada influencia en las propiedades de la madera de *Eucalyptus* [12] dado que afectan directa o indirectamente el crecimiento de los árboles, lo cual repercute en las propiedades de la madera. Muchas de las interacciones entre los factores externos anteriormente mencionados y los árboles aún no están suficientemente aclaradas [13].

Para estudiar el efecto de las variables externas (como precipitaciones, temperatura, factores edáficos, entre otros) es imprescindible una adecuada caracterización de las localidades en tanto a las variables clima y suelo [12], [14]. En cuanto a la variable clima, los parámetros más importantes a considerar según la bibliografía son: temperaturas medias/máximas/mínimas, precipitaciones acumuladas y radiación, tanto datos anuales como mensuales. Respecto a la variable suelo, se deben considerar las pendientes, profundidad del suelo, agua potencialmente disponible (APD), textura y pH [15]–[19].

Finalmente, mediante la correlación entre las distintas propiedades físicas y mecánicas, se puede cuantificar el grado de la dependencia de una propiedad respecto a otra; por ejemplo, conociendo principalmente la densidad básica y cómo se relaciona con otras (como flexión estática), es posible identificar los potenciales usos a nivel comercial.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Como objetivo general de este trabajo, se propone estudiar las propiedades físicas y mecánicas de madera de árboles de *Eucalyptus bosistoana* F. Muell., cultivados en distintas localidades del Uruguay.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general del trabajo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterizar en función de las variables clima y suelo las tres localidades donde fueron cultivados los árboles de los cuales se tomaron las muestras para este trabajo.
2. Estudiar las propiedades físicas, en particular la densidad (básica y anhidra) y la estabilidad dimensional de *E. bosistoana* en individuos provenientes de tres localidades de plantación distintas.
3. Estudiar las propiedades mecánicas, en particular la resistencia a la compresión paralela a la fibra, a la flexión estática y a la dureza, en muestras pequeñas libres de defectos de madera de *E. bosistoana*, obtenidas en tres localidades distintas.
4. Evaluar el efecto de las variables suelo, clima y edad de cada localidad sobre las propiedades físicas y mecánicas del *E. bosistoana*.
5. Estudiar el grado de correlación entre las propiedades físicas y mecánicas del *E. bosistoana* determinadas a partir de los ensayos.

1.2 Organización de la monografía

A continuación se presenta la revisión bibliográfica en la cual se recopila información respecto a la especie, anatomía, usos y los antecedentes a nivel internacional y nacional relacionados a los objetivos de este trabajo.

Debido al gran número de variables estudiadas y técnicas empleadas, se decidió organizar este trabajo en dos grandes secciones, las cuales son "localidades" y "propiedades físicas y mecánicas". En cada sección se presentan de forma ordenada los materiales y métodos empleados, los resultados obtenidos y su discusión parcial. Este formato fue elegido para facilitar la comprensión del estudio de cada gran parte del trabajo, reduciendo así, la necesidad de retomar referencias, técnicas o resultados que pudieran haber quedado muy separados en una organización global de materiales y métodos, resultados y discusión.

El informe finaliza con una discusión general, que engloba y analiza en conjunto las secciones anteriormente presentadas, y las conclusiones obtenidas del trabajo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Generalidades de *Eucalyptus bosistoana*

Comúnmente conocida como “Gippsland grey box” o “Bosisto's box”, es un árbol endémico del sureste de Australia (Figura 1), de Nueva Gales del Sur y Victoria desde el norte hasta el valle de Wolgan, al oeste de Sydney y hasta el sur de Gippsland oriental [20].

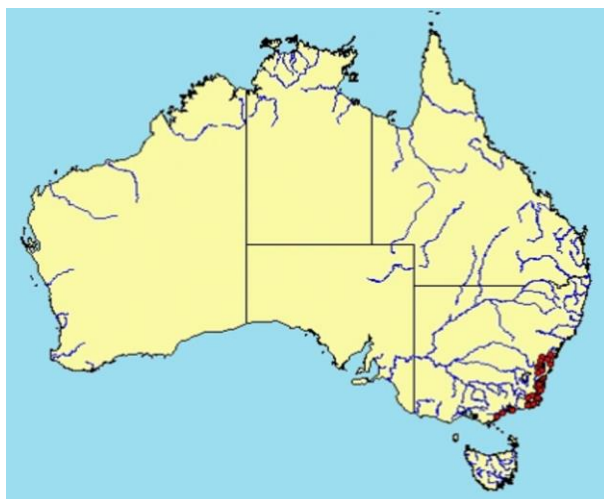


Figura 1. Distribución natural de *E. bosistoana*. Extraído de [20].

El *E. bosistoana* fue descrito formalmente por primera vez en 1895 por Ferdinand von Mueller. El epíteto específico (*bosistoana*) es en honor a Joseph Bosisto, quien fue uno de los primeros en extraer aceites esenciales en Australia, especialmente el aceite de eucalipto [21]. Esta especie pertenece a la familia Myrtaceae (Tabla 1).

Reino	Plantae
Phylum	Tracheophyta
Clase	Magnoliopsida
Superorden	Rosanae
Orden	Myrtales
Familia	Myrtaceae
Género	<i>Eucalyptus</i>
Especie	<i>Eucalyptus bosistoana</i> F.Muell.

Tabla 1. Taxonomía de *E. bosistoana*.

2.2 Descripción de la especie

Puede crecer hasta 40 metros de altura, pudiendo llegar a 60 metros (Figura 2). Generalmente sus ramas se ubican a partir de la mitad de la altura total del árbol hacia la parte superior [22]. La corteza en la parte inferior del tronco es delgada, de color marrón grisáceo, áspera y escamosa. La corteza en la parte superior del tronco y en las ramas es lisa, blanca, de color crema o gris y está cubierta de cintas [23].



Figura 2. Ejemplares de *E. bosistoana*. Extraído de [22]

Las plantas jóvenes tienen tallos redondeados y oblongos a elípticos, hojas de color verde pálido, de 30–70 mm de largo y 18–33 mm de ancho con un pecíolo. Las hojas adultas tienen forma de lanza a curva, del mismo color en ambos lados, 58–200 mm de largo y 7–27 mm de ancho en un pecíolo de 10–18 mm largo. Los botones florales generalmente están dispuestos en grupos de siete en las axilas de las hojas en un pedúnculo de 7–10 mm de largo, los botones individuales en un pedicelo de 3–8 mm de largo. La floración ocurre principalmente de enero a abril y las flores son blancas. Los frutos son en forma de copa, en forma de barril o hemisféricos, de 4–8 mm de largo y ancho en un pedicelo de 4–7 mm de largo (Figura 3) [23].



Figura 3. Detalle de frutos y hojas jóvenes y adultas. Extraído de [24]

2.3 Anatomía de la madera

El *E. bosistoana* tiene poros visibles a lupa en el plano transversal los cuales se distribuyen de manera solitaria (figura 4) [25], [26]. El parénquima axial es vasicéntrico (figura 4) y no se diferencian los anillos de crecimiento. Las tílides son muy comunes en el género *Eucalyptus* y, aunque variable en cantidad, muchas especies presentan vasos con abundancia de tílides como es el caso de *E. bosistoana* [26].

Presenta cristales en el parénquima axial de manera abundante o moderadamente abundante. La presencia de cristales es una característica útil en la identificación de especies [26].

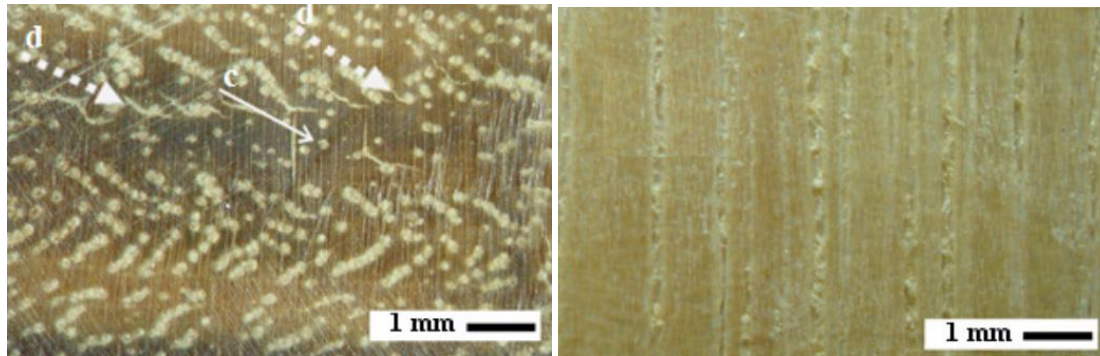


Figura 4. Izquierda: sección transversal donde se indican los vasos solitarios (c) y parénquima vasicéntrico (d). Derecha: Sección tangencial donde se observan los vasos. Imágenes extraídas de [25]

2.4 Usos

Considerando que es una madera duradera de densidad considerable, de aproximadamente $990\text{-}1100\text{ kg/m}^3$ [20], sus usos incluyen estructuras de ingeniería pesada, pisos, postes, piques y durmientes en Australia [8], [9], [18], [27].

Se puede obtener aceite esencial de las hojas. La cantidad total de aceite y su composición pueden variar ampliamente de una planta a otra, aunque existen estudios en los cuales mencionan que las hojas frescas contienen alrededor de 1,0 a 1,5% de aceite esencial. Los componentes principales incluyen 1,8-cineol (alrededor del 60% en algunas formas), pineno, felandreno, limoneno y terpineol [28]. Además, el *E. bosistoana* presenta una buena aptitud melífera [8], [9].

Es una especie resistente a las termitas, aunque la albura es susceptible a los barrenadores del género *Lyctus*, género de escarabajos de la familia *Bostrichidae* [27].

2.5 Estudios realizados

A nivel internacional, existen varios estudios sobre las propiedades de la madera del género *Eucalyptus*, aunque la información sigue siendo deficiente o inexistente para varias de las especies y zonas de plantación, este es el caso del *E. bosistoana* [29]. Dentro de los pocos estudios publicados con esta especie, se encuentra la evaluación de la sobrevivencia, contenido de extractivos en el duramen, entre otros [6], [9], [10], [12], [29]–[31].

También, se destaca su alta densidad y durabilidad natural, la cual es deseable para evitar procesos de impregnación que puedan contener elementos contaminantes que dan lugar a problemas ambientales, como por ejemplo el uso de Arseniato de Cobre Cromado (CCA) [6], [31]. Debido a esto, es recomendable establecer plantaciones forestales con especies naturalmente durables y evitar el uso de estos compuestos contaminantes.

Estudios en Nueva Zelanda con *E. bosistoana*, muestran que no ha tenido buenos rendimientos en localidades muy húmedas en Wairarapa y en condiciones muy frías en las tierras altas de Taranaki [18]. Sin embargo, se ha establecido con éxito desde Canterbury hasta Northland en una amplia gama de tipos de suelo, tolerando situaciones de tierras secas.

A nivel nacional, el *E. bosistoana* fue introducido a Uruguay en el año 1959 junto con otras especies para evaluar su adaptabilidad en el país [10]. Existen algunos trabajos con *E. bosistoana* donde se evaluaron la capacidad de brindar abrigo y sombra al ganado [9], [30] encontrándose que tuvo buena sobrevivencia (84% en basalto), siendo la especie con mejor capacidad para brindar sombra y abrigo, sin embargo, la tasa de crecimiento inicial no es tan

rápida como otras especies como *E. tereticornis*, *E. amplifolia* y *E. benthamii*, evaluadas en el mismo trabajo. En tanto a la durabilidad natural, existen estudios que se están llevando a cabo pero que no existen publicaciones oficiales, aunque el *E. bosistoana* ya se presenta como una de las especies con mayor durabilidad natural¹.

Hasta el momento existe un único estudio sobre las propiedades físicas y mecánicas del *E. bosistoana* en Uruguay, donde se estudiaron 11 árboles de 42 años de edad cultivados en la Estación Experimental Bernardo Rosengurtt de Bañado de Medina, Cerro Largo [10]. Los suelos donde estaba la cortina de árboles son del grupo CONEAT 3.51, de profundidad cercana a 80 cm y de textura arcillo limosa. Los valores de densidad básica de la madera se ubicaron alrededor de 820 kg/m³, corroborando la alta densidad de esta especie. La resistencia a la compresión paralela a la fibra resultó en 66,1 MPa, mientras que de los ensayos de flexión estática se obtuvieron valores de 18738 MPa para el MOE (Módulo de elasticidad) y de 146,2 MPa para el MOR (Módulo de rotura). Ante las propiedades de la madera prometedoras y los pocos estudios previos realizados con esta especie, resulta interesante estudiar cómo se comporta el *E. bosistoana* en otras regiones de Uruguay.

¹ Comunicación personal con la Dra. Marcela Ibáñez

3. LOCALIDADES

En esta sección, se presenta la caracterización de las tres localidades en función de los parámetros más importantes de las variables clima y suelo, además de la edad de los árboles, en los cuales se describe cada parámetro estudiado y cómo puede ser su influencia en el crecimiento y propiedades de la madera de *E. bosistoana*. Además, se analiza si existen diferencias significativas entre localidades estudiadas para determinar cuáles variables pueden generar el mayor efecto sobre las propiedades de la madera.

3.1 Caracterización de las localidades

Para caracterizar cada localidad es importante determinar los factores climáticos y edáficos. Los más influyentes son aquellos que, ante pequeños cambios en la disponibilidad del factor, pueden afectar el crecimiento de los árboles y por ende en sus propiedades [15].

La literatura menciona que generalmente las respuestas de la madera respecto a la composición del suelo ocurren cuando hay diferencias extremas, por ejemplo entre la arena y arcilla. La localidad depende de una interacción de factores como el suelo, los nutrientes, la humedad, la duración del día, precipitaciones, entre otros, y cada una es una combinación única de los factores mencionados anteriormente, los cuales pueden influir en el crecimiento del árbol, determinando ciertas propiedades físicas y mecánicas de la madera [11].

Para evaluar el efecto de las variables de cada localidad sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *E. bosistoana*, se toma especial detalle a las variables suelo, clima y edad, aunque también existen otras variables que pueden influir en el crecimiento de los árboles. Entre ellos se encuentran los tratamientos silvícolas, la genética, la procedencia de las semillas, entre otras [15], [16].

3.3.1 Suelo

Uno de los parámetros más importantes de la localidad es el suelo, el cual es una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire). La relación y proporción de estos materiales determina la capacidad de crecimiento de los árboles y la disponibilidad de los nutrientes necesarios para su desarrollo [32]. Dicha proporción entre componentes determinan las propiedades físicas del suelo, entre las cuales están la textura, estructura, color, permeabilidad, porosidad y profundidad efectiva, entre otras. Las propiedades físicas determinan la rigidez, el sostén o anclaje de los árboles en el suelo, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes [33]. Se considera necesario conocer las propiedades físicas del suelo, para entender en qué medida y cómo influyen en el crecimiento de las plantas. Por otro lado, las propiedades químicas engloban a los nutrientes presentes en el suelo, pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), entre otros.

Los factores edáficos limitantes para el crecimiento de los árboles son aquellos que influyen en la disponibilidad de humedad y de nutrientes para las raíces, lo que dependerá de las condiciones físicas del suelo [15]. Así puede delimitarse un espacio de suelo explorable por las raíces que estará definido por parámetros y propiedades físicas del mismo.

De esta manera, los parámetros del suelo a considerar son: textura, profundidad efectiva, pendientes, pH y agua potencialmente disponible. A continuación se presenta una descripción general y algunos ejemplos para los parámetros antes mencionados.

3.3.1.1 Textura del suelo

La textura del suelo hace referencia a la proporción de componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños como la arena, limo y arcilla [33] (ver figura 5). Es una propiedad importante ya que determina la disponibilidad de nutrientes, agua y aire que son esenciales para el crecimiento de los árboles [32]. Un suelo tiene una buena textura cuando la proporción de los elementos que lo constituyen le dan la posibilidad de ser un soporte que favorece la fijación del sistema radicular de los árboles y su nutrición [33]. En la figura 5 se ilustra el triángulo textural el cual se utiliza para definir la proporción de cada fracción (arena, limo, arcilla) y determinar la clase textural de los horizontes de un perfil de suelo.

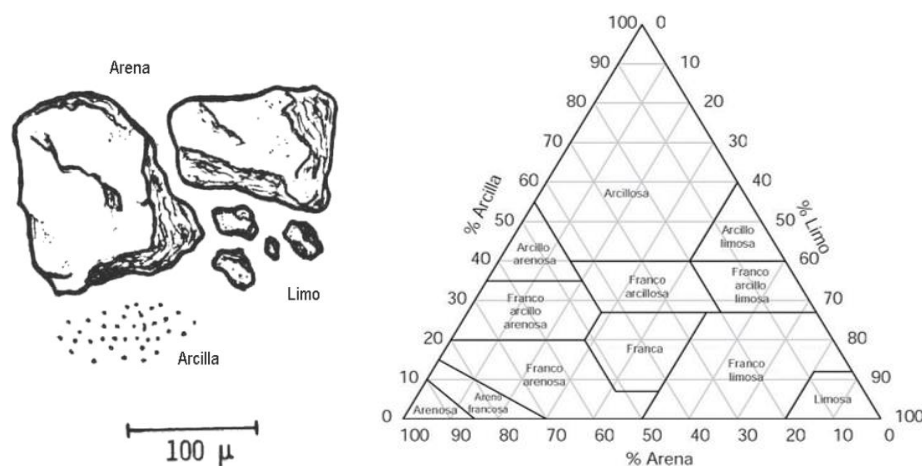


Figura 5. Izquierda: tamaño de partículas de arena, limo y arcilla. Extraído de [33]. Derecha: Triángulo textural según clasificación de USDA². Extraído de [34]

En la tabla 2 se muestran las características generales para cada tipo de suelo según las propiedades más importantes que influyen en el crecimiento y desarrollo del árbol.

Propiedad	Suelo Arenoso	Suelo Franco	Suelo Arcilloso
Tamaño de partículas	Medio	Finas	Muy finas
Permeabilidad	Alta	Media	Baja
Retención de agua	Baja	Media	Alta
Aireación	Buena	Buena	Mala
Nutrientes	Bajo	Medio-Alto	Alto

Tabla 2. Propiedades según el tipo de suelo.

3.3.1.2 Profundidad

La profundidad efectiva de un suelo es el espacio en el que las raíces de las plantas pueden penetrar sin mayores obstáculos, para obtener agua y nutrientes indispensables para su desarrollo. Cabe mencionar que en esta definición se excluye al horizonte C (roca madre) por ser casi impenetrable [15]. La profundidad efectiva es la característica de determinación más sencilla y tiene una gran relevancia en el desarrollo de las especies forestales [35].

Asociado a la textura y profundidad del suelo, se puede analizar el espesor de los horizontes, donde se observa la importancia de algunos horizontes como por ejemplo el A en el cual se desarrollan la mayor parte de las raíces funcionales (o activas) de los árboles, que son las responsables de la absorción de agua y nutrientes [36], [37]. De igual manera, los suelos con horizontes Bt también tienen un efecto importante en el desarrollo radicular ya que son poco penetrables, aunque la presencia de un Bt profundo en el caso de suelos con horizontes

² USDA (por su sigla en inglés): Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica

superficiales con fertilidad y retención de agua bajas, ayuda al crecimiento de los árboles. Respecto a esto, se observó que la profundidad óptima hasta el horizonte arcilloso (Bt) fue cercano a los 55 cm para *E. grandis* en Argentina [35].

3.3.1.3 Pendientes

En topografía, la pendiente representa el grado de inclinación del terreno. Suele medirse como un ángulo o un porcentaje. Por ejemplo, una pendiente de 1% es aquella que en una distancia de 100 metros experimenta un desnivel de 1 metro [32]. Otros elementos que pueden ser útiles para describir la pendiente es según la longitud (en la cual se extiende la pendiente en el terreno) y exposición (al viento, luz, etc.) [15].

De acuerdo a un estudio con *E. bosistoana* en Australia, las pendientes influyeron sobre el crecimiento en altura y sobrevivencia a nivel de micrositio. Además, el *E. bosistoana* creció más en superficies cóncavas, deprimidas (valles) y en lugares más alejados de las crestas, que tenían un índice de exposición al viento relativamente bajo. Las características topográficas en el estudio indicaron que la humedad del suelo y la profundidad podrían ser factores importantes para explicar el crecimiento en altura y la supervivencia de *E. bosistoana* [14].

3.3.1.4 pH

El pH del suelo es una medida de la alcalinidad o acidez del suelo. Afecta la disponibilidad de los nutrientes, la actividad de microorganismos y la solubilidad de minerales presentes en el suelo [15]. Por otro lado, la temperatura y precipitaciones son los factores más importantes que afectan el pH, ya que controlan la intensidad del lixiviado y la meteorización de los minerales del suelo [34].

El principal efecto de un pH muy alto o muy bajo es que algunos nutrientes pueden estar disponibles en forma excesiva y ser tóxicos. A su vez, la disponibilidad de otros nutrientes puede disminuir y aparecer como deficiencias del cultivo [15]. Cuando el pH es mayor a 6,5 se da una baja disponibilidad de nutrientes (como por ejemplo hierro, zinc, boro) y cuando es menor a 5,2 es posible la presencia de aluminio intercambiable, además de una alta capacidad de fijación de fósforo y una baja disponibilidad de molibdeno. En los suelos ácidos, el aluminio y el manganeso pueden volverse muy solubles y tóxicos y reducir la capacidad de la planta para absorber fósforo, calcio y magnesio. El pH del suelo tiene relativamente poco efecto sobre el nitrógeno [38].

El pH del suelo da una indicación de la calidad del ambiente edáfico, tanto para las raíces como para los organismos presentes en un determinado suelo. Se observa que a pH menores a 4,5 ocurre una disminución de la actividad biológica, lo cual disminuye también el crecimiento y exploración radicular [15]. También pueden ocurrir engrosamientos y otras deformaciones en las raíces, resultantes de la acción tóxica del aluminio intercambiable. Además, procesos como la nitrificación y fijación biológica de nitrógeno pueden verse disminuidos o hasta inhibidos [15]. En Uruguay, el rango de valores para suelos es de 4,0 y 8,5. Según la literatura, el *E. bosistoana* prefiere un pH en el rango de 5,5 a 7; tolerando entre 5 a 7,5 [22].

3.3.1.5 Agua potencialmente disponible

Es la máxima cantidad de agua que la planta puede disponer para su absorción en determinado perfil, aunque no toda esa agua es fácilmente disponible para las plantas. Es un parámetro que permite tener una idea de cuánta agua se almacena considerando textura y estructura del suelo. Es de utilidad en la caracterización de los suelos para estimar su capacidad

de suministro de agua para los árboles y útil para calcular riegos o realizar balances hídricos [33]. Se encuentra entre la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente [39].

La Capacidad de Campo hace referencia a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. Depende del tipo de suelo, especialmente de su textura. Por otro lado, el Punto de Marchitez Permanente, indica el contenido de agua de un suelo que ha perdido toda su agua a causa del cultivo y, por ende, el agua que permanece en el suelo no está disponible para el mismo [39]. Cuando se alcanza esta condición, el cultivo está permanentemente marchito y no puede revivir si se lo coloca en un ambiente saturado de agua.

En Uruguay, la capacidad de los suelos de almacenar agua es muy variable, existen zonas con suelos superficiales con una capacidad menor a los 30 mm y otras zonas con suelos profundos con una capacidad mayor a 170 mm [40].

3.3.2 Clima

Dentro de la variable clima, encontramos a las temperaturas medias/mínimas/máximas, precipitaciones acumuladas y radiación, tanto anual y mensual, como los parámetros del clima más importantes para una adecuada caracterización de las localidades. Cada parámetro se describe a continuación.

3.3.2.1 Temperaturas

La temperatura es uno de los factores esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, junto con los niveles de luz, CO₂, humedad del aire, agua y nutrientes presentes en el suelo [41]. La temperatura tiene un efecto tanto a corto como a largo plazo.

La temperatura del ambiente y de la planta no son iguales ya que las plantas pueden regular su temperatura mediante la evapotranspiración y por irradiación. Las plantas buscan alcanzar su temperatura óptima, para lo que es necesario un equilibrio entre la temperatura ambiental, la humedad relativa ambiente y la luz. Si los niveles de luz son altos la planta se calentará demasiado, produciéndose una diferencia entre la temperatura ambiental y la de la planta que luego, para enfriarse, la planta deberá evapotranspirar más. Al igual que ocurre con la temperatura, el índice de transpiración depende de condiciones medioambientales como la luz, el nivel de CO₂ en la atmósfera y la humedad relativa del aire, pero también de la especie de la planta [41].

Un parámetro de interés es la temperatura base, la cual hace referencia a la temperatura a la cual el desarrollo se detiene debido al frío. A medida que la temperatura aumenta por encima de la temperatura base, el desarrollo se acelera hasta que se alcanza la temperatura óptima. La temperatura óptima es aquella a la cual el desarrollo y crecimiento ocurre de la manera más rápida posible. Cabe mencionar que a temperaturas más altas que la óptima, puede ocurrir una reducción en la velocidad del desarrollo, hasta incluso detenerla y ocasionar la muerte del árbol en casos extremos [42].

Se observa una relación positiva entre la temperatura y la densidad de la madera de *Eucalyptus*, aunque esta relación no siempre se cumple [43]. La razón de esta variación puede deberse a la complejidad de la estructura de la madera en las angiospermas [11].

Las distintas especies de *Eucalyptus* tienen la capacidad de aclimatación [44]. La aclimatación hace referencia al proceso por el cual un organismo se adapta fisiológicamente a los

cambios en su medio ambiente, principalmente con el clima circundante. Esta capacidad se puede estimar comparando el cambio en la temperatura óptima con el cambio en la temperatura de crecimiento. El cambio en la temperatura óptima es generalmente menor que el cambio en la temperatura de crecimiento [45]. En general, debido al amplio rango de temperatura para la fotosíntesis y al potencial de aclimatación de la mayoría de las especies, es poco probable que aumentos de temperatura en el rango de 1 a 3°C reduzcan la fotosíntesis [46].

Para la región de origen de *E. bosistoana*, la temperatura media máxima del mes más cálido es de 22 a 28 °C; el mínimo medio del mes más frío es de 3 a 9 °C [20]. La especie puede tolerar heladas leves a agudas del orden de -7° a -3°C [18]. Además, en una investigación sobre la adaptabilidad de las principales especies del género *Eucalyptus* frente a la sequía y al calor [47], se observó que *E. bosistoana* tuvo una buena adaptación ante estas dos condiciones del clima.

3.3.2.2 Precipitaciones

Las precipitaciones determinan la disponibilidad de agua en una localidad, aunque depende de otros muchos factores como la topografía, tipo y profundidad de suelo, entre otros, los cuales determinan características de escurrimiento superficial e infiltración en el suelo.

La precipitación media anual de la región de origen de *E. bosistoana* está dentro del rango de 625 - 1000 mm [20]. En la tabla 3 se muestran los requerimientos de algunas especies de *Eucalyptus* en tanto a precipitaciones para un adecuado desarrollo de los árboles.

Especie	Rango de precipitaciones ac. anual (mm)	Referencia
<i>E. bosistoana</i>	625 - 1000 mm	[48]
<i>E. globulus</i>	600 mm - 1400 mm	[49]
<i>E. grandis</i>	1000 - 1750 mm	[50]
<i>E. nitens</i>	800 mm - 2000 mm	[51]

Tabla 3. Rango de precipitaciones acumuladas anuales (mm) para algunas especies de *Eucalyptus*

Dentro del género *Eucalyptus*, se observa que para el *E. saligna* dentro de su área de distribución natural, se puede generalizar que las zonas con bajas precipitaciones y temperaturas más altas pueden tender a producir madera más densa [52]. Por otro lado se observó que para el *E. globulus* en Australia Occidental, la localidad que tenía escasas precipitaciones anuales y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo más bajos, tenía la densidad de madera más alta entre las tres localidades estudiadas (648 kg/m³), mientras que la localidad con las precipitaciones anuales más altas, tenía una densidad un 10% menor. La localidad con escasas precipitaciones pero con una mayor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo fue de densidad intermedia [53]. Todos estos estudios demuestran la necesidad de considerar las precipitaciones como un parámetro que influye en las propiedades de la madera.

3.3.2.3 Radiación

La radiación ejerce su principal efecto sobre las hojas de las plantas. Esta proporciona la fuente de energía para la transpiración [54], siendo la evaporación del agua en la hoja la que establece el gradiente de potencial hídrico en la planta. Además, la radiación afecta procesos como por ejemplo la fotosíntesis, repercutiendo en el crecimiento del árbol y por ende en las propiedades de la madera.

En Uruguay, se puede observar que la radiación media sobre el país presenta una variación espacial muy pequeña, con una tendencia creciente en dirección sureste-noroeste. La

radiación diaria (promedio anual) ronda las 7 horas donde los menores valores están situados al sureste (Rocha) y los máximos al noroeste (Salto y Artigas) [40].

La heliofanía real (duración del brillo solar u horas de sol) presenta una disminución en invierno como resultado de la variación natural de la insolación astronómica. En enero, los valores medios son de 9 a 9,5 h/día, y 5 a 5,5 h/día en julio. En tanto al comportamiento histórico se observa una baja variabilidad interanual, siendo ésta un poco más alta durante el verano y más baja durante el invierno [40].

3.2 Materiales y métodos

A continuación se presentan los materiales utilizados en este trabajo y los métodos de obtención de los parámetros de interés dentro de las variables clima y suelo, además de la edad.

3.2.1 Ubicación de las localidades

Los árboles de *E. bosistoana* estudiados en este trabajo fueron cultivados en tres localidades de Uruguay, los cuales se denominan en este trabajo como: Localidad 1 - García, Localidad 2 - El Chajá y Localidad 3 – Glencoe (figura 6).

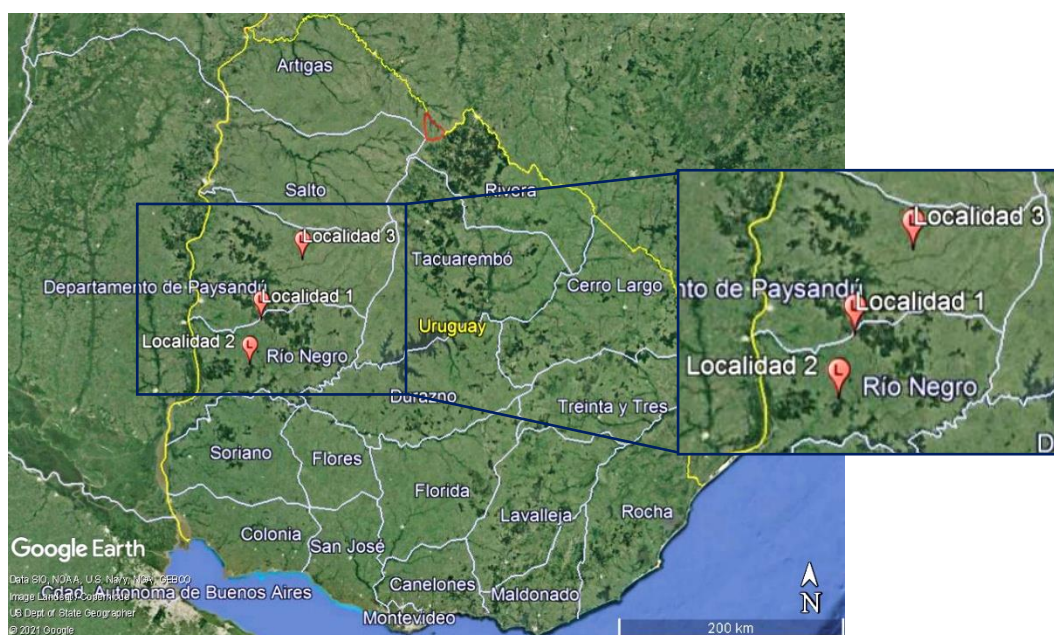


Figura 6. Ubicación de las 3 localidades en el territorio uruguayo.

3.2.1.1 Localidad 1 - García

Esta localidad pertenece a Forestal Oriental (UPM) la cual se encuentra en el departamento de Río Negro, Uruguay. La empresa UPM tiene como fin principal la producción de celulosa por lo cual los tratamientos silvícolas como podas y raleos, no se llevan a cabo en las plantaciones forestales.

Los materiales proporcionados para este trabajo fueron trozas basales de tres árboles de una pequeña parcela de estudio, la cual fue instalada en el año 1996. A continuación se presenta un listado de las actividades que se llevaron a cabo en esta localidad:

- Aplicación de Glifosato 4 L/ha
- Preparación del suelo en fajas con 2 pasadas de excéntrica
- Plantación manual

- Aplicación de preemergente en la fila
- Control en la entrefila con postemergentes
- Control de hormigas pre y post plantación

La tabla 4 presenta información sobre esta localidad, como por ejemplo la procedencia, marco de plantación, entre otros.

Origen de semilla	NUEVA GALES DEL SUR - 27,3 km O-SO de Narooma (AUSTRALIA)
Proveedor de semilla	CSIRO (AUSTRALIA)
Fecha de plantación	06/11/1996
Marco de plantación	3m x 2m (1666 árboles/hectárea)
Coordenadas	32°28'14.17"S; 57°31'21.29" O
Apeo	2019

Tabla 4. Información de la localidad 1

La tabla 5 presenta la información de diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura de los árboles utilizados en este trabajo al momento del apeo. El muestreo se realizó el 6 de noviembre de 2019 por el personal de Forestal Oriental (UPM).

Árbol	DAP (cm)	Altura (m)
1	28,9	33,1
2	36,9	33,5
3	26,3	30,0

Tabla 5. DAP y altura de los árboles de la localidad 1.

3.2.1.2 Localidad 2 - El Chajá

Esta localidad, al igual que la anterior, pertenece a Forestal Oriental (UPM) la cual se encuentra en el departamento de Río Negro, Uruguay. Lo descrito anteriormente en la localidad 1 respecto a las actividades que se realizaron durante la plantación, aplican para esta localidad. A continuación, en la tabla 6, se presentan datos sobre la procedencia de semilla, marco de plantación, entre otros.

Procedencia de semilla	Estación Experimental Bernardo Rosengurtt – Bañados de Medina - Cerro Largo
Fecha de plantación	02/12/2012
Marco de plantación	3m x 2m (1666 árboles/hectárea)
Coordenadas	32°49'17.04"S; 57°38'07.61"O
Apeo	2019

Tabla 6. Información de la localidad 2.

La tabla 7 presenta la información de diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura de los árboles utilizados en este trabajo al momento del apeo. Dicho muestreo también se realizó el 6 de noviembre de 2019 por el personal de Forestal Oriental (UPM).

Árbol	DAP (cm)	Altura (m)
1	18,1	20,8
2	17,4	21,5
3	20,7	23,1

Tabla 7. DAP y altura de los árboles de la localidad 2.

3.2.1.3 Localidad 3 - Glencoe

La localidad forma parte de una Unidad Experimental (UE) que pertenece a INIA, la cual se encuentra en el departamento de Paysandú, Uruguay. Esta UE se ubica en una fracción N° 9 de la Colonia “Fernando J. Baccaro” del Instituto Nacional de Colonización en el departamento de Paysandú a 130 km de la ciudad de Tacuarembó, sobre Ruta Nacional N° 26 al Oeste. Las

actividades de investigación que se realizan en la UE son en el área: forestal, producción animal y forrajera.

Originalmente, se plantó *E. bosistoana* junto a otras 20 especies del género *Eucalyptus* con el fin de evaluar la capacidad de sombra y abrigo para ganado [9]. Durante la plantación, se realizó laboreo en fajas con excéntrica, se fertilizó con superfosfato (100 gramos por planta). Además, no se realizaron podas ni raleos. A continuación se presentan datos sobre esta localidad y la plantación en general (Tabla 8).

Procedencia de semilla	Estación Experimental Bernardo Rosengurt - Bañados de Medina - Cerro Largo
Fecha de plantación	1995
Marco de plantación	2,5m x 2,5m (1600 árboles/hectárea)
Coordenadas	32°00'25.1"S; 57°08'05.9"O
Apeo	2015

Tabla 8. Información de la localidad 3.

La tabla 9 presenta la información de diámetro a la altura del pecho (DAP). Cabe mencionar que no se cuenta con los datos de altura de los árboles.

Árbol	DAP (cm)
1	30,5
2	25,3
3	28,2

Tabla 9. DAP del árbol de la localidad 3.

3.2.1.4 Edades de las plantaciones

Los árboles de la localidad 1 y 3 tenían edades similares (23 y 20 años, respectivamente), mientras que la localidad 2 era aproximadamente tres veces menor a estas (7 años). Esto sugiere en principio que la variable edad estaría generando diferencias en las propiedades de la madera entre las localidades 1 y 3 respecto a la 2, aunque resulta clave el análisis de los posibles efectos de la variable clima y suelo ya que también estaría reflejado la influencia de las mismas en las propiedades de la madera de *E. bosistoana*. Por esto, resulta imprescindible analizar el efecto de cada variable de manera individual.

3.2.2 Variable suelo

Luego de la revisión bibliográfica se identificaron los parámetros más importantes que influyen en el crecimiento de los árboles y que podrían influir en las propiedades de la madera, tanto para la variable suelo como para el clima. Estos se describen a continuación y se presenta la metodología para caracterizar cada localidad.

Los parámetros más importantes de la variable suelo son: agua potencialmente disponible, pH, pendientes, textura y profundidad efectiva del suelo.

Para recopilar la información de las variables anteriormente mencionadas se utilizaron mapas y otras herramientas disponibles en la web. Dentro de ellos se utilizó el visor CONEAT del MGAP [55], el visor del MVOTMA [56], la Carta 1:1000000 [57] y la Carta de Reconocimiento de Suelos del Departamento de Río Negro [58] (figura 7).

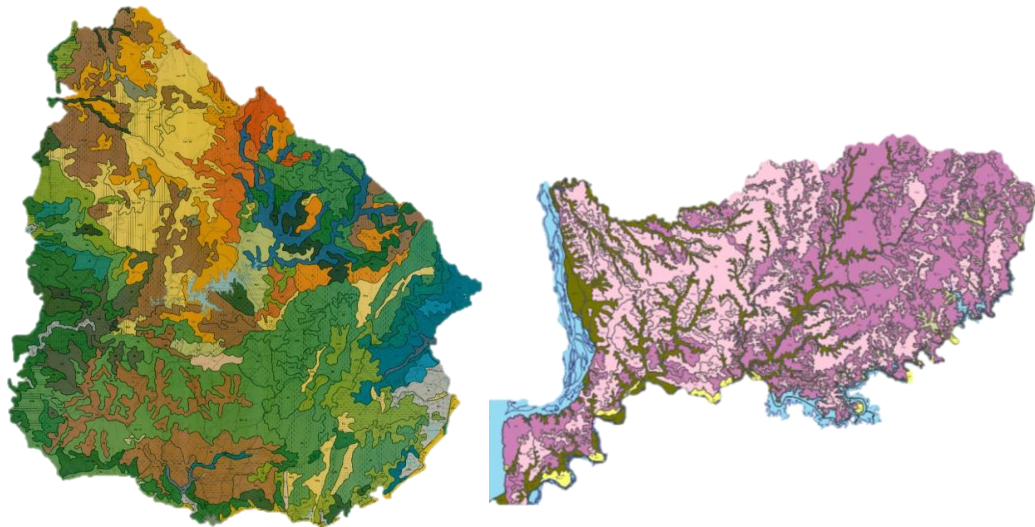


Figura 7. Izquierda: Carta 1:1000000. Extraído de [59]. Derecha: Carta de Suelos de Río Negro. Extraído de [58]. En ambos mapas cada color representa un grupo de suelo. En las respectivas referencias bibliográficas se encuentra la descripción para cada suelo.

Además, de manera complementaria, se utilizó el mapa de Sganga (figura 8) para determinar la aptitud forestal de cada localidad, el cual se basa en la Carta 1:1000000 y se definen cinco clases de aptitud forestal que van de “poco apta” a “muy apta”. Cabe aclarar que la aptitud forestal indica cuáles suelos son más o menos aptos para plantaciones forestales; mientras que la prioridad forestal está dada por condiciones edafológicas favorables para los árboles pero también por pautas políticas y/o jurídicas a efectos de promover la plantación en ciertos suelos, o desestimular en otros.

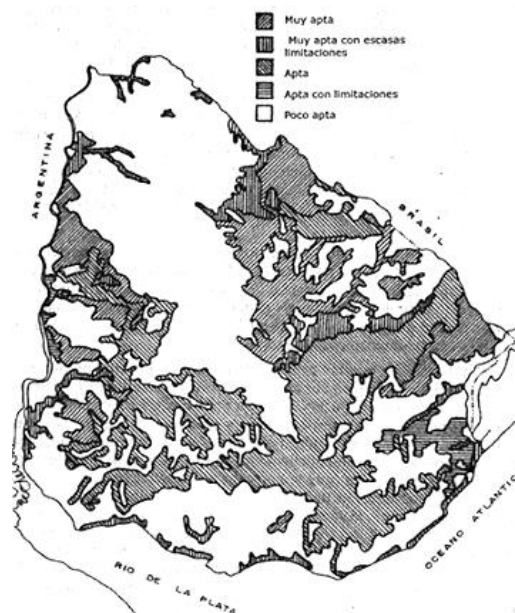


Figura 8. Aptitud forestal de los suelos de Uruguay según Sganga. Extraído de [60]

Para la georreferenciación de mapas y visualización de la ubicación de las localidades en el país se utilizó el Google Earth Pro versión 7.3.3.7786 (32-bit). La caracterización de las localidades respecto a la variable suelo, se utilizó el visor de CONEAT el cual permite extraer información edafológica (formación geológica, pendientes, tipo de suelos, textura, entre otros).

Por otro lado, se tomó como base la información de suelos próximos a la ubicación de cada localidad (por ejemplo cortes de camino), las cuales fueron proporcionados por la Dirección

General de Recursos Naturales (División Suelos y Aguas del MGAP³). La información estaba presentada en tablas Excel con datos de los horizontes en cuestión, espesor de cada horizonte, así como la textura y pH de cada uno de ellos.

La verificación de datos de distintas fuentes (mapas, tablas, entre otros) es importante para analizar si existe una correlación entre ellas. Para esto, se realizó la georreferenciación respecto a la Carta 1:1000000 y la Carta de Suelos de Río Negro. De esta manera, fue posible obtener una mejor precisión en la caracterización de las localidades y verificación de la información proporcionada.

La caracterización de las localidades respecto al parámetro agua potencialmente disponible, la referencia seleccionada fue la Caracterización Agroclimática del Uruguay [40]. Dicho trabajo tomó como base el mapa de J.H. Molfino y A. Califra del 2001 pero realizaron una subdivisión más precisa de valores de agua potencialmente disponible, como se muestra en el siguiente mapa:

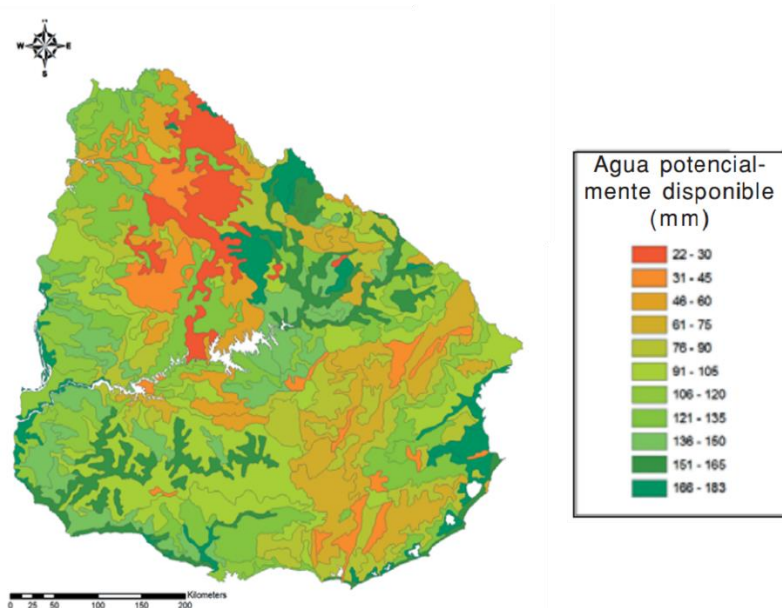


Figura 9. Agua potencialmente disponible en los suelos de Uruguay. Extraído de [40]

El mapa de la figura 9 fue utilizado para realizar la georreferenciación respecto a las coordenadas de las localidades de manera que se obtuvo el rango de valores de agua potencialmente disponible correspondiente a cada una de ellas.

3.2.3 Variable clima

Los parámetros más importantes dentro de la variable clima son: temperaturas medias/mínimas/máximas, precipitaciones acumuladas y radiación, tanto anuales como mensuales.

3.2.3.1 Temperaturas

Para recopilar los datos de temperaturas para cada localidad, se utilizó el KNMI *Climate Explorer*, el cual es una aplicación web para analizar datos climáticos estadísticamente. Forma parte del Centro Regional del Clima de la *World Meteorological Organization* (WMO) en KNMI⁴ [61].

³ MGAP: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca

⁴ KNMI (por sus siglas en holandés): Real Instituto Meteorológico de los Países Bajos

Esta herramienta cuenta con datos de las estaciones meteorológicas de todo el mundo y tiene una interfaz muy simple de acceder y navegar. Se inicia introduciendo un rango de coordenadas y el programa busca las estaciones climáticas más cercanas y forma un polígono que interpolan los valores de las variables de interés para el período de tiempo necesario las cuales no se encuentran disponibles, principalmente los más antiguos.

Las variaciones de temperatura se presentan en formato serie de tiempo (TS - *Time-series*), donde se disponen de valores de temperatura media/mínimas/máximas de forma anual/mensual del último siglo aproximadamente, según lo producido por la Unidad de Investigación Climática (CRU - *Climatic Research Unit*) de la Universidad de East Anglia (Reino Unido). Estos se calculan en cuadrículas de alta resolución (0,5x0,5 grados), que se basan en un archivo de temperaturas proporcionado por más de 4000 estaciones meteorológicas distribuidas por todo el mundo [62].

Una vez obtenidos los datos de KNMI, se seleccionaron las estaciones meteorológicas de INUMET más cercanas a cada localidad de manera que, mediante un análisis de correlación, se analizó el grado de asociación entre ambas fuentes determinando la validez de los valores de KNMI. Se utilizaron los datos de las estaciones meteorológicas de INUMET de Paysandú y Paso de Los Toros, además de las estaciones experimentales de INIA Glencoe y La Magnolia.



Figura 10. Temperatura media anual. Isotermas para el período comprendido entre 1980-2009. Extraído de [40]

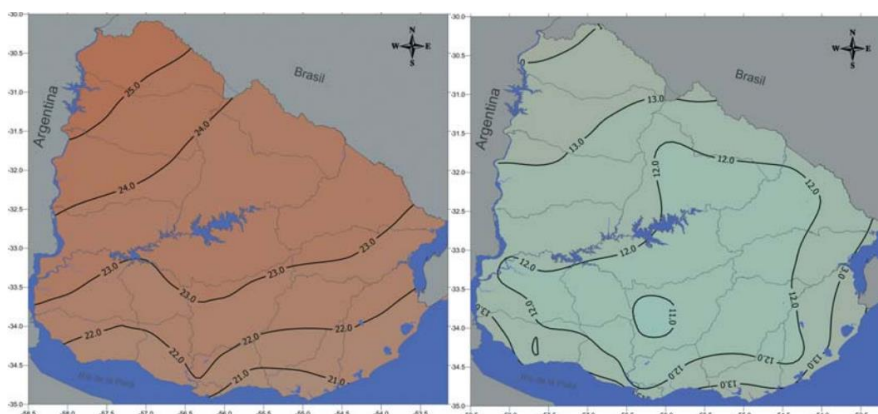


Figura 11. Temperaturas máximas (izquierda) y mínimas (derecha) anuales. Isotermas para el período comprendido entre 1980-2009. Extraído de [40]

De manera complementaria, se utilizaron los mapas de temperaturas medias anuales/mínimas/máximas de la Caracterización Agroclimática del Uruguay con las respectivas isotermas (Figura 10 y 11), para comparar con los datos de KNMI.

3.2.3.2 Precipitaciones

Al igual que las temperaturas, se utilizó la herramienta KNMI para recopilar los datos de precipitaciones acumuladas para las tres localidades, tanto mensuales como anuales.

Por otro lado, se realizó un análisis de correlación entre los datos de KNMI y de las estaciones meteorológicas de INUMET más cercanas a los sitios para el período correspondiente considerando las isoyetas que muestran la tendencia de las precipitaciones en el territorio nacional.

En el caso de la localidad 1, la estación meteorológica más cercana es Piedras Coloradas (de INUMET) a 13,8 km de distancia. Para la localidad 2, la estación más cercana es Salto Grande (de INUMET) a 8,9 km. Y por último, la localidad 3, se utilizaron los valores de la estación ubicada en la propia estación experimental, aunque no se cuenta con los datos desde 1995 a 2002 en formato digital, por lo cual se justifica aún más la necesidad de la utilización del KNMI.

De manera complementaria, se toma como referencia el mapa de precipitaciones acumuladas de la Caracterización Agroclimática de Uruguay (Figura 12) para comparar con los respectivos valores de KNMI y de las estaciones meteorológicas de INUMET.

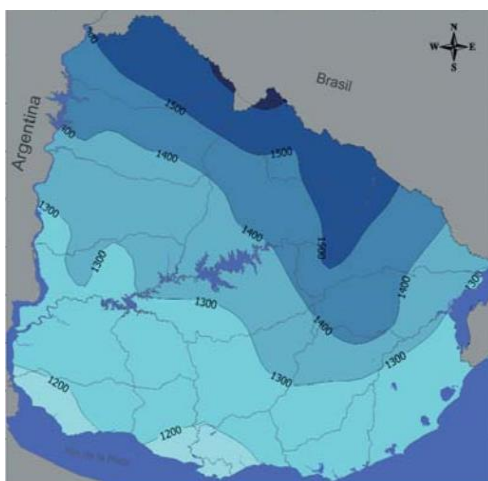


Figura 12. Precipitaciones acumuladas anuales. Isoyetas para el período entre 1980-2009. Extraído de [40]

3.2.3.3 Radiación

Se utilizó la segunda versión del Mapa Solar de Uruguay para obtener datos de radiación para las tres localidades [63], [64]. El Mapa Solar utiliza un modelo el cual permite estimar la irradiancia media horaria para cualquier punto del territorio uruguayo con aproximadamente 2 km de resolución espacial y se puede encontrar de forma online y gratuita [64].

El procedimiento para obtener la información de radiación consta en introducir las coordenadas de interés y se devuelven valores mensuales y anuales de GHI (Irradiación global en plano horizontal (incerteza 2%)), GTI (Irradiación global en plano inclinado a 35° (azimut Norte) (incerteza 8%)) y DNI (Irradiación directa en incidencia normal (incerteza 8%)) en formato PDF para el período de 2000 - 2016.

Los valores se obtienen por estimaciones de estadística (modelos) y con la utilización de satélites. Todos los modelos utilizados han sido específicamente ajustados a las particularidades de la región por el Laboratorio de Energía Solar (UdelaR) y son los de menor incertidumbre conocida para estimar la irradiación solar sobre el territorio uruguayo [63].

3.2.4 Análisis estadístico

Con el fin de identificar si existen diferencias entre las localidades en función de la edad y las variables climáticas consideradas se propuso un modelo de análisis de regresión lineal para las mediciones de media, máxima y mínima, tanto anual como mensual para las temperaturas, precipitaciones acumuladas y radiación. El modelo propuesto fue:

$$y_{ij} = f(\text{vida del árbol}, \beta_j) * L_i + \varepsilon_{ij} \quad (M1)$$

Donde: y_{ij} variables climáticas, $f(\text{vida del árbol}, \beta_j)$ cualquier función que pueda vincular las variables de interés, L_i un efecto fijo asociado a la localidad i -ésima y ε_{ij} el error experimental asociado a cada unidad y se asume $\varepsilon \sim N(\mu, \sigma_\varepsilon^2)$.

Las variables del suelo al no contar con repeticiones (por lo tanto sin media y desvío) no fueron incluidos en el modelo detallado previamente. Por ende, se realizó un análisis descriptivo de estos parámetros y su posible efecto sobre el crecimiento de los árboles y por ende las propiedades de la madera (ver discusión de la sección 3.4).

Para este y todos los análisis estadísticos realizados en el presente trabajo, se contó con el asesoramiento de la Lic. Est. Mag. Natalia Berberian,

3.3 Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de las localidades respecto a todos los parámetros de las variables suelo y clima, para cada localidad.

3.3.1 Variable suelo

A continuación se presenta el resultado de la georreferenciación realizada de la Carta 1:1000000 (Figura 13) y la Carta de Reconocimiento de Suelos del Departamento de Río Negro (Figura 14) respecto a las tres localidades.

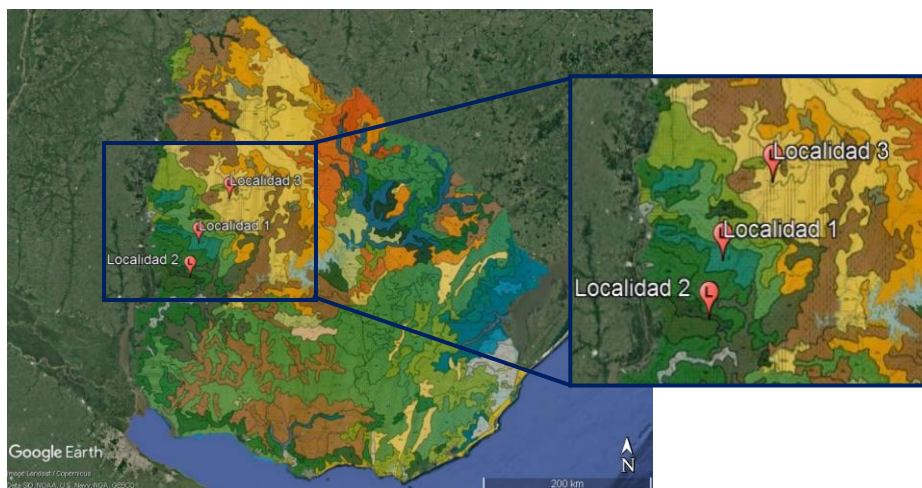


Figura 13. Georreferenciación en la Carta 1:1000000, donde se indican las tres localidades en el territorio uruguayo.

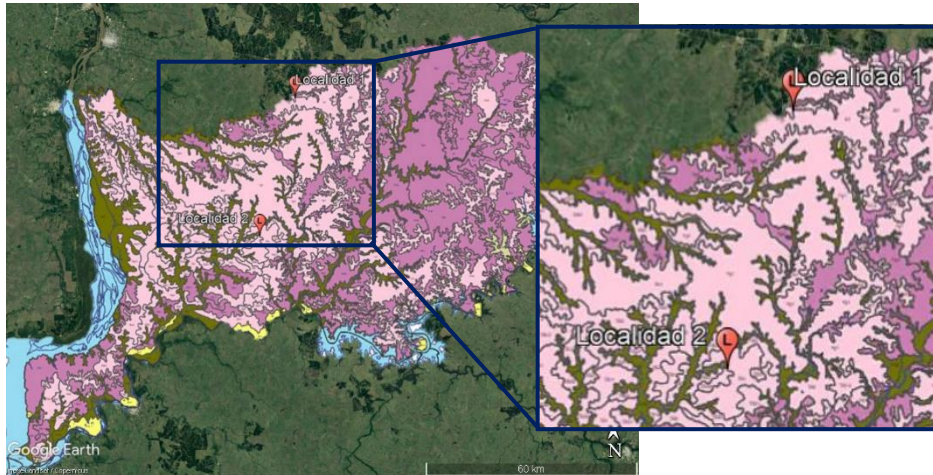


Figura 14. Georreferenciación en la Carta de Suelos de Río Negro. Se indican las localidades 1 y 2.

Para la descripción edáfica de cada localidad que se detalla a continuación fueron tomados como referencia los datos proporcionados por la Dirección General de Recursos Naturales (División Suelos y Aguas del MGAP), los cuales corresponden a suelos cercanos a las tres localidades. Además, la información fue verificada en base a la georreferenciación con los mapas anteriormente presentados (figura 13 y 14) y corroborado por personal encargado de cada localidad, aunque para la localidad 3, el personal de INIA-Glencoe no cuenta con la información de la profundidad ni textura del suelo; para los restantes parámetros edáficos, se verificó su correspondencia.

3.3.1.1 Localidad 1 - García

El suelo de esta localidad es de Prioridad Forestal y corresponde al grupo 9.3 según CONEAT. El perfil del suelo tiene una profundidad de 1,23 m el cual se divide en la siguiente secuencia de horizontes A, E, Bt1, Bt2 y BC. El material geológico corresponde a areniscas con cemento arcilloso, frecuentemente de tonos rosados, a veces rojizos o blancos grisáceos. Los suelos predominantes son Planosoles Dístricos Ócricos.

Según CONEAT, el relieve en general es suavemente ondulado con predominio de 1 a 3% de pendientes. Se presenta una combinación de laderas extendidas de 1-2% de pendiente, predominando sobre laderas de disección de mayor convexidad y pendiente (3 a 5%), que corresponden a las litologías más gruesas del sedimento. Para el suelo tomado como referencia para esta localidad, la pendiente corresponde a 3%.

Para una mejor interpretación de los parámetros de interés a continuación se presentan esquemas y gráficos, mientras que en la sección de anexos se encuentran las tablas con los datos detallados (ANEXO A). En la figura 15, se ilustra el triángulo textural con los puntos donde corresponden a la intersección de las tres fracciones (arena, limo y arcilla) por horizonte. La línea celeste indica la secuencia de horizontes del perfil del suelo.

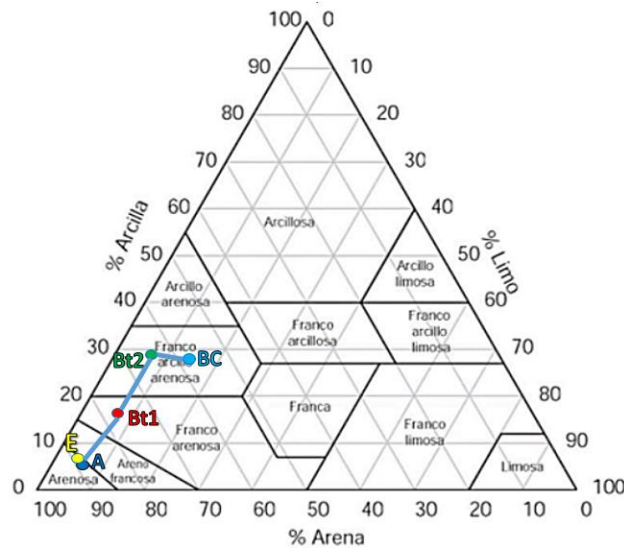


Figura 15. Triángulo Textural de USDA en el cual se observan los puntos que corresponden a las fracciones de cada horizonte del perfil del suelo.

En la figura 16, se presentan en un gráfico de barras los porcentajes de las tres fracciones por horizonte, donde se observa un predominio de la fracción arena en todos los horizontes del perfil del suelo. Luego, en la figura 17 se muestra el comportamiento del pH en cada horizonte en función de la profundidad del suelo.

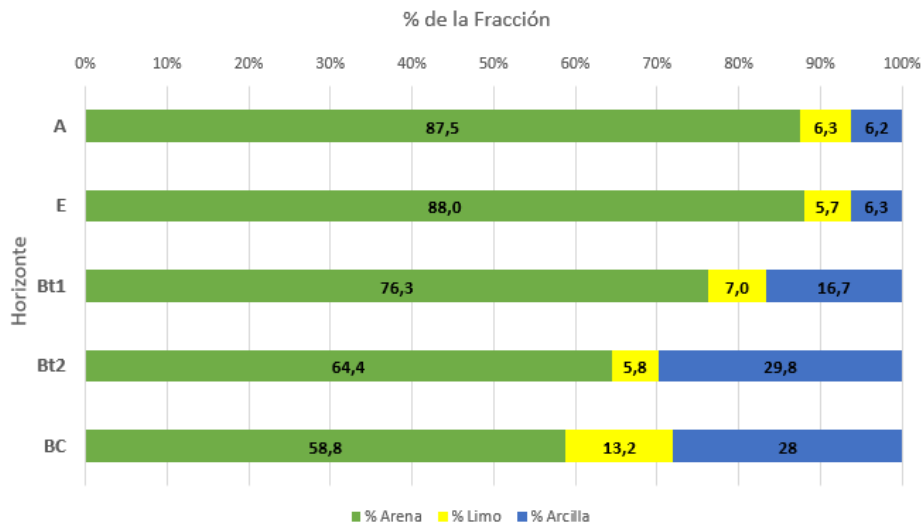


Figura 16. Porcentaje de las fracciones por horizonte.

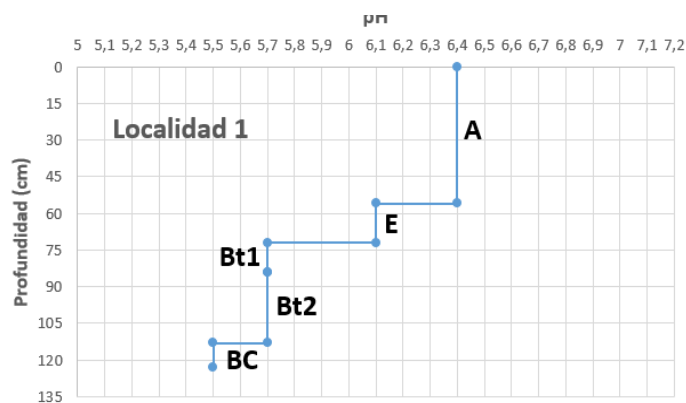


Figura 17. pH por horizontes en función de la profundidad.

Luego de la georreferenciación y analizando la coordenada respecto al área en la cual corresponde, se determinó que la localidad 1 tiene un rango entre 121 a 135 mm de agua potencialmente disponible, según el mapa de Caracterización Agroclimática del Uruguay (figura 18).

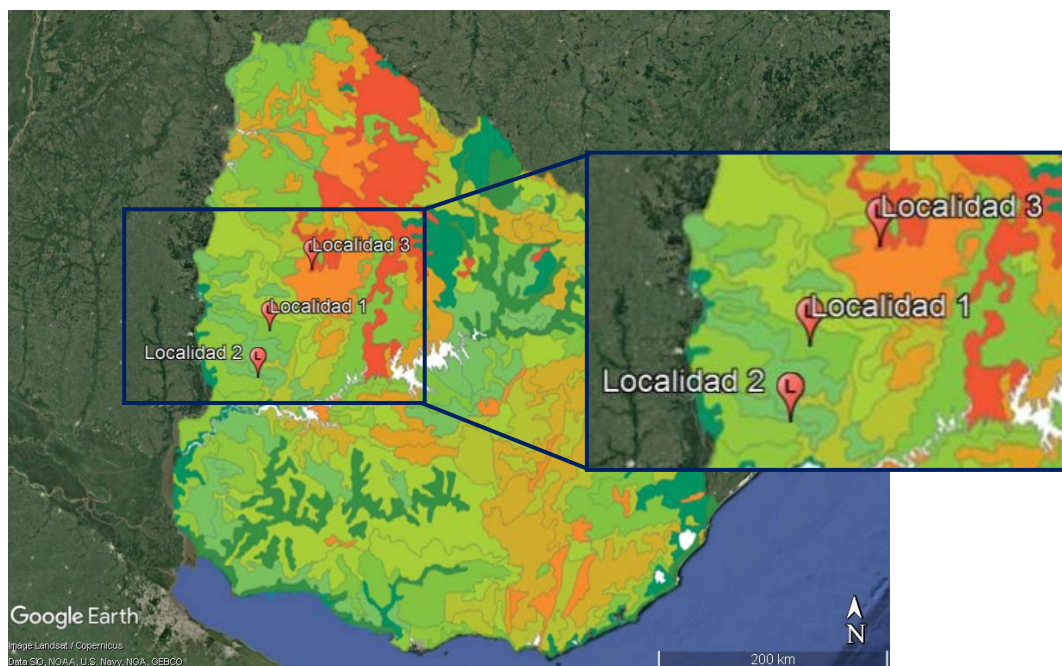


Figura 18. Georreferenciación del mapa de agua potencialmente disponible donde se detallan las localidades.

3.3.1.2 Localidad 2 - El Chajá

La localidad 2 corresponde al grupo de suelos 09.3 según CONEAT y, al igual que la localidad 1, es un suelo de Prioridad Forestal. Tiene una profundidad de 76 cm y una secuencia de horizontes en el perfil del suelo de A1, A2, Bt1, Bt2 y BC. El material geológico corresponde a la formación Salto, con sedimentos areno arcillosos de color pardo, a veces pardo rojizo.

Según CONEAT, los suelos dominantes están correlacionados con las posiciones topográficas, ya que en las laderas fuertes existen Argisoles (a veces Planosoles) Dístricos Ócricos. En las laderas suaves los suelos corresponden a Brunosoles Subéutricos Típicos y Lúvicos, a veces hidromórficos de color pardo muy oscuro, textura franco arenosa o franco arcillo arenosa, fertilidad media y drenaje moderadamente bueno a imperfecto.

El relieve está constituido por lomas de laderas asimétricas, donde las laderas sur son de marcada convexidad y pendientes de 4 a 8% y las laderas de exposición norte son más extendidas y de pendientes suaves, de 1 a 3%. En el caso del suelo tomado como referencia, se trata de una ladera media de 4% de pendiente. Para esta localidad, como resultado de la georreferenciación, se obtuvo un rango de APD de 106 a 120 mm.

En la figura 19, se presenta el triángulo textural con los puntos que corresponden a los porcentajes de cada fracción por horizonte, para visualizar de manera clara cómo es la secuencia de las clases texturales.

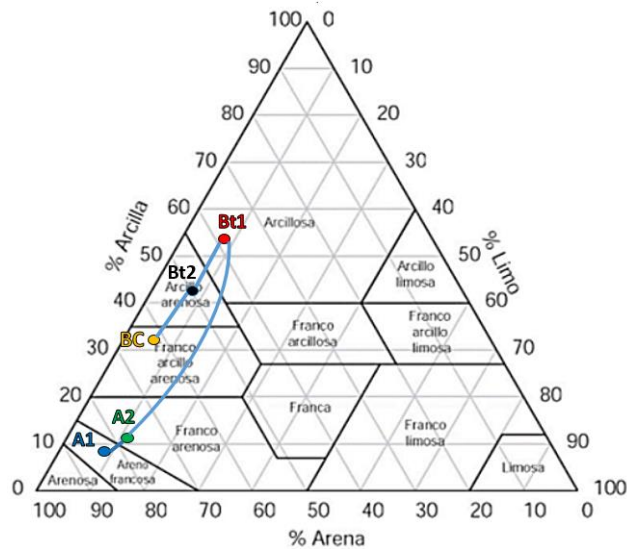


Figura 19. Triángulo Textural de USDA en el cual se observan los puntos que corresponden a las fracciones de cada horizonte del perfil del suelo.

En la figura 20 y 21 se ilustran las fracciones de cada horizonte en el perfil del suelo y la variación del pH con la profundidad, respectivamente.

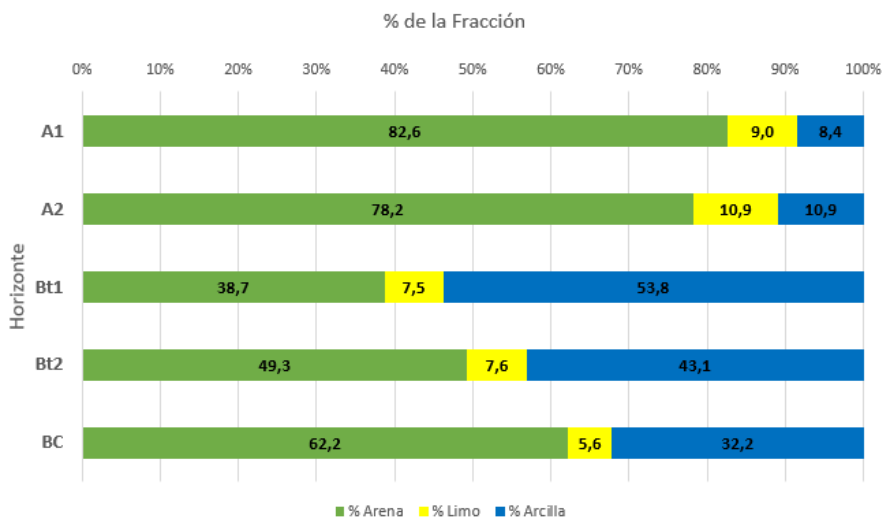


Figura 20. Porcentaje de las fracciones por horizonte.

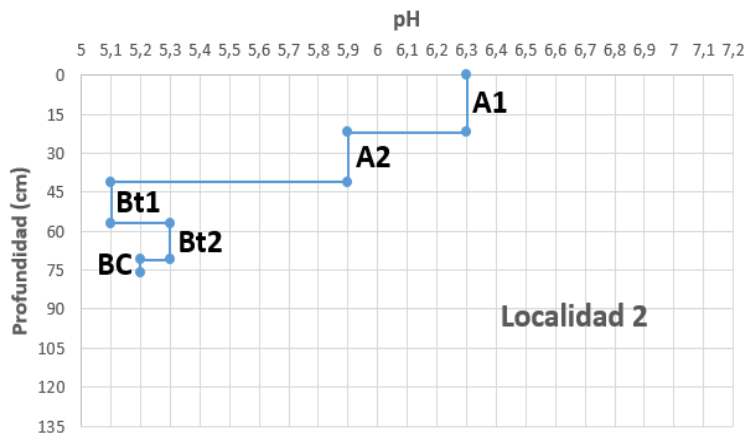


Figura 21. pH por horizontes en función de la profundidad.

3.3.1.3 Localidad 3 - Glencoe

Corresponde al grupo 1.10b, que de acuerdo al visor de CONEAT, no es un suelo de Prioridad Forestal. Tiene una profundidad de aproximadamente 80 cm, de textura arcillosa y fertilidad natural media.

De acuerdo a la información general proporcionada por personal de la UE de INIA Glencoe, el suelo de dicho establecimiento se divide en: 33% superficial rojo, 33% superficial negro y 34% suelos profundos. Además, presenta una fertilidad variable (de media a alta) y pedregosidad variable. En tanto a las pendientes, estas no superan el 1%⁵.

En tanto al agua potencialmente disponible, la georreferenciación indicó un rango de 22 a 30 mm para esta localidad, aunque no corresponde con la profundidad y textura del perfil del suelo considerado dado que Califra y Molfino tomaron los suelos dominantes de la región en base a la Carta 1:1000000 (Litosol de 30cm de profundidad). Por lo que el APD para esta localidad estaría próxima a los 140mm.

A continuación se presentan de manera esquemática la secuencia de horizontes en el perfil del suelo (figura 22), así como las distintas fracciones (arcilla, limo y arena) por horizonte (figura 23) y la variación del pH en función de la profundidad (figura 24).

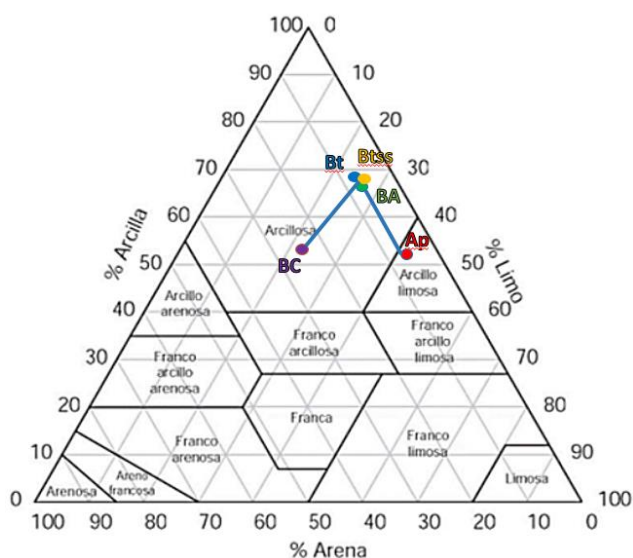


Figura 22. Triángulo Textural de USDA en el cual se observan los puntos que corresponden a las fracciones de cada horizonte del perfil del suelo.

⁵ Comunicación vía mail con Ing. Agr. (MSc) G. Balmelli de INIA Tacuarembó.

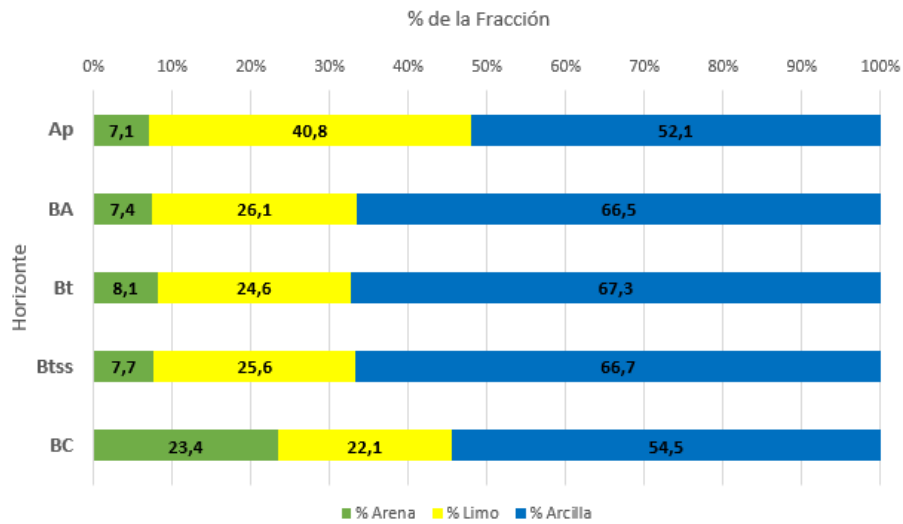


Figura 23. Porcentaje de las fracciones por horizonte.

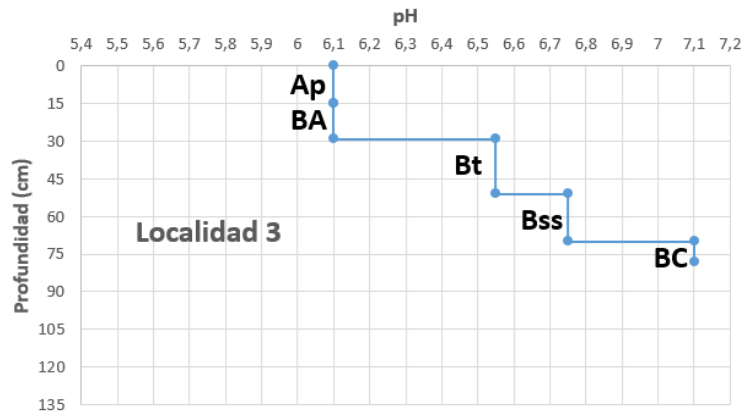


Figura 24. pH por horizonte en función de la profundidad.

3.3.1.4 Aptitud forestal

A modo complementario, se georreferenciaron las tres localidades respecto al mapa de Sganga (1983) según la aptitud forestal y se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 25 y Tabla 10).

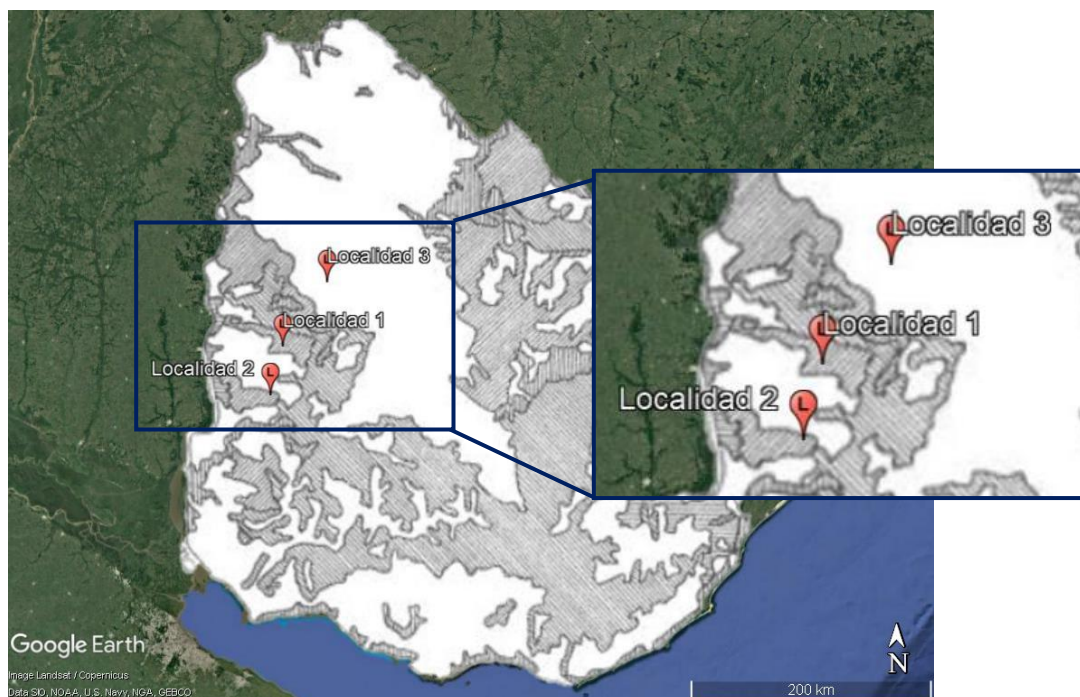


Figura 25. Georreferenciación con el mapa de Sganga, 1983.

Localidad	Aptitud Forestal según Sganga (1983)
1	Muy apta
2	Muy apta
3	Poco apta

Tabla 10. Aptitud forestal según localidad.

3.3.2 Variable clima

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización para las tres localidades en función de los parámetros de la variable clima, a decir: temperaturas, precipitaciones y radiación. Cabe mencionar, que en el caso de las temperaturas y precipitaciones, los datos tomados de KNMI fueron verificados mediante un análisis de correlación contra los datos disponibles de las estaciones de INUMET más cercanas.

3.3.2.1 Temperaturas

Para la temperatura media anual, los coeficientes de correlación del análisis entre los datos simulados de KNMI y los de las estaciones más cercanas a las tres localidades resultaron en 0,74 para la localidad 1; 0,90 para la localidad 2 y 0,65 para la localidad 3. Además se corroboraron los datos de KNMI con el mapa de temperatura media anual (del 1980 al 2009) de la Caracterización Climática de Uruguay, mostrando una adecuada correspondencia con las isothermas.

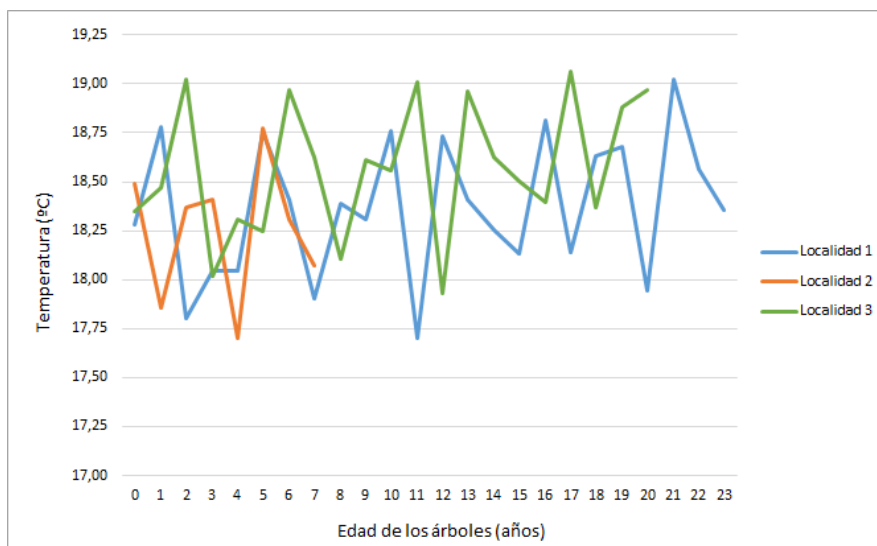


Figura 26. Temperatura media anual según el período de crecimiento de los árboles.

En la figura 26, se muestra la temperatura media anual (en °C) a la que estuvieron sometidos los árboles de cada localidad durante su tiempo de vida. Se observa que las diferencias son pequeñas y que la mayor es de 1,15 °C (en el año 11) entre la localidad 1 y 3.

En las figura 27 y 28 se presentan los resultados de las temperaturas máximas y mínimas promediadas para cada año de vida de los árboles. Más adelante, en la sección 3.3.3, se presentan los resultados de los análisis de varianza que se realizaron para determinar si existen diferencias significativas entre las localidades.

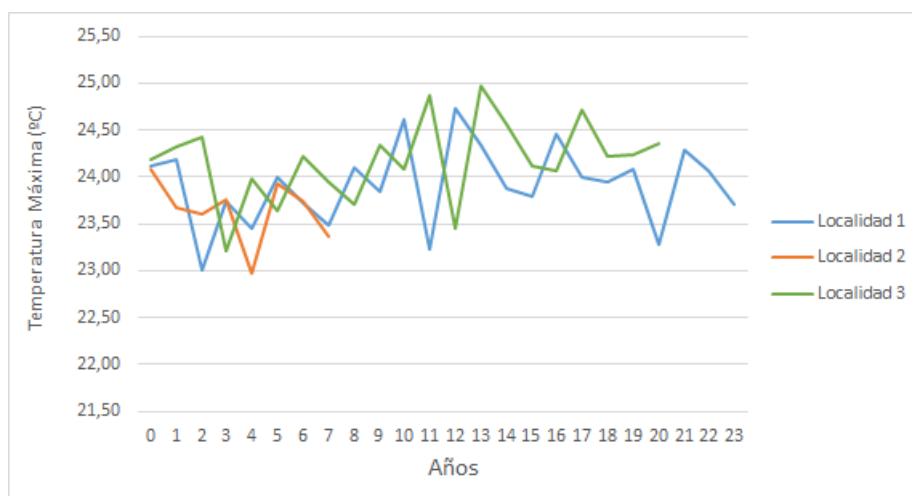


Figura 27. Temperatura máxima anual para las localidades según la vida de los árboles.

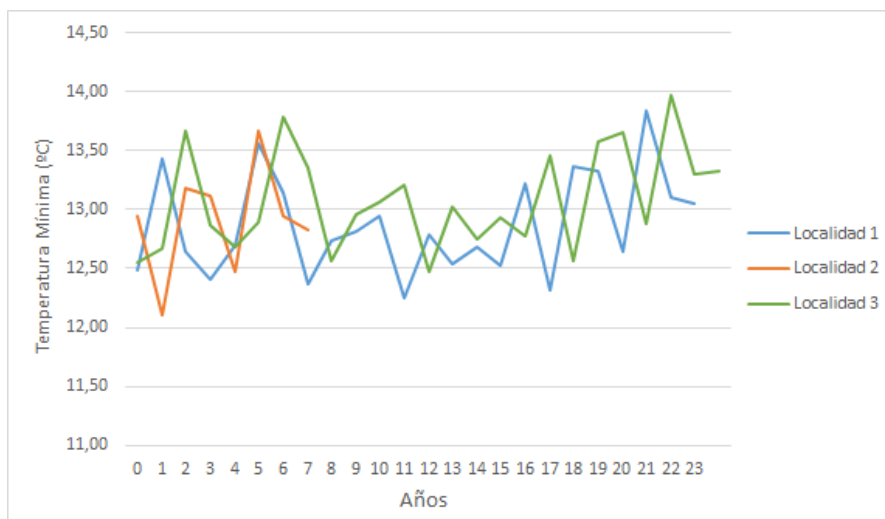


Figura 28. Temperatura mínima anual para las localidades según la vida de los árboles.

3.3.2.2 Precipitaciones

Al igual que en la temperatura, se realizó un análisis de correlación entre los datos de KNMI y los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas a cada localidad, obteniendo una correlación del orden de 0,75 a 0,82, la cual es buena. Por otro lado, se corroboró con el mapa de precipitaciones acumuladas de la Caracterización Climática de Uruguay que los datos simulados de KNMI están de acuerdo a las isoyetas del territorio uruguayo. En la sección de análisis estadístico, se presenta el análisis de varianza correspondiente a las precipitaciones.

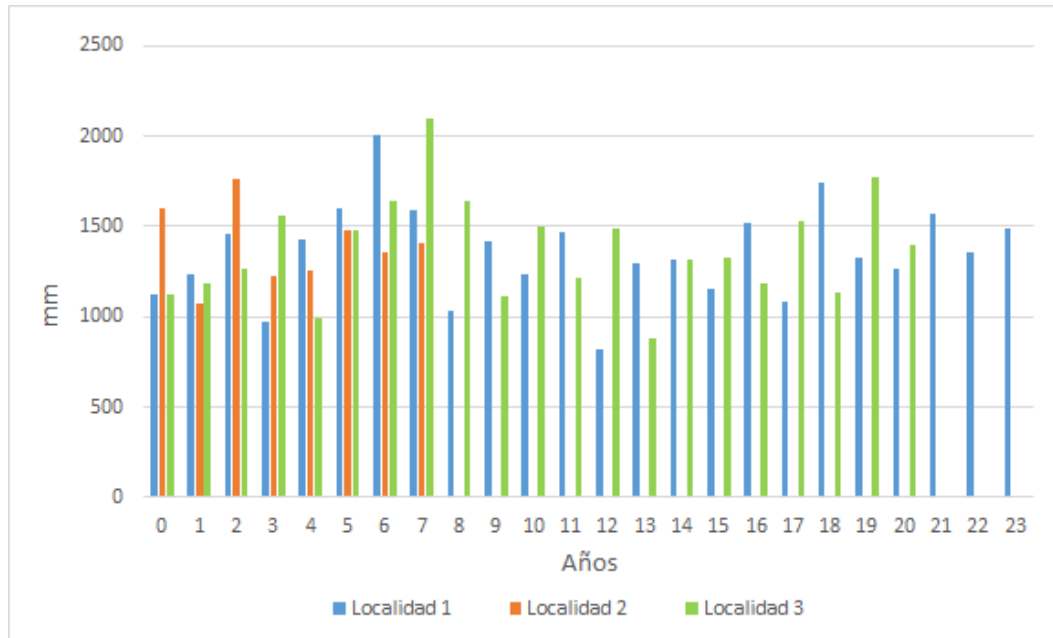


Figura 29. Precipitaciones acumuladas anuales (mm) por localidad según vida de los árboles.

El hecho de utilizar datos simulados de KNMI, tanto para temperaturas como para precipitaciones, tuvo ventajas como la utilización de una misma fuente para todas las localidades, además de que completa los datos que no están registrados en formato digital (del 1995 a 2002 para la localidad 3) cubriendo así toda la serie de tiempo para cada localidad. Otra ventaja es que disminuyó el error de los valores, ya que algunos métodos de cálculos no son los mismos para

cada estación meteorológica y serie de tiempo, por ejemplo algunos eran datos diarios, otros mensuales y algunas mediciones no eran registradas las 24 horas del día.

3.3.2.3 Radiación

A continuación se muestra de manera gráfica los valores de GHI (Irradiación global en plano horizontal (incerteza 2%)), GTI (Irradiación global en plano inclinado a 35° (azimut Norte) (incerteza 8%)) y DNI (Irradiación directa en incidencia normal (incerteza 8%)) para las tres localidades. Cabe mencionar que son promedios mensuales para el período comprendido entre 2000 y 2016. Al igual que las temperaturas y precipitaciones, se realizó un análisis de varianza para determinar si existen diferencias significativas entre las localidades (ver sección de análisis estadístico).

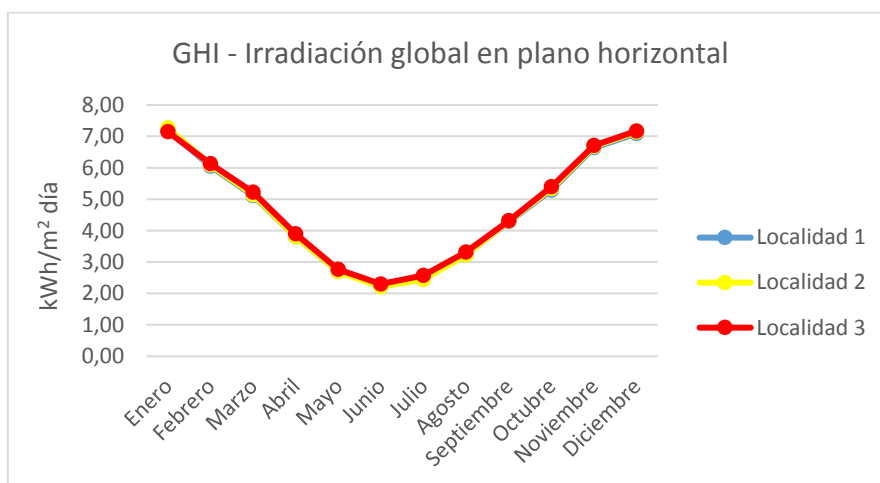


Figura 30. Gráfico de GHI para las tres localidades en el período entre 2000 y 2016.

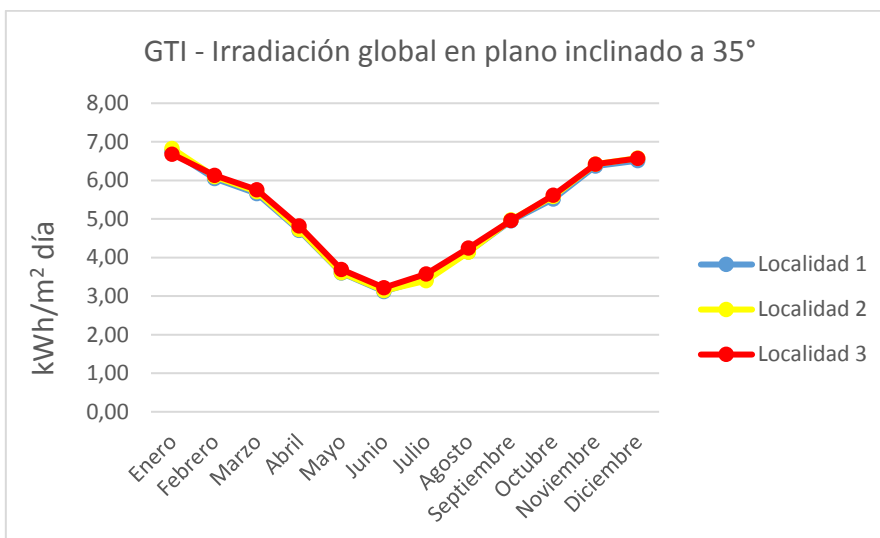


Figura 31. Gráfico de GTI para las tres localidades en el período entre 2000 y 2016.

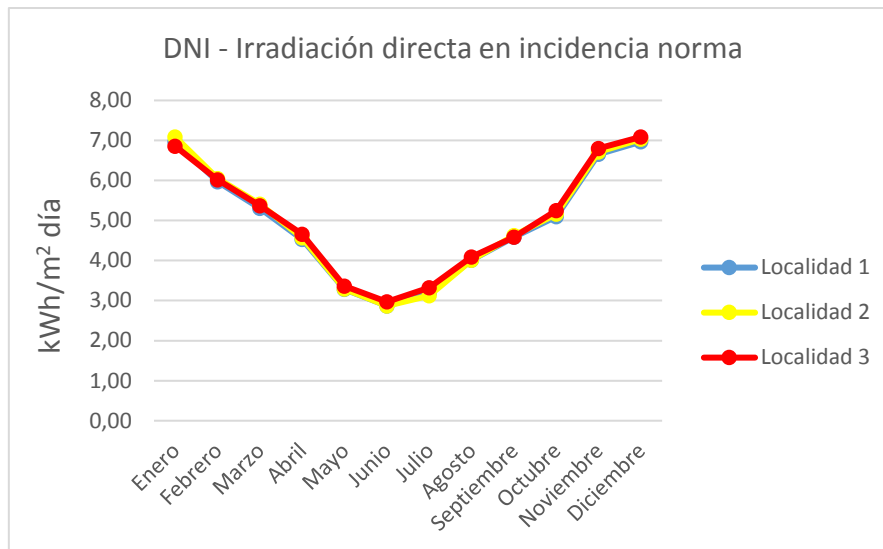


Figura 32. Gráfico de DNI para las tres localidades en el período entre 2000 y 2016.

3.3.3 Análisis estadístico

El modelo que se ajustó mejor a los datos y se utilizó para la comparación de las variables climáticas entre localidades fue un polinomio de cuarto orden, debido al comportamiento y las tendencias de estas variables (sinusoidal). Como resultado del análisis de varianza, no existen diferencias significativas entre las localidades a lo que refiere a las temperaturas, precipitaciones acumuladas y radiación (DNI, GHI y GTI), evaluadas para la vida de los árboles como también comparando los primeros 7 años, tanto para datos mensuales como anuales. Se tomaron los primeros 7 años de vida de los árboles de cada localidad para comparar los mismos períodos de crecimiento. A continuación se presentan los resultados del análisis de varianza indicando los p-valores los cuales fueron todos mayores al 5% (tabla 11).

Período de crecimiento	
Variable clima	p-valor
Temp. Min	0,9925
Temp. Max	0,9701
Temp. Med	0,9843
Prec. Ac.	0,9497
DNI	0,9917
GHI	0,9950
GTI	0,9904
Primeros 7 años	
Temp. Max 7	0,9849
Temp. Min 7	0,9196
Temp. Med 7	0,9907
Prec. Ac. 7	0,9782

Tabla 11. Resultado del análisis de varianza para las tres localidades indicando los p-valores para cada parámetro evaluado, por período de crecimiento (vida de los árboles) y para los primeros 7 años.

Por otro lado, las variables del suelo fueron analizadas desde una perspectiva de describir los posibles efectos sobre el crecimiento y desarrollo de los árboles en base a la bibliografía pertinente al tema y la influencia en las propiedades de la madera, lo cual se presenta a continuación en la discusión.

3.4 Discusión de la sección

Dentro de la variable suelo, el pH, que define la disponibilidad de nutrientes que pueden ser absorbidos por las raíces de los árboles [15], es similar en las localidades 1 y 2 (5,9 y 5,6 respectivamente), por lo que no habría un efecto distintivo en cada localidad. En tanto a la localidad 3, el pH es un poco más básico respecto a los anteriores (6,5). Sin embargo, estos pH están dentro del rango preferible por el *E. bosistoana* (entre 5,5 a 7) [22] por lo que este parámetro no sería una limitante para un adecuado crecimiento de los árboles en las tres localidades.

Al igual que el pH, las pendientes son muy similares y pequeñas (entre 1 y 4%). El efecto de la pendiente se puede resumir en que a mayor pendiente, menor será la infiltración de agua hacia el suelo (porque hay un mayor escurrimiento). De acuerdo a los antecedentes en Australia, el efecto de la pendiente sobre *E. bosistoana* se vio reflejado en el crecimiento en altura y sobrevivencia de los árboles [14], aunque eran lugares con pendientes de alrededor del 38%, por lo que son muy grandes comparadas a las de las localidades aquí estudiadas.

Respecto al agua potencialmente disponible, el rango en la localidad 1 es de 121 a 135 mm, el cual es un poco mayor a la de la localidad 2 que es de 106 a 120 mm; mientras que el rango para la localidad 3 la georreferenciación indica el menor rango, aunque la realidad es que está cercano a los 140mm (considerando unos 15 a 20mm de APD por cada 10cm de profundidad del suelo).

En general, existen suelos con gran capacidad de retención de agua disponible, pero en los que debido a ciertas características del perfil del suelo (escasa profundidad, presencia de horizontes poco penetrables por las raíces de los árboles), el crecimiento radicular está restringido a pocos centímetros de profundidad y los árboles podrían estar bajo riesgos como por ejemplo la sequía [65]. Esto indica que el suelo con mayor rango de agua disponible no siempre presentará las mejores condiciones para el crecimiento de los árboles (que influye en las propiedades de la madera), sino que se debe evaluar en paralelo con las propiedades de los suelos.

Si bien los suelos de las localidades son similares en tanto al pH y pendientes, se observan diferencias respecto a la profundidad. Mientras que las localidades 2 y 3 tienen profundidades parecidas para los suelos analizados (76 y 78 cm respectivamente), la localidad 1 tiene una profundidad de casi 50 cm más respecto a las dos primeras. La profundidad es una de las características más importantes del suelo ya que influye sobre la exploración y absorción de agua por parte de las raíces de los árboles. Relacionando la profundidad con el agua, los suelos profundos (como el de la localidad 1) tienen una mayor capacidad de retención de agua disponible que los suelos someros [65], como pueden considerarse los de la localidad 2 y 3.

En tanto a la composición de los horizontes del perfil del suelo, el porcentaje de arcilla del horizonte Bt de la localidad 2 es mayor que el de la localidad 1, siendo de 54% y 18% respectivamente. Por otro lado, el suelo de la localidad 3 presenta en sus horizontes texturas predominantemente arcillosas, lo que repercute notoriamente en la penetración de las raíces a horizontes más profundos, disminuyendo la exploración radicular lo que influye en el crecimiento de los árboles y por ende en las propiedades de la madera. Cabe mencionar que las raíces más profundas tienen como función principal el sostén y anclaje de los árboles al suelo, y que las raíces más cercanas a la superficie, son las encargadas de la absorción de agua y nutrientes.

Los espesores de los horizontes A y E de la localidad 1 representan aproximadamente la profundidad total del suelo de las localidades 2 y 3 (76 y 78 cm respectivamente), por lo que en la localidad 1 las raíces pudieron tener un mayor volumen de suelo a ser explorado dada las características y profundidades de los horizontes superficiales.

Los horizontes arenosos, tienen menor capacidad de retener agua debido a los macroporos que son los espacios (o separación) entre las partículas de las fracciones del suelo presentes. Por su parte, los horizontes con mayores porcentajes de arcilla, permiten una mayor retención de agua, pero puede dificultar la penetración de las raíces en esos horizontes. Este contraste se puede observar entre los suelos de las localidades 1 y 2 respecto a la localidad 3, donde este último, al tener mayor proporción de arcilla en sus horizontes, tendría mayor retención de agua disponible respecto a las dos anteriores, aunque no coincide con lo indicado en el mapa de la Caracterización Agroclimática de Uruguay, dado que la georreferenciación para esta localidad muestra que es muy bajo el rango de agua disponible.

Estas diferencias en tanto a la profundidad y la textura de cada horizonte, asociado a distintos rangos de agua potencialmente disponible para cada localidad, pudieron haber generado efectos sobre el crecimiento de los árboles y por ende en las propiedades de la madera, aunque esta aseveración solo sería válida al comparar las propiedades a la misma edad o períodos de crecimiento de los árboles.

Luego de la caracterización y del análisis estadístico respecto a la variable clima, no se observaron diferencias estadísticamente significativas a lo que refiere a las temperaturas, precipitaciones y radiación entre las localidades. Esto no quiere decir que no influyen sobre el crecimiento de los árboles (que repercute en las propiedades de la madera) sino que el efecto es el mismo en cada localidad, por lo que si existe diferencia entre las propiedades físicas y mecánicas, no se debe al clima.

Si existen diferencias estadísticamente significativas entre las propiedades de la madera entre localidades (lo cual se analiza en la próxima sección), las variables edad y suelo son las posibles causantes de estas diferencias. En este trabajo, a partir de la caracterización, se encuentra que dentro de la variable suelo las más contrastantes entre localidades son la profundidad, textura y agua potencialmente disponible.

4. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

La sección está destinada a presentar una introducción a las propiedades evaluadas en este trabajo, algunos antecedentes con *E. bosistoana* y otras especies del género *Eucalyptus*, además de la descripción de todos los procedimientos para cada tipo de ensayo según las respectivas normas técnicas empleadas.

4.1 Propiedades físicas

4.1.1 Densidad

La densidad de la madera es una propiedad física que hace referencia a la cantidad de materia leñosa por unidad de volumen [66]. Es uno de los parámetros más usados para la definición de los posibles usos en donde la resistencia se vuelve un aspecto importante, por ejemplo los usos estructurales; esto se debe a la estrecha relación que existe entre la densidad y las propiedades mecánicas de la madera [11], [67], [68] donde en general se establece que a mayor densidad, mejores serán las propiedades de resistencia mecánica [11], [67], [69].

Las propiedades físicas y mecánicas de *E. grandis* fueron estudiadas en Uruguay encontrándose coeficientes de correlación entre densidad básica vs MOE, MOR y compresión paralela de 0,64, 0,83 y 0,81, respectivamente [70]. Estos resultados demuestran la estrecha relación existente entre la densidad de la madera y las distintas propiedades mecánicas en el género *Eucalyptus*.

Las variaciones en la densidad básica de la madera a lo largo del fuste son menos notorias que las de la dirección radial. La tendencia más común observada es que la densidad aumente con el aumento de la altura del árbol [11], [12], aunque esto no se verifica siempre, existen casos distintos dependiendo la especie y zonas de plantación. Muchas especies muestran una variación tan leve con la altura que una muestra a la altura del pecho proporciona una estimación bastante precisa de las propiedades de la madera de todo el fuste [11]. Por lo cual, el método más simple es tomar una muestra de madera a la altura del pecho y relacionarla con las propiedades de la madera de todo el árbol.

La densidad básica según la posición en el radio para el *E. bosistoana* resultó ser mayor en zonas próximas a la corteza [10]. Este mismo resultado fue obtenido para estudios con *E. globulus* y *E. grandis* [12], [71]. La variación radial en las propiedades de la madera observadas a lo largo del fuste puede deberse principalmente a diferencias en la proporción de madera juvenil, zona de transición y madera adulta [71].

En la tabla 12, a modo de comparación, se presentan valores de densidad básica encontrados en la bibliografía para el *E. bosistoana* y para otras especies del género *Eucalyptus*:

Especie	Densidad básica [kg/m ³]	Características	Referencia
<i>E. bosistoana</i>	820	42 años - Cerro Largo, Uruguay	[10]
	676	7 años - Guaíba, RS, Brasil	[72]
	780 - 980	Australia	[26]
<i>E. grandis</i>	395	7 años - Guaíba, RS, Brasil	[72]
	430	18 años - Río Negro, Uruguay	[71]
	550	16 años - Rivera, Uruguay	[70]
<i>E. globulus</i>	572	7 años - Guaíba, RS, Brasil	[72]
	468 - 522	11 años - Lavalleja, Uruguay	[73]
	728	16 años - Australia	[74]

Tabla 12. Densidad básica de *E. bosistoana* y otras especies del género *Eucalyptus*.

Las características del suelo influyen sobre el crecimiento de los árboles los cuales a su vez afectan las propiedades de la madera, aunque para la densidad básica, las variaciones pueden ser pequeñas entre árboles dentro de un área geográfica determinada [11]. La verdadera situación es que todos los factores del clima y del suelo interactúan y a veces resulta complicado encontrar un efecto causal para cada factor de manera individual [12].

4.1.2 Estabilidad dimensional

Es una propiedad que define el grado en que la madera se contrae y se expande con los cambios en el contenido de humedad. Da una indicación de cómo se comportará la madera en servicio y sirve para adecuar los usos de los productos maderables [75], además de permitir comparaciones entre diferentes tipos de madera (entre especies), diferentes orígenes y zonas de crecimiento [76].

El agua en la madera se puede presentar en tres formas: agua libre (que se ubica en el lumen de las células); agua ligada o higroscópica (presente en las paredes celulares) y el agua de constitución (forma parte de la estructura molecular) [77]. Cuando la madera inicia un proceso de secado, empieza a perder agua libre y después el agua higroscópica. Cabe mencionar que el agua de constitución no se pierde sino por combustión de la madera (cuando se quema). Los cambios en las dimensiones de una pieza de madera ocurren a partir del punto de saturación de las fibras (PSF), que por lo general está cercano a un 30% de humedad, y continúa hasta el 0% de humedad [10].

Existe un determinado valor de humedad llamado humedad de equilibrio higroscópico (HEH) que se define como el contenido de humedad que tiene la madera para determinadas condiciones de temperatura y humedad relativa del aire, dado al intercambio de vapor de agua que se realiza entre la madera y la atmósfera que la rodea [78]. Es de gran importancia alcanzar contenidos de humedad cercanos a la HEH de acuerdo al uso que se le quiera dar a la madera (en interiores o exteriores) y evitar así que sufra cambios dimensionales y tensiones internas ocasionando defectos y mala calidad del producto. Para el *E. grandis* en Uruguay, el HEH se ubica entre 14 y 16% de contenido de humedad, aunque este rango puede estar comprendido entre 9 y 18% dependiendo si el uso es para interiores cerrados calefaccionados o para exteriores al descubierto, respectivamente [78].

La estabilidad dimensional de la madera puede ser comúnmente cuantificada aunque los métodos para medir esta propiedad no están estandarizados y hay poco acuerdo sobre los métodos de prueba apropiados [76].

Es posible determinar las contracciones volumétricas a partir de las contracciones en el sentido radial, tangencial y longitudinal de una pieza de madera. Por lo general, la mayor contracción se da en el sentido tangencial y radial, y en menor medida en el sentido longitudinal (que en algunos casos se considera despreciable) [10], [68]. La contracción se calcula en base al contenido de humedad en estado verde (o cualquier otro %) respecto al estado anhidro. En tanto al hinchamiento lineal, se relacionan los cambios de las dimensiones lineales partiendo de las dimensiones del estado anhidro a otro de mayor contenido de humedad [66].

A partir de los coeficientes de anisotropía (relación entre la contracción tangencial y radial) existen diversos criterios que permiten clasificar la estabilidad dimensional y determinar los usos maderables [66], [75]. Cuanto más grande es la relación expresada como el cociente entre la contracción o hinchamiento en la dirección tangencial y la radial, mayor es la magnitud de los defectos, como pueden ser las deformaciones y grietas. Valores de coeficiente de anisotropía que se encuentran entre 1,2 y 1,5 pueden considerarse excelentes; entre 1,6 y 1,9 se clasifican

como normales, y coeficientes mayores a 2,0 generan dificultades para determinados usos de la madera [66], [79].

Para *E. bosistoana* en Uruguay, se han encontrado coeficientes de contracción para la dirección radial de 6,5%; 12% en la dirección tangencial; 0,2% en longitudinal y un coeficiente de contracción volumétrico de 17,7%. En tanto al coeficiente de anisotropía se obtuvo un valor de 1,86 el cual clasifica a la madera de esta especie como apta para secado o normal [10].

4.2 Propiedades mecánicas

Definen la aptitud y capacidad para resistir cargas externas, excluyendo los esfuerzos debidos a las tensiones internas producto de los cambios de humedad de la madera [80]. La madera es un material anisotrópico, es decir, tiene propiedades mecánicas diferentes según la dirección que se considere: longitudinal, radial y tangencial (Figura 33) [81].

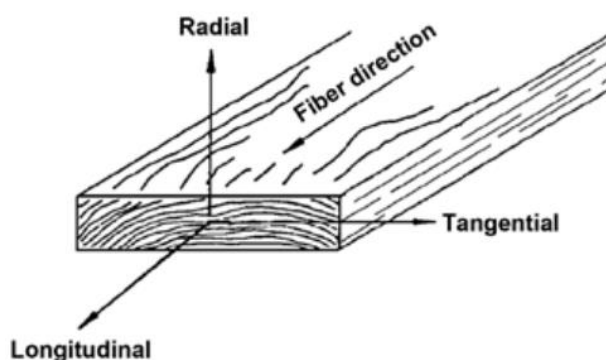


Figura 33. Esquema representativo de las tres direcciones (longitudinal, radial y tangencial) en una tabla de madera. Extraído de [81].

En los ensayos para determinar las propiedades mecánicas de la madera se pueden utilizar métodos destructivos o no destructivos. Dentro de un ensayo destructivo, las probetas a ensayar pueden ser de pequeñas dimensiones y sin defectos (nudos y rajaduras) o con tamaños comerciales (vigas, tablas) [66]. Se ha demostrado que existe una influencia considerable del tamaño de las muestras donde las más grandes (vigas, tablas) se rompen a una tensión promedio más baja que las muestras más pequeñas (probetas pequeñas) [68]. A su vez, se buscan probetas libres de nudos ya que disminuyen la cantidad de material resistente y se interrumpe la continuidad de las fibras, dando lugar a la aparición de tensiones tangenciales que son causantes de la disminución de la resistencia [66].

Las propiedades mecánicas consideradas en este trabajo fueron: flexión estática, compresión paralela a la fibra y dureza (en sentido radial, tangencial y longitudinal).

4.2.1 Factores que afectan las propiedades físicas y mecánicas

La orientación de las fibras es uno de los factores que influyen en la resistencia de la madera [66]. En el caso de la dureza, es mayor en sentido longitudinal que en el radial y tangencial. Entre estos dos últimos la dureza es mayor en dirección radial, debido a la resistencia que ofrecen los anillos de crecimiento, por lo que también una adecuada orientación de estos es de suma importancia.

La humedad de la madera es otro factor que influye principalmente en la densidad, que a medida que aumenta, la densidad disminuye [10], [66]. También, la resistencia y rigidez de la madera aumentan linealmente al disminuir el contenido de humedad por debajo del PSF; por encima de este no hay grandes cambios [68].

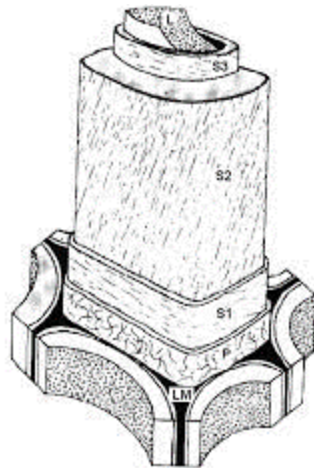


Figura 34. Esquema de la pared celular donde se detallan la pared secundaria (capas S1, S2 y S3), además de la laminilla media (LM), la pared primaria (P) y el lumen celular (L). Extraído de [82].

También el ángulo microfibrilar (AMF) es una característica importante que influye en las propiedades de la madera, como en la resistencia mecánica y la rigidez [83]. Las microfibrillas constituyen las unidades fundamentales de la pared celular de los elementos anatómicos de los árboles. En las capas de la pared celular, principalmente en la subcapa S2, las microfibrillas forman ángulos con el eje de la fibra (figura 34). Este ángulo o inclinación es importante ya que define varias propiedades de la madera, afectando principalmente la resistencia y la rigidez, donde los ángulos pequeños son responsables de una mayor resistencia, mientras que los ángulos más grandes son responsables de una mayor elasticidad de la madera [83].

Si la subcapa S2 está formada por microfibrillas orientadas casi paralelas (bajo ángulo microfibrilar) al eje de la célula y del árbol, contribuirán a la resistencia mecánica de la madera ante las acciones de los esfuerzos de compresión y de tensión involucradas en la flexión estática [80].

4.2.2 Flexión estática

Un elemento sólido sometido a flexión, presenta una distribución de esfuerzos de compresión, tracción y cizalla (figura 35). Los ensayos de flexión estática son uno de los principales métodos para evaluar las propiedades mecánicas de la madera y se realizan para determinar el límite de resistencia de los materiales [84]. Con los resultados de los ensayos se pueden determinar el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR).

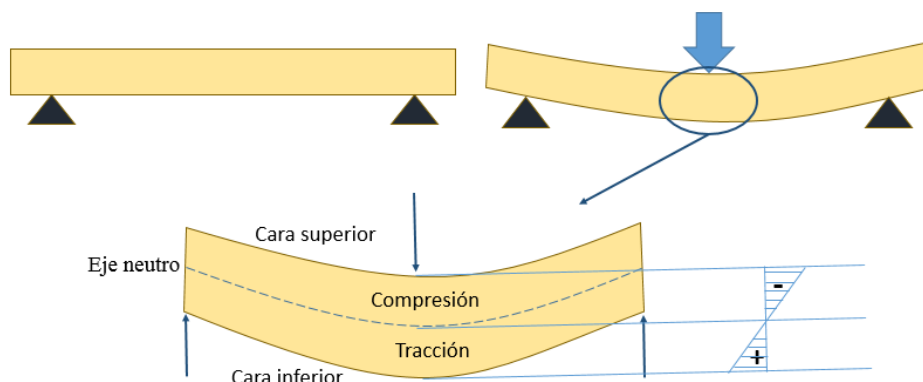


Figura 35. Probeta sometida a flexión estática. Se indican las zonas bajo compresión y tracción.

El MOE en flexión es la medida de rigidez de la madera y su cálculo se basa en la razón entre el esfuerzo por unidad de superficie y la deformación por unidad de longitud que experimenta una probeta expuesta a flexión. Hace referencia a un valor indicativo de la rigidez

del material y es aplicable solamente a condiciones de trabajo que se encuentren dentro de la zona elástica de la curva carga vs deformación (figura 36). Por otro lado, el MOR en flexión, corresponde a la tensión unitaria máxima que soporta un material antes de que se produzca la falla. Ante un incremento de carga sobre el material esto provocará la rotura del mismo [80].

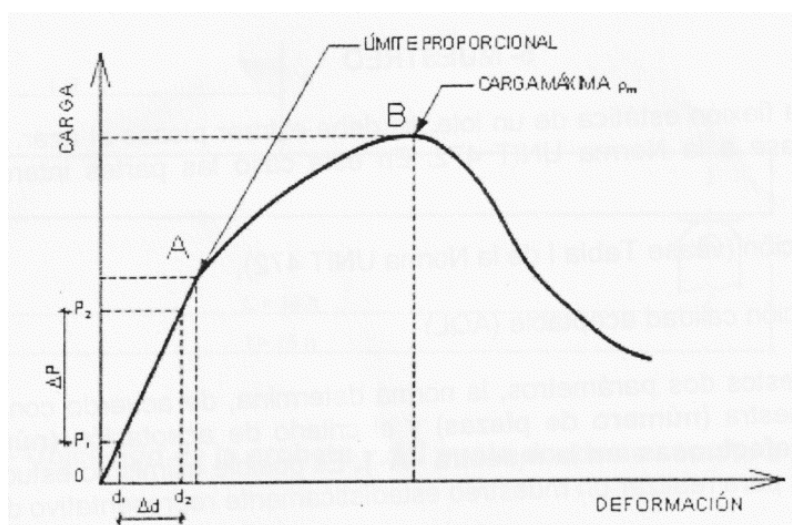


Figura 36. Gráfico de carga-deformación para una probeta sometida a flexión. Extraído de [85].

La respuesta de una probeta a un esfuerzo de flexión estática depende de la densidad, del contenido de humedad y de la dirección de las fibras de la madera, como también de la configuración y velocidad de aplicación de carga [84]. El aumento en el contenido de humedad reduce la resistencia de la madera, específicamente sobre las propiedades de flexión y compresión paralela a la fibra [86].

En la tabla 13, se observa valores de MOE y MOR de flexión para el *E. bosistoana* que son superiores a otras especies del género *Eucalyptus*, que se utilizan comercialmente y cuentan con grandes plantaciones y mejoras genéticas, tanto a nivel nacional como internacional.

Especie	MOR [MPa]	MOE [MPa]	Características	Referencia
<i>E. bosistoana</i>	146,2	18738	42 años - Cerro Largo, Uruguay	[10]
	163,0	21000	Australia	[18]
<i>E. grandis</i>	80,0	11300	16 años - Rivera, Uruguay	[70]
	71,9	12086	38 años - Sao Paulo, Brasil	[86]
<i>E. globulus</i>	102,8	10296	10 a 12 años - Argentina	[87]
<i>E. camaldulensis</i>	112,7	9904	Argentina	[87]

Tabla 13. MOR y MOE para *E. bosistoana* y otras especies del género *Eucalyptus*.

4.2.3 Compresión paralela a la fibra

Se define como el máximo esfuerzo que un material puede soportar bajo una carga de aplastamiento en el mismo sentido de la dirección de las fibras de la madera [88]. La madera presenta una alta resistencia a este tipo de esfuerzo ya que las fibras están orientadas en el eje longitudinal, coincidiendo con la orientación de las microfibrillas que constituyen la capa media de la pared celular, la cual es la de mayor espesor [80].

Durante el ensayo, las fibras reciben la carga a través de su eje longitudinal y la ruptura generalmente ocurre debido al colapso de las fibras. Se producirá un acortamiento de las fibras disminuyendo así la longitud de la pieza de madera y un aumento en la sección transversal de la misma [66], [68].

Desde el punto de vista anatómico, dado que las subcapas S1 y S3 de la pared celular forman una envoltura de microfibrillas entrecruzadas y de mayor ángulo microfibrillar sobre la subcapa S2, ésta proporciona resistencia y rigidez frente a la compresión paralela, disminuyendo en alguna medida el pandeo de las microfibrillas de la subcapa S2 [80].

A modo de ejemplo y comparación respecto a otras especies, se presentan resultados de resistencia a la compresión paralela a la fibra en la tabla 14. Al igual que para el MOE y MOR de flexión, la resistencia a la compresión es mayor comparada a otras especies del género *Eucalyptus*. Además, solamente el *E. tereticornis* en Argentina se asemeja al *E. bosistoana* evaluado en Uruguay y Australia.

Especie	Resistencia a la compresión [MPa]	Características	Referencia
<i>E. bosistoana</i>	66,1	42 años - Cerro Largo, Uruguay	[10]
	70,0	Australia	[89]
<i>E. grandis</i>	44,5	16 años - Rivera, Uruguay	[70]
	40,1	8 a 41 años - São Paulo, Brasil	[86]
	34	10 a 12 años - Argentina	[87]
<i>E. camaldulensis</i>	56,1	Argentina	[87]
<i>E. tereticornis</i>	68,5	Argentina	[87]
<i>E. globulus</i>	50,1	Argentina	[87]

Tabla 14. Valores de resistencia a la compresión paralela a la fibra para *E. bosistoana* y otras especies del género *Eucalyptus*.

4.2.4 Dureza

Esta propiedad se define como la resistencia que ofrece la madera a la penetración de un cuerpo rígido mientras se indenta lentamente sobre ella [66]. La determinación de la dureza se lleva a cabo en las caras longitudinal, radial y tangencial de una probeta de madera libre de defectos.

En Uruguay, el *E. bosistoana* se puede considerar como una especie de madera muy dura, ya que los valores de dureza encontrados son mayores a 98,0 MPa [10]. Por otro lado, se ha observado que existe una correlación alta y positiva entre la dureza y la densidad básica de *E. grandis*. Además, no solo la dureza sino también las restantes propiedades mecánicas de esta especie presentaban altas correlaciones con la densidad [70].

4.2.5 Obtención de probetas

Uno de los mayores problemas en el procesamiento de la madera de *Eucalyptus* es la presencia de importantes rajaduras y deformaciones en las trozas, las cuales son ocasionadas por las tensiones de crecimiento y por el secado de la madera [90]. Las tensiones de crecimiento se deben al crecimiento de las células que produce el cambium y que durante su desarrollo tienden a expandirse lateralmente y a contraerse longitudinalmente que, al ser impedido por las células formadas en años anteriores, se generan tensiones [91].

Cuando se talan los árboles, cortan en trozas y toda la manipulación posterior, las tensiones que se encontraban equilibradas durante el crecimiento se liberan de manera repentina. Esto genera un conjunto de deformaciones y grietas a lo largo y extremos de las trozas. Esto se debe a la redistribución y transformación de las tensiones longitudinales en tensiones transversales a la troza [91].

Una manera de cuantificar las tensiones de crecimiento es a través de mediciones indirectas de sus efectos en las trozas. Se puede calcular el índice de rajado [90] por medio de la siguiente ecuación (1):

$$IR = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i * L_i)}{\frac{\pi * D^2}{4}} * 100 \quad (1)$$

Donde L_i es el largo y A_i es el ancho de una rajadura presente en una cara transversal de la troza, y D es el diámetro promedio de una cara de la troza. Este índice es calculado en las primeras 48 horas de talado el árbol y refleja el grado en el que se liberan las tensiones de crecimiento ocasionando las rajaduras en las trozas.

Por otro lado, es importante el proceso de secado de la madera el cual es un factor determinante en las rajaduras, ya que si se someten a altas temperaturas e intervalos de tiempo largos, las rajaduras suelen aumentar en dimensiones. La madera de *Eucalyptus* no sólo es lenta en secar sino que es susceptible a defectos que se producen durante el proceso de secado, generando grietas; deformaciones como la encorvadura, torcedura y acanaladura; colapso; nudos sueltos o agrietados, a lo largo de la troza o tabla de madera [92].

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Ensayos

A continuación se presenta la metodología para la obtención de los materiales, así como la descripción de los ensayos físicos y mecánicos a realizar según cada norma técnica empleada, las cuales especifican la forma y las dimensiones de las probetas, además de la velocidad de aplicación de las cargas y la manera en la que se distribuye la misma sobre el material a ensayar. En el caso de este trabajo se utilizan las normas técnicas ASTM D2395 [93], D143 [94] y D4442, y de manera complementaria la UNIT 1137 [85] y UNIT 363 [95].

4.3.1.1 Recolección de las muestras

Las trozas de las localidades 1 y 2 fueron apeadas por personal del Forestal Oriental - UPM en el año 2019, por lo que al inicio de este trabajo tenían un año de almacenamiento en las instalaciones del CENUR Noreste (Sede Tacuarembó). Por otro lado, las trozas de la localidad 3 fueron cosechadas por el personal de INIA Glencoe en el año 2015, por lo que pasaron aproximadamente 5 años en depósito antes de ser ensayadas. De las trozas disponibles, se seleccionaron las basales (Figura 37). Se calculó el índice de rajado (IR) de las trozas estudiadas en este trabajo, con el propósito de cuantificar de alguna manera el estado en el que se encontraban inicialmente, ya que (como se mencionó en la sección anterior) este índice es calculado dentro de las primeras 48 horas luego de talado el árbol.



Figura 37. Trozas basales de los árboles de las 3 localidades.

4.3.1.2 Preparación y acondicionamiento de probetas

Luego de la selección de las trozas a utilizar, se cortaron en tablones mediante motosierra (Figura 38) o aserradero móvil WoodMizer LT-28 por parte de personal de INIA. A partir de los tablones, se obtuvieron probetas sin defectos (sin nudos ni rajaduras aparentes) con las dimensiones correspondientes que se detallan en las normas para cada respectivo ensayo con una sierra circular de mesa y sierra sensitiva (Figura 39).



Figura 38. Izquierda: corte con motosierra. Derecha: tablas resultantes del corte con aserradero móvil.

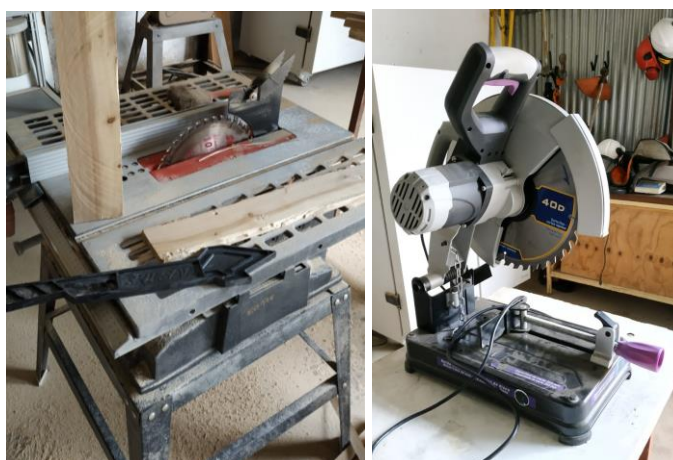


Figura 39. Izquierda: sierra circular de mesa. Derecha: sierra sensitiva.

Para asegurar un resultado correcto en los ensayos es muy importante una adecuada orientación de los anillos de crecimiento y que la dirección de las fibras sea paralela a las caras de las probetas. Por tal motivo, se tuvo especial cuidado al elaborar las probetas tal que dos lados opuestos tuvieran cara tangencial (paralelas a los anillos de crecimiento) y los otros dos lados orientación radial (Figura 40). La obtención y elaboración de probetas fue parte de este trabajo, el cual fue realizado directamente por el autor.



Figura 40. Izquierda: probeta con una adecuada orientación de los anillos de crecimiento. Derecha: fibras paralelas a los cantos.

4.3.1.3 Contenido de humedad

La determinación fue realizada con pequeños trozos de madera resultantes del proceso de corte de las tablas de *E. bosistoana*, los cuales se consideraron como representativas del contenido de humedad inicial de las trozas.

Se tomó como base lo establecido por la norma ASTM D4442. Inicialmente se pesaron las probetas, valor correspondiente a la masa húmeda. Luego, se colocaron en estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta alcanzar peso constante, se dejó enfriar las probetas en el desecador el cual impide la absorción de la humedad ambiente para luego pesarlas nuevamente, siendo esta última la masa seca (o anhidra). Con la siguiente ecuación se calculó el contenido de humedad:

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{masa húmeda (g)} - \text{masa seca (g)}}{\text{masa seca (g)}} * 100 \quad (2)$$

Una vez determinadas las condiciones de humedad inicial de las trozas, se acondicionaron las probetas de los distintos ensayos a 25°C y 70% de humedad relativa ambiente en la cámara de climatización durante 3-4 semanas (Figura 41), alcanzando la humedad de equilibrio en todas ellas.



Figura 41. Probetas en cámara de climatización.

4.3.2 Propiedades físicas

4.3.2.1 Densidad básica

Previo al ensayo de densidad básica, se determinó el contenido de humedad inicial de las probetas. Las mismas tenían entre 12-15% de humedad, por lo que se sumergieron en agua destilada durante 48 horas para absorber agua y superar el PSF, alcanzando el estado de madera verde (figura 42). Esto se realizó para evitar la absorción de agua durante la inmersión en el ensayo de densidad, lo cual generaría un error asociado en el volumen de las probetas ensayadas.



Figura 42. Probetas en agua destilada para absorción, previo a ensayo de densidad básica.

La norma utilizada como referencia para llevar a cabo el ensayo fue la ASTM D2395. Se determinó el peso del agua previo a cada introducción de probetas ya que el método consiste en determinar el volumen verde de las probetas a partir de la diferencia de peso, lo que es equivalente al volumen desplazado de agua (considerando la densidad del agua como 1 g/cm^3).

Las probetas de dimensiones 25x25x100 mm fueron colocadas en un vaso de precipitado (de 2L de capacidad) con agua destilada. Mediante la utilización de una pinza, cada probeta se introdujo hasta apenas superar la inmersión y, sin tocar los bordes del recipiente, se liberó la probeta desde ese punto y se registró el peso con la balanza mientras la probeta descendía dentro del recipiente.

Para el caso de aquellas probetas que en vez de sumergirse flotaban, se colocaron las probetas en la mitad del recipiente y desde ese punto se liberaba y se registraba el peso mientras ascendía (figura 43).

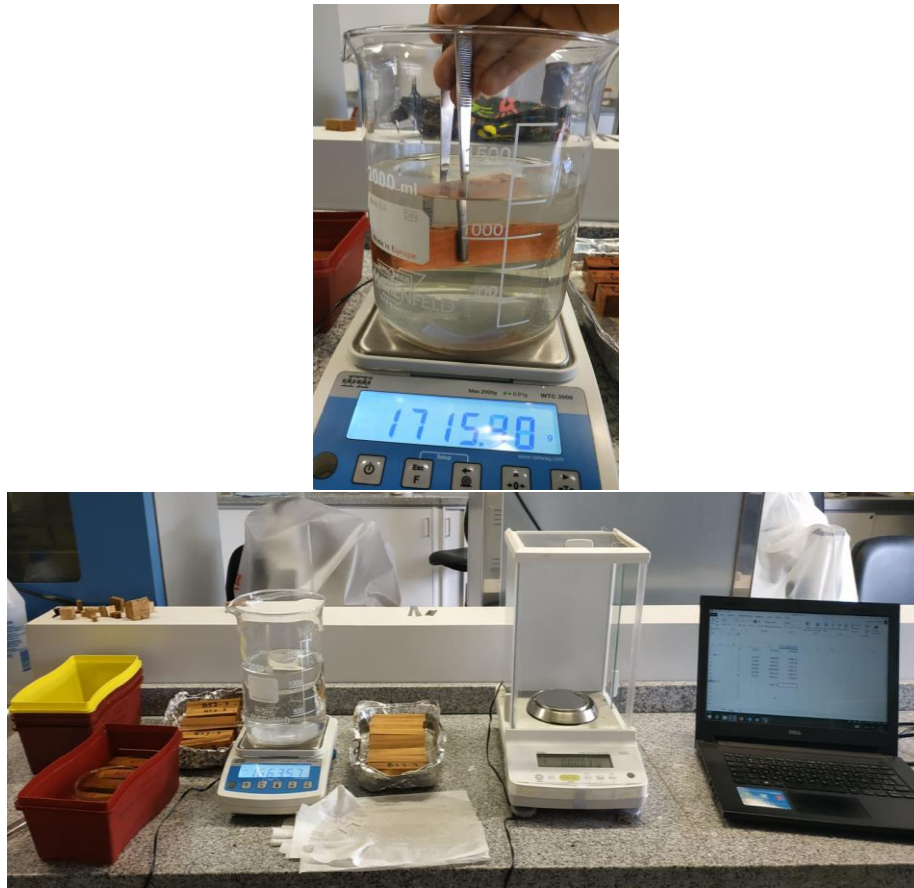


Figura 43. Materiales utilizados en el ensayo de densidad básica.

De esta manera, se determina el volumen verde de cada probeta y, con el valor de masa anhidra (seca), fue posible calcular la densidad básica con la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad Básica} = \frac{\text{masa anhidra (g)}}{\text{volumen verde (cm}^3\text{)}} \quad (3)$$

4.3.2.1.1 Variación de la densidad básica en el radio

Se cortó un disco de cada troza basal del cual se obtuvo un radio (que pasase por la médula) (Figura 44). De ese radio se extrajeron pequeñas probetas rectangulares de la zona próxima a la médula, de la zona media y de la zona cercana a la corteza. El ensayo para obtener la densidad básica es el mismo que se detalló en el punto anterior de esta sección. De esta manera, fue posible determinar la variación de densidad básica en la dirección radial (de médula a corteza) de las trozas.

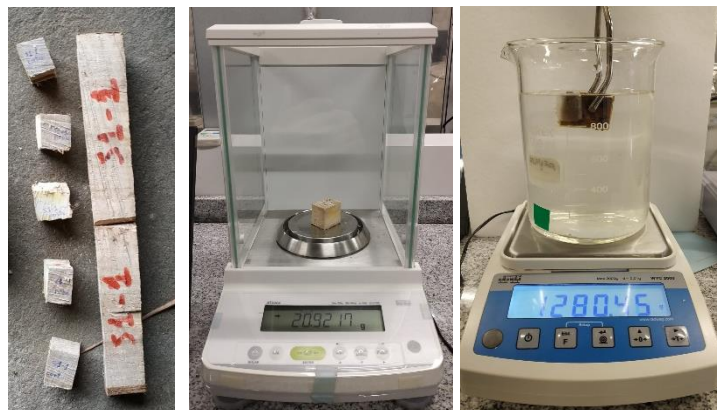


Figura 44. Ensayo de variación de la densidad básica en sentido radial.

4.3.2.2 Densidad anhidra

Las probetas luego de alcanzar peso constante en la estufa a 105 °C, se pesaron con balanza analítica y se midieron con calibre las dimensiones (espesor, ancho y largo) (Figura 45), para calcular masa anhidra y el volumen anhidro, respectivamente. Con estos datos, se calculó la densidad anhidra con la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad Anhidra} = \frac{\text{masa anhidra (g)}}{\text{volumen anhidro (cm}^3\text{)}} \quad (4)$$



Figura 45. Medición de las dimensiones de las probetas con calibre.

4.3.2.3 Estabilidad dimensional

El procedimiento se basó en la medición de los cambios en las dimensiones de las probetas a diversos contenidos de humedad. Para este ensayo, las probetas tenían dimensiones aproximadas de 25x25x30 mm.

Se obtuvieron tres probetas para cada árbol de las tres localidades, de las cuales se midieron las dimensiones en la dirección radial y tangencial (tres medidas en cada dirección) en el mismo punto de cada probeta utilizando un calibre, y la masa con balanza analítica. Se colocaron en agua destilada durante una a dos semanas (Figura 46) para llegar a un estado de saturación, y nuevamente se determinaron la masa y las dimensiones. Luego, se pasó a cámara de climatización a 25°C y 70% de humedad, durante una a dos semanas más.



Figura 46. Probetas de estabilidad dimensional sumergidas en agua destilada.

Se pesaron las muestras y pasaron a estufa. Para que este tratamiento no tuviera un incremento abrupto de temperatura que pudiese dañar la madera, se llevó gradualmente la temperatura desde 50 a 80°C, y luego a 105°C al cabo de 4-5 días. Nuevamente se determinaron las dimensiones y masa. Con estas medidas (estado anhidro) fue posible calcular el contenido de humedad en cada etapa del procedimiento. Este es un ciclo del procedimiento para determinar la estabilidad dimensional.

Este procedimiento fue escogido como el mejor a aplicarse dentro de los distintos métodos que existen en la bibliografía, ya que no existe ninguna norma específica para este tipo de ensayo [76]. El cálculo para obtener el coeficiente de contracción lineal se realizó con la siguiente ecuación [95]:

$$C_n = \frac{d_{vn} - d_{an}}{d_{an}} \times 100 \quad (5)$$

Donde: C_n : contracción del estado verde al anhidro (%); n : orientación: radial, tangencial o longitudinal; d_{vn} : dimensión de la probeta a un dado contenido de humedad (mm); y d_{an} : dimensión de probeta en estado anhidro (mm).

Por otro lado, el coeficiente de contracción volumétrico fue calculado con la siguiente ecuación [66], [96]:

$$C_{vol} (\%) = [1 - (1 - C_t) * (1 - C_r)] \quad (6)$$

Donde C_{vol} , C_t y C_r son las contracciones volumétricas, tangencial y radial, respectivamente. Como ya se mencionó, la contracción longitudinal puede considerarse despreciable [10], [68], por lo que no fue considerada para este trabajo.

4.3.3 Propiedades mecánicas

4.3.3.1 Máquina de ensayos

Los ensayos mecánicos se realizaron en la máquina universal de ensayos marca Shimadzu, modelo AGS-100 ubicada en el CENUR Noreste - Sede Tacuarembó (Figura 47).



Figura 47. Máquina de ensayos Shimadzu AGS-100.

La máquina posee una capacidad máxima de carga de 100 kN y es a tornillo. Cuenta con una celda de carga de 100 kN con una precisión de $\pm 0.5\%$. Por otro lado, permite colocar distintos accesorios para realizar distintos ensayos como pueden ser: flexión en tres puntos, compresión, dureza, tracción, entre otros.

El ensayo se define y controla con el programa Trapezium X el cual es compatible con Windows 7 y 10. Con este programa se define: el tipo y los parámetros de control del ensayo, visualización del avance en tiempo real durante cada prueba, se almacenan los resultados y es posible además el análisis de los mismos.

Una vez finalizado cada ensayo, el software genera una planilla donde resume los resultados en formato PDF y a su vez permite que los resultados sean exportados en distintos formatos (.xlsx, .csv, .tas, entre otros), favoreciendo el procesamiento de datos a posterior, según el objetivo y necesidad del usuario.

4.3.3.2 Resistencia a la flexión estática

Se siguió el procedimiento descrito para el método primario presentado en la norma ASTM D143, donde las dimensiones de las probetas fueron de 25x25x410 mm en la cuales se aplicó una carga concentrada conocida en la mitad del tramo de la probeta apoyada en dos puntos. La carga se aplicó en la cara más cercana a la medula, como lo establece la norma. La separación entre soportes fue de 360mm (Figura 48) y la velocidad de aplicación de la carga fue de 3,5 mm/min. Previo al inicio del ensayo, se realizó una precarga de unos 22N en el centro de la probeta.

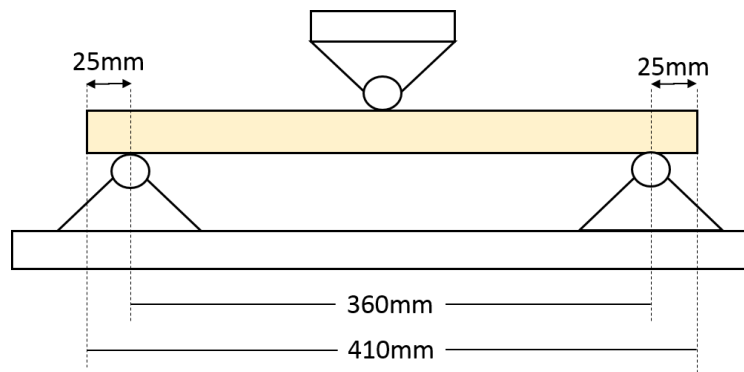


Figura 48. Esquema del ensayo de flexión estática en tres puntos.

La norma ASTM D143 describe las posibles fallas que pueden ocurrir en las probetas, las cuales se clasifican de acuerdo con la apariencia de la superficie fracturada y la manera en que se desarrolla la falla. Las superficies fracturadas se pueden dividir generalmente en "brash" y "fibrous", el primero indica una falla abrupta (d) y el segundo indica una fractura que muestra astillas (c) ("splintering" en inglés), como se muestra en la Figura 49.

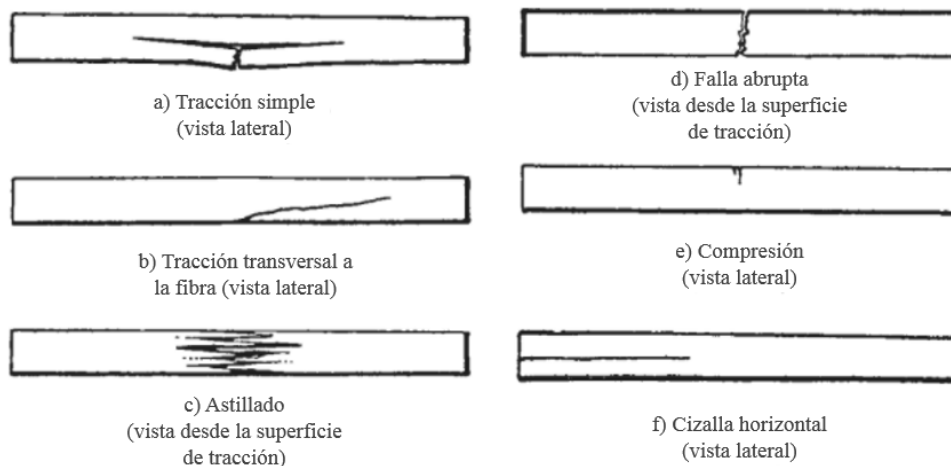


Figura 49. Tipos de fallas según norma ASTM D143 [94]

Calculo del módulo de elasticidad:

A partir de los resultados del ensayo, se puede calcular el módulo de elasticidad y de rotura, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$MOE = \frac{\Delta PL^3}{48\Delta d I} \quad (7)$$

Donde:

MOE = módulo de elasticidad, N/mm² (MPa)

ΔP = diferencia de carga entre dos puntos de la zona elástica, N

L = separación entre soportes, mm

Δd = diferencia entre deformaciones, mm

I = momento de inercia, mm⁴

En el cálculo del MOE de flexión, se consideró la zona elástica entre el 10 y 40% de la carga máxima. A partir de este intervalo, se definen los respectivos ΔP y Δd anteriormente descritos.

Calculo del módulo de rotura:

$$MOR = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (8)$$

Donde:

MOR = módulo de rotura, N/mm² (MPa)

P = carga máxima aplicada, N

L = separación entre soportes, mm

b = ancho de la probeta, mm

h = altura de la probeta, mm

4.3.3.3 Resistencia a la compresión paralela a la fibra

Como lo describe el método primario de la norma ASTM D143, las probetas utilizadas tenían dimensiones de 25x25x100 mm y la velocidad de prueba fue de 0.3 mm/min (Figura 50). Las caras de la probeta deben ser paralelas entre sí y perpendiculares al eje para garantizar que la carga que se aplica es de compresión y no aparecen (o minimizar) componentes de flexión, que disminuyen la resistencia de la madera [66], lo cual genera también ruido en los resultados.



Figura 50. Ensayo de compresión paralela a la fibra.

Las fallas por compresión se clasificarán de acuerdo con la apariencia de la superficie fracturada (Figura 51).

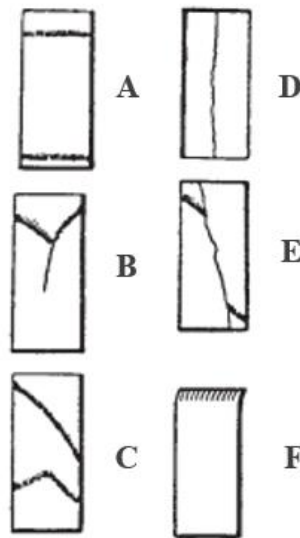


Figura 51. Clasificación de fallas en probetas en el ensayo de compresión paralela a la fibra. Adaptado de ASTM D143.

La clasificación de fallas bajo compresión paralela a la fibra se describe a continuación:

- **A. Aplastamiento (*Crushing*):** el plano de ruptura es aproximadamente horizontal.
- **B. División en cuña (*Wedge Split*):** la dirección de división, es decir, radial o tangencial, se debe anotar durante el ensayo.
- **C. Cizallamiento (*Shearing*):** el plano de ruptura forma un ángulo de más de 45° con la parte superior de la muestra.
- **D. *Splitting*:** ocurre en muestras que tienen defectos internos antes de la prueba y debe ser la base para la eliminación de la muestra.
- **E. Compresión y cizallamiento, paralelos a la fibra:** ocurre en zonas de fibras cruzadas y es otro motivo para el descarte de muestras.
- **F. Rodaje por los extremos:** está asociado con un exceso de contenido de humedad en los extremos de la muestra, un corte inadecuado de la muestra o ambos. Este es un tipo de ensayo no válido dado que generalmente está asociado con una carga reducida.

Previo a la realización de los ensayos y de acuerdo a guías de la norma, los extremos de las probetas fueron secadas con aire caliente (secador de pelo) durante 5 minutos aproximadamente, para reducir la posibilidad de falla tipo F (ensayo no válido).

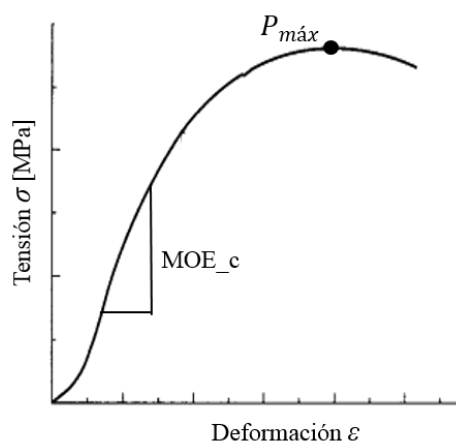


Figura 52. Diagrama de esfuerzo-deformación de una probeta sometida a compresión.

A partir del diagrama de la Figura 52, se calcula el MOR de compresión con la siguiente ecuación:

$$\text{MOR}_c = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad (9)$$

Donde $P_{m\acute{a}x}$ es la fuerza máxima aplicada y A_0 es la sección transversal de la probeta.

Por otro lado, la deformación ε , se calcula en función del desplazamiento d de la probeta y la longitud inicial L_0 , ambas medidas en mm por lo que ε es adimensional (ecuación 10).

$$\varepsilon = \frac{d}{L_0} \quad (10)$$

4.3.3.4 Dureza

Fueron utilizadas probetas de dimensiones de 50x50x150 mm (según norma ASTM D143 [94]) y una velocidad de prueba de 6 mm/min la cual se aplicó continuamente durante toda la prueba. Para el ensayo de dureza, se utilizó una esfera de 11,3 mm de diámetro en la cual el área proyectada de la esfera en la probeta fue de 1 cm². Se registró la carga hasta que la esfera penetró hasta la mitad de su diámetro, medida que se obtuvo en base al desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayos. Previo al inicio de cada ensayo, se realizó una precarga de unos 10 N para que la probeta estuviera sujeta en la posición indicada y evitar desplazamientos.

Se realizaron dos penetraciones en una de las superficies tangenciales (dureza tangencial), dos en una superficie radial (dureza radial) y una en cada extremo (dureza longitudinal) (Figura 53). Las penetraciones fueron suficientemente alejadas del borde para evitar la fractura o astillado. En el caso de las probetas que se astillan, los valores obtenidos deben ser descartados.

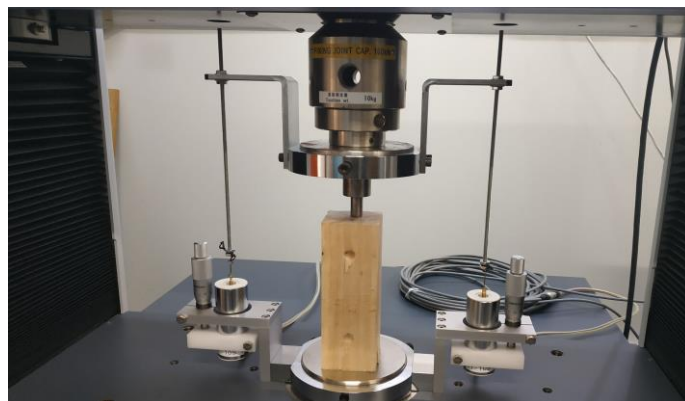


Figura 53. Ensayo de dureza (dirección longitudinal).

4.3.4 Análisis de datos

Dada la variabilidad natural de los resultados obtenidos, se empleó el criterio de diagrama de cajas para evaluar la presencia de puntos atípicos. El mismo muestra la distribución de una variable usando cuartiles, de modo que de manera visual es posible inferir dispersión de los datos, así como su ubicación y simetría. Además permite identificar gráficamente valores atípicos y comparar distribuciones [97].

El esquema de la Figura 54 se representa como un rectángulo (caja) cruzado por una línea recta horizontal que representa la mediana (el segundo cuartil), la base del rectángulo representa el primer cuartil y su parte superior el tercer cuartil. Al rango entre el primer y tercer cuartil se le conoce como intervalo intercuartílico (RIC). Además, de la caja salen dos líneas, una que llega hasta el mínimo valor de los datos en la variable o hasta el primer cuartil menos 1,5 veces el RIC;

y otra que llega hasta el valor máximo de los datos o el tercer cuartil más 1,5 veces el RIC. Estos son conocidos como bigotes [97].

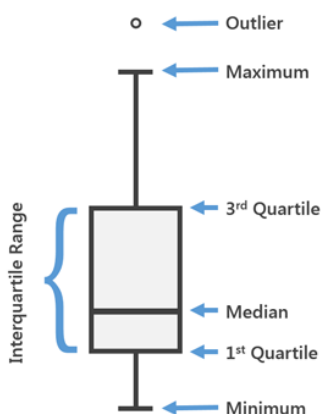


Figura 54. Diagrama de cajas o boxplots. Extraído de [98].

Básicamente, se excluyen aquellos valores atípicos (*outliers*) que se encuentran fuera del rango establecidos por los bigotes. A partir de esto, se calculan media y desvío estándar por troza y por localidad para los distintos resultados obtenidos de los ensayos.

4.3.5 Modelos estadísticos

Para poder obtener conclusiones que posean respaldo estadístico es necesario contar con un número de muestras que sean representativa de una población, al cual se lo conoce como tamaño mínimo de muestras (n).

Antes de iniciar con el trabajo, se calcularon algunos n para verificar si el material disponible era suficiente. Para eso, se probaron combinaciones de α (Probabilidad de umbral para rechazar la hipótesis nula. Error tipo I), β (Probabilidad de no rechazar la hipótesis nula bajo la hipótesis alternativa. Error de tipo II) y r (coeficiente de correlación esperado) para conocer el tamaño mínimo de muestra para cada caso [99]. Por ejemplo, para un α de 5%, un β de 20% y un r de 0,81, el n necesario es de 9 árboles; incluso para un mismo α , un β de 15% y un r de 0,83, el n es el mismo. Trabajando con un α de 5% (que es lo habitual en todos los trabajos a nivel mundial) se verifica que la cantidad de trozas utilizadas en este trabajo es suficiente.

$$n = \left[\frac{(Z_\alpha + Z_\beta)^2}{c} \right] + 3 \quad (11)$$

Donde Z_α y Z_β es la desviación normal estándar para α y β , respectivamente; $C = 0,5 * \ln\left[\frac{1+r}{1-r}\right]$, donde r es el coeficiente de correlación esperado.

Cabe aclarar que esto es para cuando se considera una variable X que explica a otra variable Y (regresión simple de primer orden). En el caso de considerar varias variables a la vez (regresión múltiple), existen dos maneras de determinar el n : primero, si solamente importa mantener un valor de R^2 (ajuste) grande, por ejemplo 0,7, entonces el tamaño de muestra debe ser como mínimo: $50 + 8(k)$ donde k es el número de variables independiente que se quiera evaluar; y segundo, si además de mantener un R^2 grande pero además se desea que la prueba tenga gran potencia⁶ (80% o más) entonces el tamaño mínimo es $104 + k$ [100]. En ambos casos el n es muy elevado y que en el marco del trabajo y de la cantidad de plantaciones con *E. bosistoana* en Uruguay, es físicamente inviable. Una vez aclarado y calculado el tamaño mínimo de muestras, a continuación se presenta el modelo utilizado para evaluar las variables de interés.

⁶ Potencia: capacidad de detectar una correlación significativa cuando realmente la hay. Ej.: si β vale 0,2, la potencia vale 0,8 (80%).

Una vez realizados los ensayos y obtenidos los resultados para las distintas propiedades de la madera, se procede al análisis de los mismos los cuales se realizaron con el software estadístico R (entorno y lenguaje de programación de código abierto) [101].

Para determinar si existe un efecto de cada localidad sobre las propiedades de la madera de *E. bosistoana*, se propuso el siguiente modelo de análisis que vincula la caracterización de cada localidad (incluyéndose la edad) con las propiedades de la madera:

$$y_{ij} = \mu + L_i + \varepsilon_{ij} \quad (M2)$$

Siendo: y_{ij} la propiedad de interés (variable de respuesta), μ la media general, L_i un efecto fijo asociado la localidad i -ésima y ε_{ij} el error experimental asociado a cada unidad y se asume $\varepsilon \sim N(\mu, \sigma_\varepsilon^2)$.

Para estudiar el grado de correlación entre las propiedades físicas y mecánicas se realizó un estudio analítico aplicando la prueba de correlación lineal de Pearson. El coeficiente de correlación (r) oscila entre -1 y $+1$, donde un valor menor a 0 indica que existe una correlación negativa (las dos variables están asociadas en sentido inverso); un valor mayor que 0 indica que existe una correlación positiva (las variables estarían asociadas en sentido directo). Cuanto más cerca de $+1$, se verifica que el comportamiento es más cercano al lineal. Por último, una correlación de 0 (o cercana a 0) indica que no hay relación lineal entre las dos variables estudiadas.

Por otro lado, se considera que la densidad básica puede ser una variable explicativa de las restantes variables de interés (resistencia a la flexión estática, compresión paralela a la fibra y dureza), por lo tanto se analizó su influencia a través de un modelo de regresión lineal de primer orden:

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * DB_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (M3)$$

Siendo: y_{ij} la propiedad de interés (variable de respuesta), DB_{ij} es el efecto fijo de la densidad básica de cada unidad y ε_{ij} el error experimental asociado a cada unidad y se asume $\varepsilon \sim N(\mu, \sigma_\varepsilon^2)$. Básicamente, el coeficiente β_0 (conocido como la ordenada en el origen) indica cuánto vale y cuando DB es igual a 0 . El parámetro β_1 (la pendiente de la recta) indica cuánto aumenta y por cada aumento de una unidad en DB .

4.4 Resultados

Antes de iniciar con la presentación de los resultados de las propiedades de la madera de *E. bosistoana*, es importante mencionar que se estudiaron las tres trozas de la localidad 3, que luego de los ensayos físicos y mecánicos se observó una notoria diferencia en las distintas propiedades que generó sospechas si se trataba o no de otra especie, o variabilidad propia debido a la localidad. En función de esa observación, se realizó un análisis de anatomía con la utilización de claves para la identificación y comparación entre las trozas, resultando en que precisamente se trataba de otra especie, por ende se debieron excluir de subsiguientes análisis las trozas 1 y 2 de la localidad 3 (ver Anexo C, donde se describe el análisis de anatomía). Aunque se concluyó que es otra especie distinta a *E. bosistoana*, no se logró identificar con precisión de qué especie se trata.

La troza 3 si bien es *E. bosistoana*, no se pudo considerar como representativa de la localidad 3 para establecer comparaciones y conclusiones entre localidades. De todos modos, dado el grado de avance del trabajo, los objetivos metodológicos y pedagógicos planteados, y la escasa disponibilidad de material, se decidió continuar con el trabajo, entendiendo que este sufriría en cuanto a la obtención de valores de relevancia tecnológica para la localidad 3 los cuales podrán complementarse en futuras actividades.

Las trozas de la localidad 3 estuvieron cerca de 5 años en un depósito en condiciones no controladas en el CENUR Noreste (Sede Tacuarembó) sometido a altas temperaturas durante el verano. Estas condiciones pudieron haber generado mayores rajaduras en las trozas. Este tiempo en el depósito fue debido a que no se contaba con más trozas de otras localidades para su comparación. A su vez, también las trozas de las localidades 1 y 2 estuvieron en el mismo depósito aunque en un menor tiempo respecto a la anterior (alrededor de 1 año) (Figura 55).



Figura 55. Estado de las trozas.

Por otro lado, en el caso de las trozas de la localidad 2, se observaron galerías y larvas vivas (Figura 56) de *Phoracantha* sp. (Coleoptera: *Cerambycidae*), que probablemente vinieron desde el campo en esas condiciones ya que en las trozas de las localidades 1 y 3 no se observaron síntomas de presencia de insectos.

Los daños e impactos de *Phoracantha* sp. sobre el material atacado pueden ser: el corte del flujo de savia y anillamiento del fuste; muerte en árboles debilitados y la pérdida de propiedades mecánicas de la madera, tanto en árboles en pie como recién cosechados [102]. Esto tiene implicancias negativas en la madera, principalmente aquella con destino de aserrío. A su vez, las diferencias en la cantidad de probetas para los distintos ensayos se deben justamente a los motivos anteriormente mencionados.



Figura 56. Se observan las galerías dentro del fuste, además de una larva viva.

A continuación se presentan los resultados para el índice de rajado (IR) de las trozas calculados con la ecuación 1 (Tabla 15). Este índice fue utilizado con el fin de cuantificar el estado en el que se encontraban las trozas al momento de realizar este trabajo, ya que este índice es comúnmente determinado en las primeras 48hs post corte del árbol en pie.

Localidad	Troza	IR cara 1 (%)	IR cara 2 (%)	Promedio IR (%)
1	1	4,60	3,47	4,04
	2	2,87	0,55	1,71
	3	8,19	5,10	6,65
2	1	4,48	2,64	3,56
	2	2,29	4,22	3,26
	3	7,76	1,48	4,62
3	3	4,31	4,11	4,21

Tabla 15. Índice de rajado para las trozas utilizadas en el trabajo

A modo de comparación, estos resultados son superiores a los encontrados por ejemplo en *E. grandis* de 21 años y *E. camaldulensis* de 17 años que no superan el 1,7% de índice de rajado [103], [104].

4.4.1 Propiedades físicas

A continuación se presentan los resultados de los ensayos físicos: densidad básica y anhidra, variación de la densidad básica en dirección radial y estabilidad dimensional.

Resulta importante aclarar que los “n” que aparecen en las tablas de resultados para las distintas propiedades representan la cantidad de probetas ensayadas y no el tamaño mínimo de muestra mencionado en las secciones anteriores.

4.4.1.1 Densidad básica

Luego de realizados los ensayos normalizados y de aplicar el criterio de selección de datos, se obtuvieron las siguientes resultados de densidad básica (media y desvío estándar) para cada árbol por localidad (Tabla 16) y para cada localidad en su conjunto (Tabla 17).

Localidad	Troza	n	Densidad Básica [kg/m ³]	
			Media	Desvío
1	1	6	860,71	28,40
	2	12	876,69	47,14
	3	3	909,85	5,46
2	1	5	682,10	14,23
	2	7	687,68	19,89
	3	4	746,90	26,38
3	3	5	896,65	37,32

Tabla 16. Resultados de densidad básica por troza.

Densidad Básica [kg/m ³]			
Localidad	n	Media	Desvío
1	21	879,21	41,34
2	16	698,03	28,18
3 ⁷	5	896,65	37,32

Tabla 17. Resultados de densidad básica por localidad.

⁷ Esta localidad está representada por un árbol

4.4.1.1.1 Variación de la densidad básica en la dirección radial

En la tabla 18 se presentan los resultados de la variación de la densidad básica (media y desvío) por localidad según la posición en el radio, mientras que en las figuras 57 y 58 se presentan los resultados de manera gráfica.

Localidad	Posición	n	Densidad Básica [kg/m ³]	
			Media	Desvío
1	Médula	4	710,78	37,72
	Medio	6	811,15	20,67
	Corteza	6	778,31	18,33
2	Médula	3	621,33	30,25
	Medio	6	690,16	43,84
	Corteza	6	665,74	29,27

Tabla 18. Variación de la densidad básica según posición en el radio.

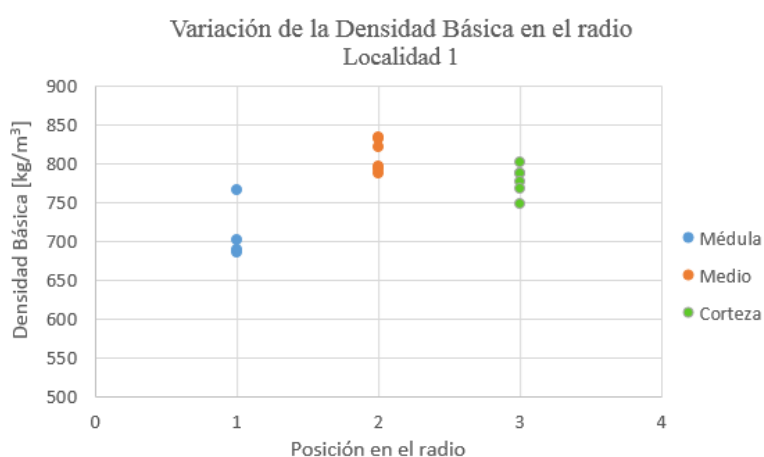


Figura 57. Gráfico de la variación de la densidad básica en el radio para la localidad 1.

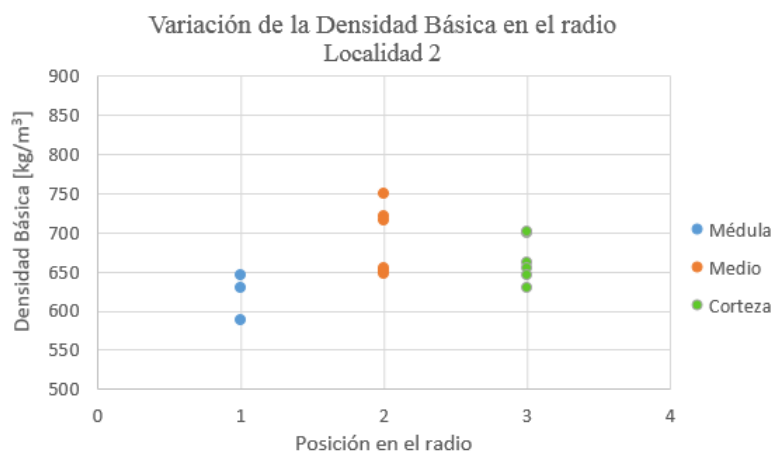


Figura 58. Gráfico de la variación de la densidad básica en el radio para la localidad 2.

En ambas localidades, se observa un aumento de la densidad básica desde la zona próxima de la médula hacia la zona media, y luego un descenso hasta la corteza, aunque la densidad de esta última es mayor respecto a la médula. Para la localidad 1, en promedio, la densidad del centro es 13% menor que la densidad de la posición media y un 9% menor que la posición cercana a la corteza. Mientras que para la localidad 2, la densidad del centro es 10% menor que la zona media y un 7% menor que la posición cercana a la corteza.

4.4.1.2 Densidad anhidra

Se presentan los resultados de densidad anhidra y su respectivo desvío estándar para cada troza (tabla 19) y por localidad (tabla 20).

Localidad	Troza	n	Densidad Anhidra [kg/m ³]	
			Media	Desvío
1	1	6	966,52	29,76
	2	12	1008,80	47,40
	3	5	999,34	40,13
2	1	4	740,41	12,24
	2	8	761,34	32,29
	3	7	857,28	59,98
3	3	4	979,69	16,34

Tabla 19. Resultados de densidad anhidra para cada árbol.

Localidad	n	Densidad Anhidra [kg/m ³]	
		Media	Desvío
1	23	992,13	46,59
2	19	781,23	55,18
3	4	979,69	16,34

Tabla 20. Resultados de densidad anhidra por localidad.

4.4.1.3 Estabilidad dimensional

A continuación se presentan los gráficos resultantes de los dos ciclos de estabilidad dimensional para *E. bosistoana*, en los cuales se detalla la variación de las dimensiones en sentido radial y tangencial para las localidades 1 y 2 en función del contenido de humedad (Figura 59 a Figura 62). Las líneas azules representan a los ajustes correspondientes a las curvas de histéresis realizados por medio de un polinomio de orden dos y ordenada al origen nula, mientras que los rombos rojos representan los datos experimentales.

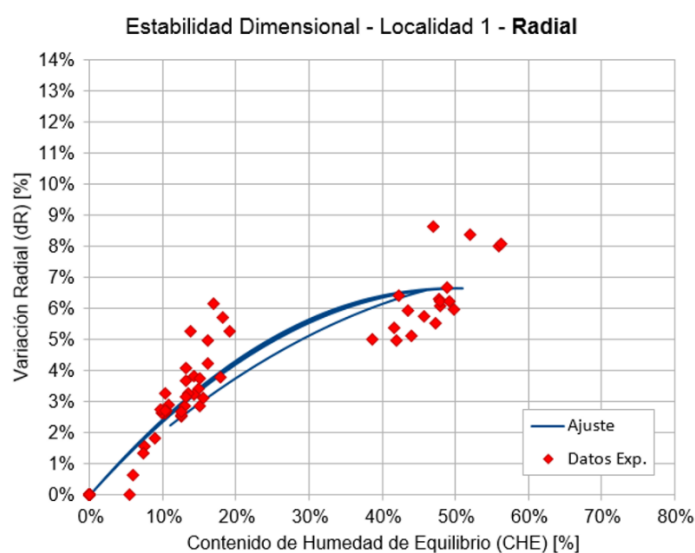


Figura 59. Variación de las dimensiones en sentido radial para la localidad 1.

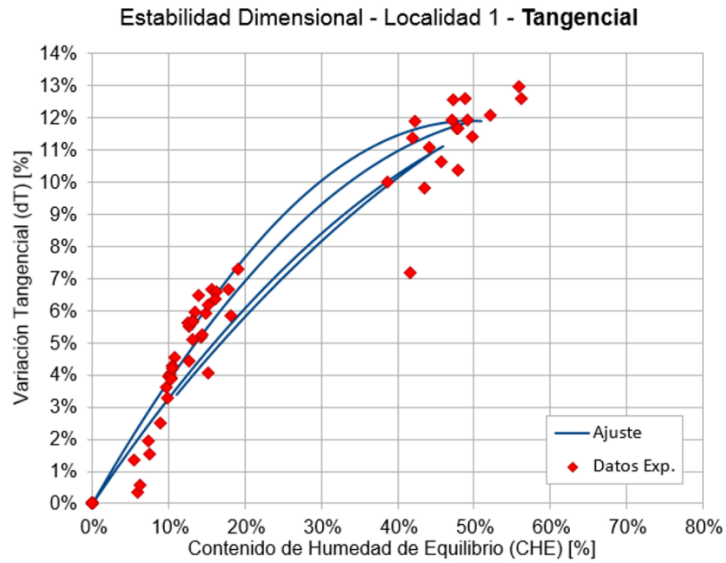


Figura 60. Variación de las dimensiones en sentido tangencial para la localidad 1.

Los coeficientes de contracción lineales en promedio resultaron en 5,9% en dirección radial y 9,8% en tangencial; mientras que el coeficiente de contracción volumétrico fue de 15,1% en promedio para la localidad 1, evaluando la contracción desde el estado verde (50% aprox.) al anhidro. Respecto al coeficiente de anisotropía (relación entre contracción tangencial y radial) resultó en 1,66.

Los coeficientes de hinchamiento lineales fueron de 6,5% en dirección radial y 11,8% en tangencial, desde el estado anhidro a un contenido de humedad promedio de 50%. En tanto al coeficiente volumétrico de hinchamiento resultó en 19,0%.

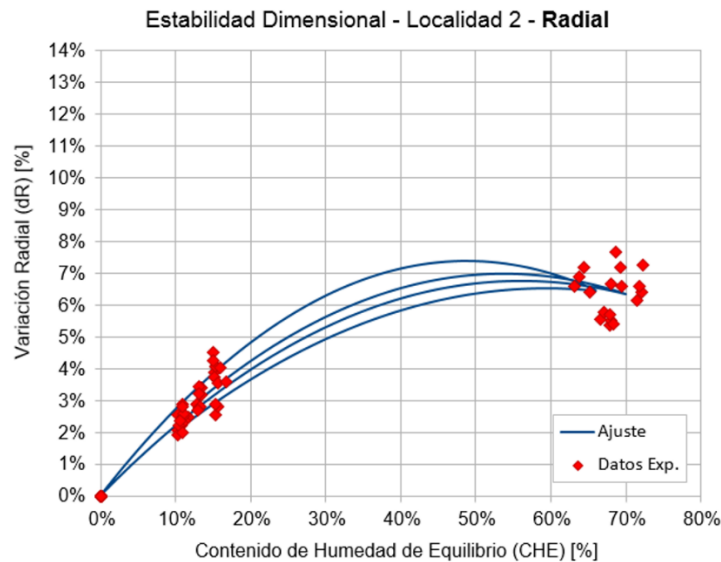


Figura 61. Variación de las dimensiones en sentido radial para la localidad 2.

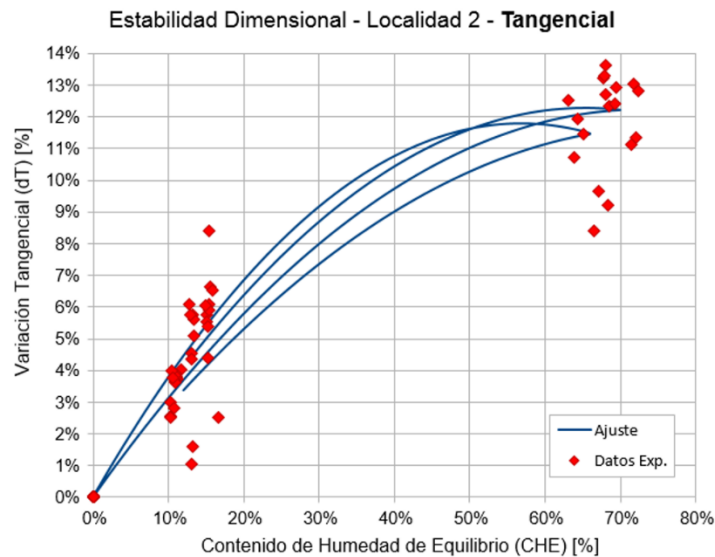


Figura 62. Variación de las dimensiones en sentido tangencial para la localidad 2.

Para la localidad 2, los coeficientes de contracción lineales resultaron en 6,1% en dirección radial y 10,3% en tangencial; mientras que el coeficiente de contracción volumétrico fue de 15,9% en promedio para la localidad 2, evaluando la contracción desde el estado verde (70% aprox.) al anhidro. En tanto al coeficiente de anisotropía (contracción tangencial/radial) resultó en 1,69.

Por otro lado, los coeficientes de hinchamiento lineales fueron de 6,3% en dirección radial y 12,2% en tangencial, desde el estado anhidro a un contenido de humedad de 70%. En tanto al coeficiente de hinchamiento volumétrico resultó en 19,3%.

Se observa que la dispersión de los puntos experimentales en un rango de 5 a 20% de humedad indica una variación dimensional del orden de 1 a 7% tanto en la dirección radial como tangencial, para ambas localidades. En la dirección tangencial, en ambas localidades, se observó una mayor dispersión en los resultados que en la dirección radial. A un 50% de humedad se alcanza una variación tangencial entre 10 y 13%, mientras que para la localidad 2, un 8 a 14% de variación a los 70% de humedad.

4.4.2 Propiedades mecánicas

A continuación se presentan los resultados de las propiedades mecánicas: flexión estática, compresión paralela a la fibra y dureza. En cada subsección, se presentan tablas con las medias y desvíos estándar de cada propiedad obtenidos de los ensayos con probetas libres de defectos, tanto por troza como por localidad. Los valores presentados fueron evaluados según el criterio de selección descrito en la sección 4.3.4.

4.4.2.1 Flexión estática

En la Figura 63 se puede ver el resultado de las probetas durante y luego del ensayo; mientras que en la Figura 64 se muestra un gráfico a modo de ejemplo de la curva de fuerza-desplazamiento donde se indica la zona elástica (línea discontinua entre el 10 y 40% de la carga aplicada) para lograr calcular el MOE_f y la fuerza máxima (círculo rojo) para calcular el MOR_f.



Figura 63. Izquierda: probeta durante ensayo de flexión. Derecha: resultado del ensayo de flexión.

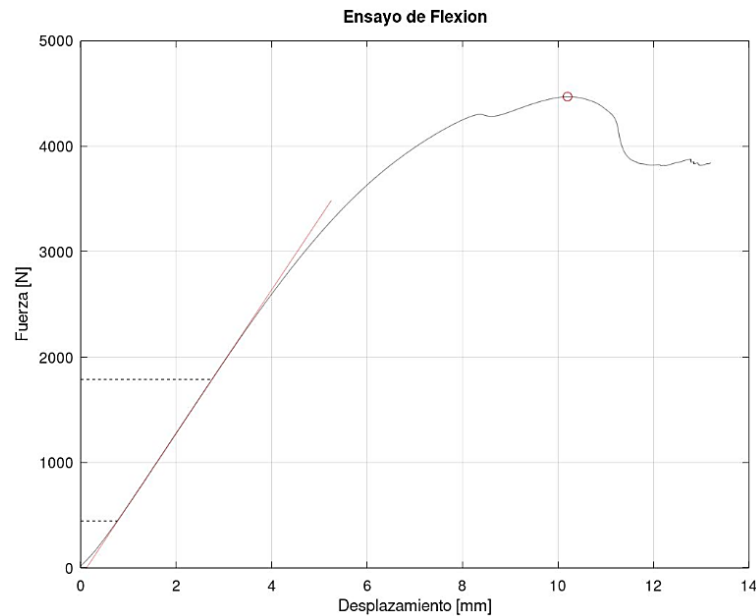


Figura 64. Gráfico de fuerza-desplazamiento para una probeta sometida a flexión.

En la tabla 21 y 22 se presentan los resultados de módulo de rotura (MOR_f) y de elasticidad (MOE_f) para el ensayo de flexión estática por troza y por localidad. El contenido de humedad promedio de las probetas fue de 15%.

Localidad	Troza	n	MOE _f [MPa]		MOR _f [MPa]	
			Media	Desvío	Media	Desvío
1	1	4	18674	2424	146,0	10,8
	2	9	20443	1565	152,4	8,2
	3	9	19576	1377	151,2	12,7
2	1	3	16831	1142	137,2	4,8
	2	6	16866	2874	132,8	11,3
	3	5	17654	1078	133,6	20,0
3	3	1	18727	--	153,4	--

Tabla 21. Se indica MOR y MOE para cada troza, con sus respectivas medias y desvíos estándar.

Localidad	n	MOE _f [MPa]		MOR _f [MPa]	
		Media	Desvío	Media	Desvío
1	22	19767	1713	150,7	10,4
2	14	17140	1974	134,0	13,3
3	1	18727	--	153,3	--

Tabla 22. Se indica MOR y MOE para cada localidad, con sus respectivas medias y desvíos estándar.

En la tabla 21 no se presenta el desvío estándar de la troza 1 de la localidad 3 ya que es solamente una probeta (lo mismo aplica en la tabla por localidad, tabla 22).

En prácticamente todas las probetas, la deformación ocurrió en primer lugar por compresión (figura 65, izquierda) y posteriormente la ruptura por tracción. La fractura fue del tipo “splintering” en la superficie bajo tracción (figura 65, derecha), como lo describe la norma ASTM D143 utilizada en este ensayo.



Figura 65. Izquierda: Detalle de la falla por compresión. Derecha: Falla tipo “splintering” en zona bajo tracción.

De acuerdo a la bibliografía, es importante estudiar cómo se relacionan la densidad básica y MOE y MOR de flexión, para eso se presenta los respectivos gráficos para visualizar las relaciones (figura 66 y 67). En la sección de análisis estadístico (4.4.3) se detallan los valores de R^2 así como los p-valores asociados. Para determinar las propiedades mecánicas se utilizaron una tanda de probetas (como lo especifican las normas) y en tanto a la densidad básica se utilizaron otras, por lo que no se cuenta con la densidad individual de las probetas ensayadas en flexión, por eso se trabajó con medias y desvíos por troza y localidad.

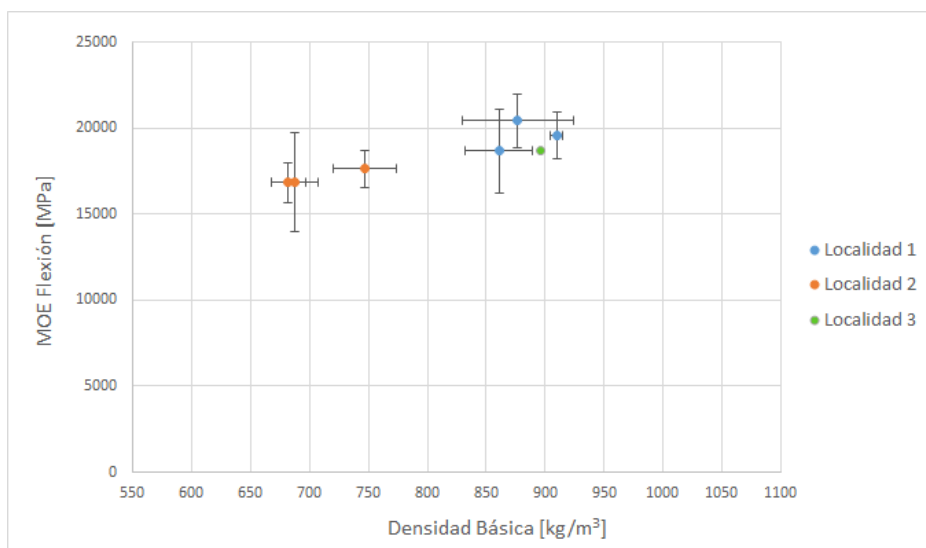


Figura 66. Se observa la dispersión de los valores medios (puntos) y desvíos estándar (barras de error) de densidad básica y MOE a flexión.

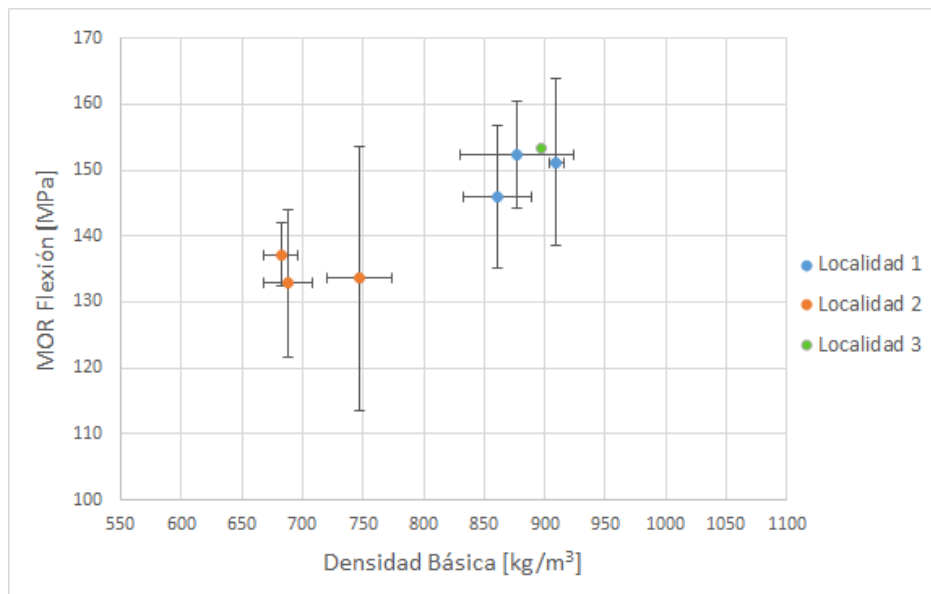


Figura 67. Se observa la dispersión de los valores medios (puntos) y desvíos estándar (barras de error) de densidad básica y MOR a flexión.

4.4.2.2 Compresión paralela a la fibra

A continuación se presentan tablas con los resultados del MOE_c y MOR_c a la compresión por troza (Tabla 23) y por localidad (Tabla 24), donde se detallan las respectivas medias y sus desvíos estándar. El contenido de humedad promedio para las probetas utilizadas en el ensayo fue de 14%.

Localidad	Troza	n	MOE_c [MPa]		MOR_c [MPa]	
			Media	Desvío	Media	Desvío
1	1	6	12362	3173	65,9	9,8
	2	12	13651	2456	71,9	4,8
	3	6	14197	886	66,4	1,8
2	1	7	11971	2105	57,0	3,6
	2	7	10839	2589	52,8	4,1
	3	7	13565	1497	61,1	4,3
3	3	12	13262	2797	70,4	1,3

Tabla 23. Resultados de MOE y MOR de compresión por troza.

Localidad	n	MOE_c [MPa]		MOR_c [MPa]	
		Media	Desvío	Media	Desvío
1	24	13361	2399	69,4	6,4
2	21	12125	2307	57,6	5,3
3	12	13262	2797	70,5	1,4

Tabla 24. Resultados de MOE y MOR de compresión por localidad.

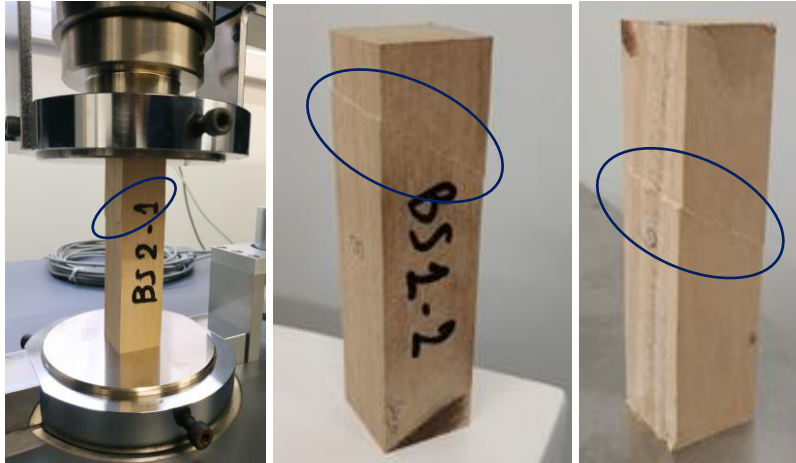


Figura 68. Probetas durante y luego del ensayo de resistencia a la compresión paralela a la fibra.

En la figura 68 se muestran ejemplos de probetas sometidas a compresión paralela a la fibra, además se indican las fallas en las probetas debido a este esfuerzo, que de acuerdo a la norma ASTM D143, es del tipo “*shearing*”.

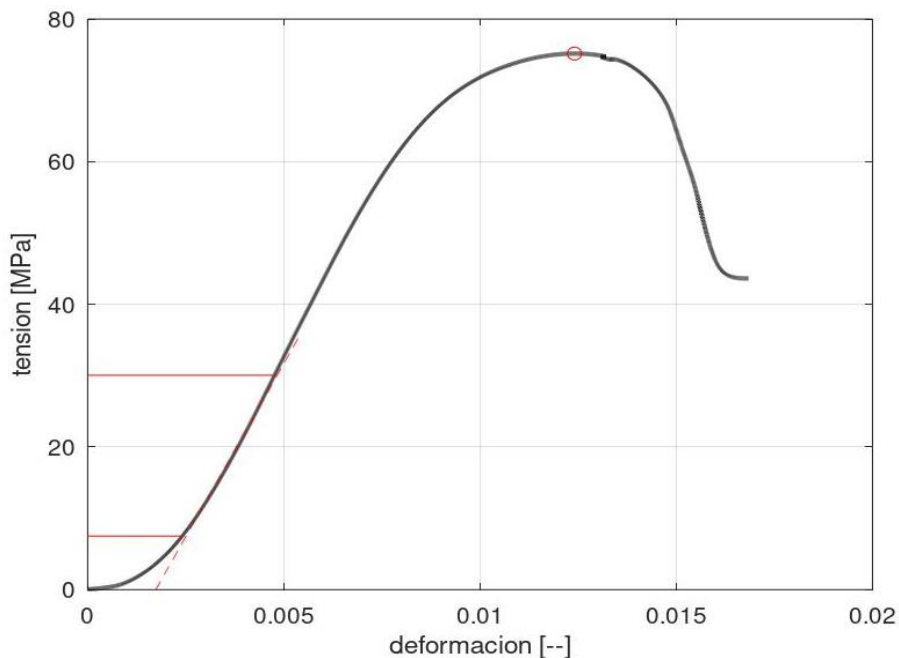


Figura 69. Ejemplo de una curva tensión-deformación para una probeta sometida a compresión (de la localidad 1).

En la figura 69, se presenta el ejemplo de la curva de tensión-deformación para una probeta de la localidad 1 que fue sometida al ensayo de compresión paralela. Por otro lado, en las figuras 70 y 71, se presentan los gráficos de MOE y MOR de compresión en función de la densidad básica para las trozas de las tres localidades.

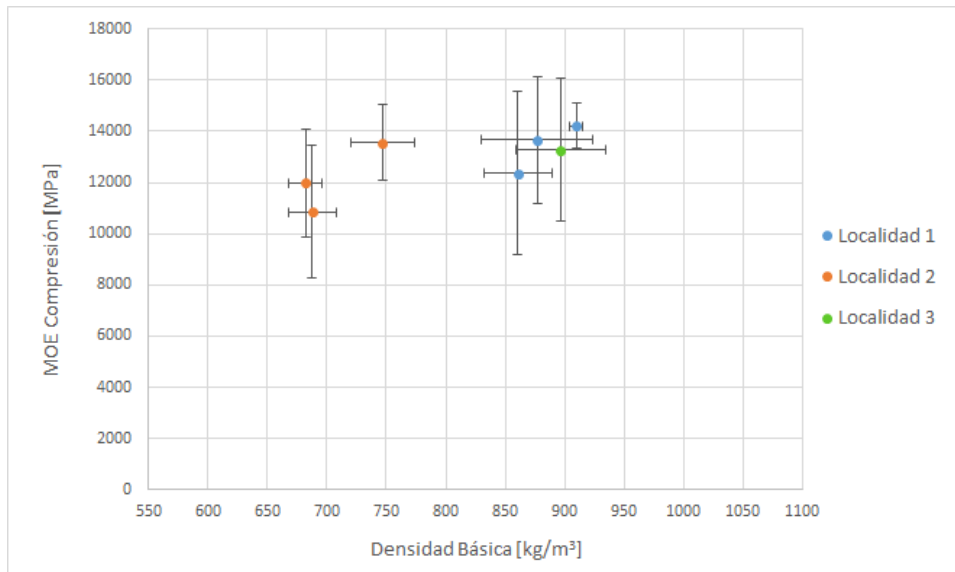


Figura 70. Se observa la dispersión de los valores medios (puntos) y desvíos estándar (barras de error) de densidad básica y MOE de compresión por troza.

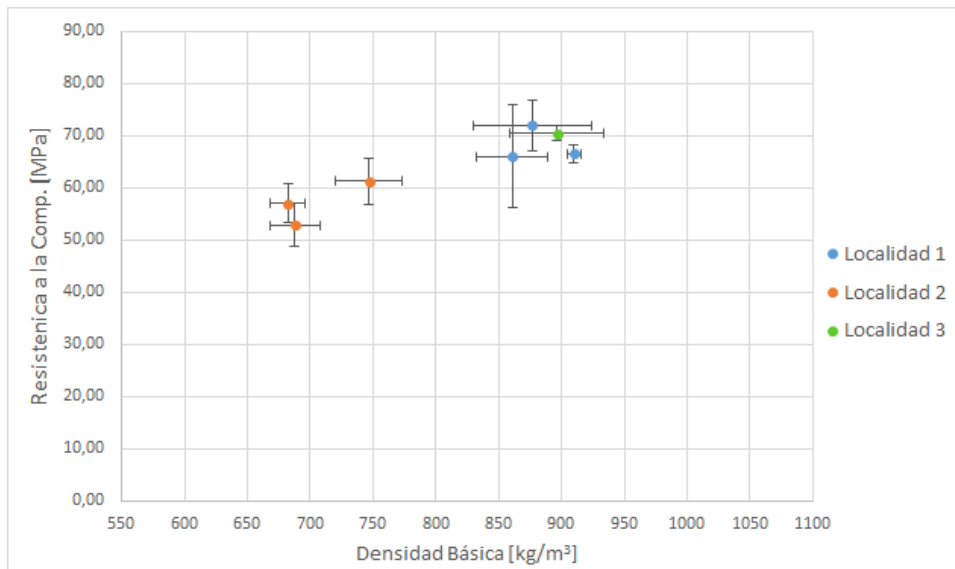


Figura 71. Se observa la dispersión de los valores medios (puntos) y desvíos estándar (barras de error) de densidad básica y de MOR a compresión.

4.4.2.3 Dureza

Se presenta la tabla resumen de los resultados de dureza en las tres direcciones, por troza (tabla 25) y por localidad (tabla 26). Se detallan también los n , que en este caso representan al número de probetas multiplicado por dos, ya que se realizaron dos penetraciones en cada sentido (Figura 72). El contenido de humedad promedio de las probetas para el ensayo de dureza fue de 15%.

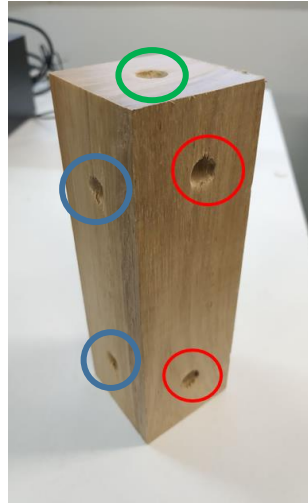


Figura 72. Ensayo de dureza, donde se indican las penetraciones realizadas. Rojo: dirección radial. Azul: tangencial. Verde: longitudinal.

Localidad	Troza	D. Radial [MPa]			D. Tangencial [MPa]			D. Longitudinal [MPa]		
		n	Media	Desvío	n	Media	Desvío	n	Media	Desvío
1	1	22	107,34	7,01	22	111,20	5,38	22	116,68	7,44
	2	15	116,81	11,25	12	131,65	10,29	14	113,94	12,22
	3	14	122,02	8,89	14	126,76	8,75	14	131,45	5,73
2	1	6	86,40	3,72	6	88,89	5,89	6	95,69	2,38
	2	6	96,66	11,19	16	93,15	10,66	16	100,58	8,92
	3	9	95,20	9,81	12	96,57	9,43	12	109,32	5,14
3	3	14	114,22	6,22	14	123,01	4,96	14	126,89	7,61

Tabla 25. Resultados de dureza en las tres direcciones por troza.

Se observan diferencias en los n , dado que se descartaron los valores en los cuales ocurrió el astillamiento de las probetas, como por ejemplo en algunas probetas en el sentido radial.

Localidad	D. Radial			D. Tangencial			D. Longitudinal		
	n	Media	Desvío	n	Media	Desvío	n	Media	Desvío
1	51	114,16	10,80	48	120,85	11,94	50	119,93	11,23
2	21	93,86	9,79	34	93,61	9,69	34	102,80	8,54
3	14	114,22	6,22	14	123,01	4,96	14	126,89	7,61

Tabla 26. Resultados de dureza en las tres direcciones por localidad.

A continuación se presentarán gráficos para una mejor visualización de los valores de dureza en relación a la densidad básica. Aquí, al igual que en el caso de flexión estática, se grafican las medias y los desvíos para cada propiedad, dado que las probetas fueron diferentes para cada ensayo (Figura 73, 74 y 75).

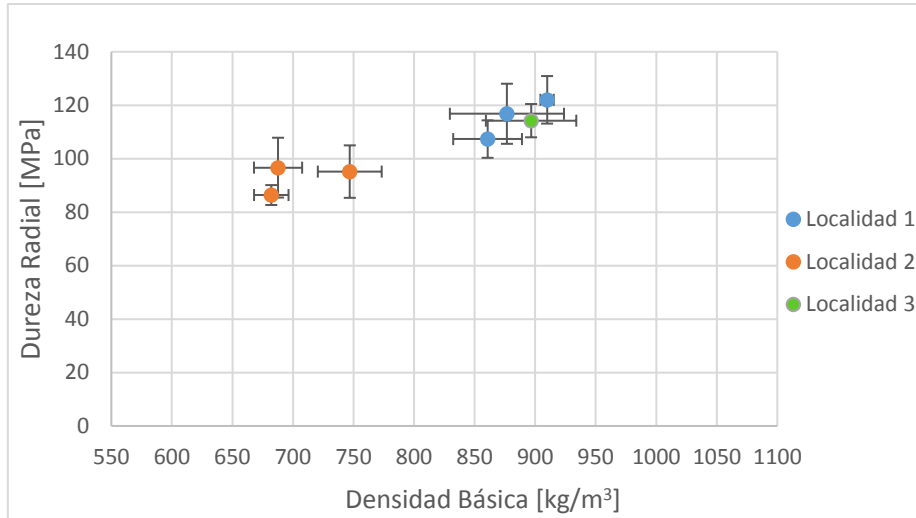


Figura 73. Dureza radial en función de la densidad básica para todas las trozas. Se observa los valores medios (puntos) y desvíos estándar (barras de error).

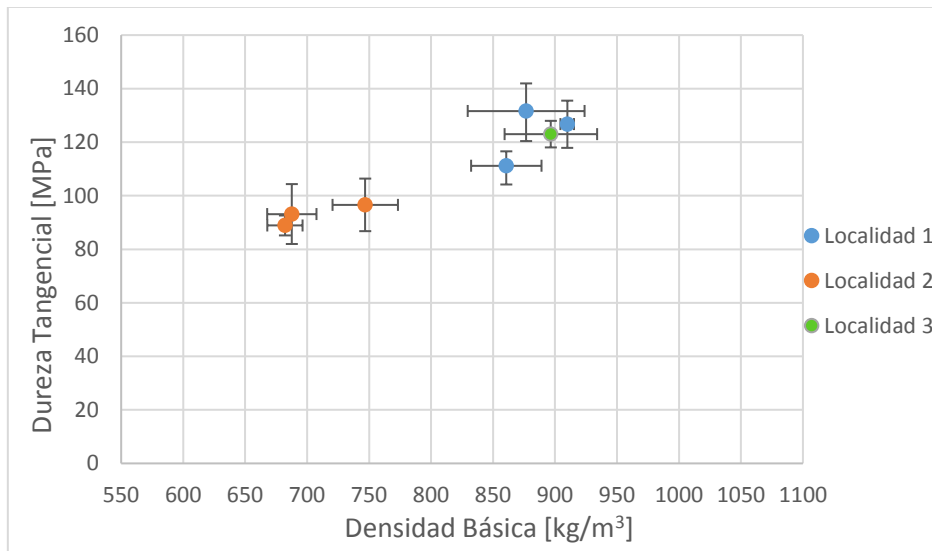


Figura 74. Dureza tangencial en función de la densidad básica para todas las trozas. Se observa los valores medios (puntos) y desvíos estándar (barras de error).

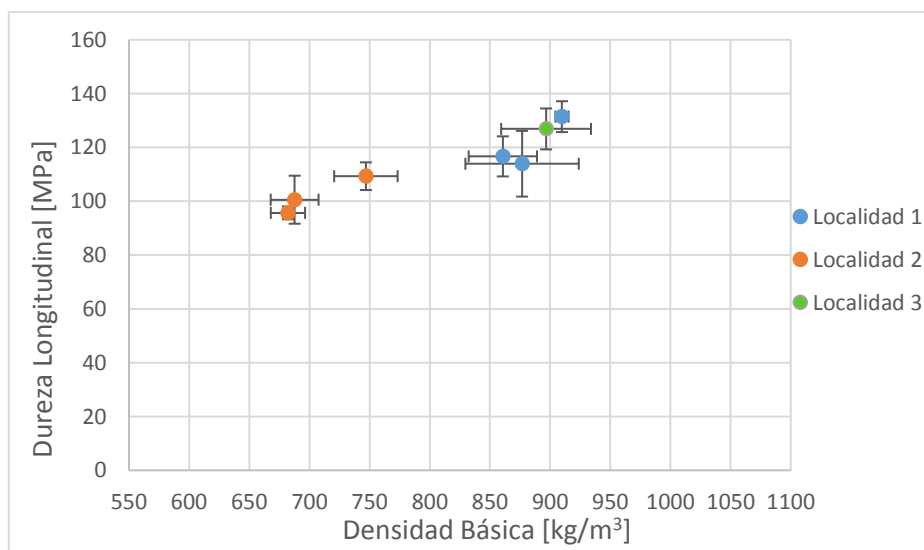


Figura 75. Dureza tangencial en función de la densidad básica para todas las trozas. Se observa los valores medios (puntos) y desvíos estándar (barras de error).

4.4.3 Análisis estadístico

Si bien se tuvo que descartar dos trozas de la localidad 3, el tamaño de muestra (cantidad de árboles) sigue dentro del rango calculado para que los resultados y correlaciones sean estadísticamente válidas. Considerando un α de 5%, un β de 20% y un r entre 0,85-0,9, resulta en un tamaño mínimo de muestras de 7 árboles. Incluso asumiendo un α un poco mayor, de 10%, resulta en 7 y hasta 6 árboles para que los resultados sean válidos.

4.4.3.1 Grado de correlación entre las propiedades físicas y mecánicas

En esta sección, se consideraron las localidades 1 y 2, mientras que la localidad 3 (al contar con solo un árbol) no pudo ser incluido en esta parte del análisis.

Para estudiar si existen diferencias entre las propiedades de la madera entre las localidades 1 y 2, se realizó un análisis de varianza, trabajando con un nivel de significancia del 5%. Los resultados se presentan a continuación en las tablas 27 y 28, en la cual se muestra el ejemplo para la densidad básica en función de la localidad (tabla 27) y luego las restantes propiedades (tabla 28) a modo de resumen con el valor de interés (p-valor), además de indicar si existen diferencias significativas.

Análisis de Varianza - Densidad Básica en localidades 1 y 2.					
	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	p-valor
Localidad	1	46920	46920	48,933	0,0022*
Residuales	4	3835	959		

Tabla 27. Análisis de varianza de la densidad básica entre las localidades 1 y 2. El * indica diferencias significativas, asumiendo un error de 5%.

La tabla muestra que dado que el p-valor (0,0022) fue menor que el nivel de significancia (5%) se puede afirmar que existen diferencias de la variable densidad básica según la localidad de la cual provienen las trozas. Este mismo análisis y criterio, se utilizó para las demás propiedades, las cuales se detallan a continuación:

Propiedad	p-valor	¿Existen diferencias entre las loc. 1 y 2?
Densidad Anhidra	0,0057*	Sí
MOE Flexión	0,0148*	Sí
MOR Flexión	0,0029*	Sí
MOR de Compresión	0,0222*	Sí
MOE de Compresión	0,2537	No
Dureza Radial	0,0134*	Sí
Dureza Tangencial	0,0098*	Sí
Dureza Longitudinal	0,0492*	Sí

Tabla 28. Comparación de las propiedades de la madera entre las localidades 1 y 2. p-valores con un * implican diferencias significativas con 5% de error.

La correlación fue realizada en base a todos los datos de las distintas propiedades de la madera aquí evaluadas, mostrando así una tendencia para la especie.

A continuación se muestra la correlación de Pearson entre la densidad básica y todas las demás propiedades (tabla 29). El coeficiente r es el estimador puntual del coeficiente poblacional y puede tomar valores entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 implican una correlación lineal fuerte y positiva entre las variables lo cual implica que si una aumenta, la otra lo hace con la misma intensidad.

Propiedades	r	p-valor
Densidad Anhidra	0,98	7,283e-05*
MOR de Compresión	0,92	0,0032*
MOE de Compresión	0,73	0,0615
MOE de Flexión	0,85	0,0150*
MOR de Flexión	0,94	0,0019*
Dureza Radial	0,95	0,0012*
Dureza Tangencial	0,95	0,0014*
Dureza Longitudinal	0,93	0,0021*

Tabla 29. Correlación entre densidad básica y las demás propiedades estudiadas. Los p-valores con un * implican diferencias significativas con 5% de error.

4.4.3.2 Modelo de regresión

El modelo de regresión para cada propiedad de interés fue realizado en función de la densidad básica, o sea que esta última es la variable explicativa de las demás, como lo indica el modelo M3. Los p-valores menores a 5% verifican que la densidad básica es una variable explicativa de las propiedades de interés. El R^2 es un coeficiente de determinación que indica cuán bueno es el ajuste del modelo propuesto (máximo es 100%). Los valores de B_0 y B_1 son las estimaciones puntuales para cada una de las propiedades según el siguiente modelo:

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * DB_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (M3)$$

Propiedad de interés	p-valor	R^2 (%)	B_0	B_1
Densidad Anhidra	0,0003*	96	-42,71	1,17
MOR de Compresión	0,0128*	77	12,95	0,06
MOE de Compresión	0,0954	43	5440,20	9,23
MOE de Flexión	0,0066*	84	7073,77	14,22
MOR de Flexión	0,0079*	82	77,95	0,08
Dureza Radial	0,0043*	87	1,81	0,13
Dureza Tangencial	0,0047*	86	-26,47	0,17
Dureza Longitudinal	0,0088*	81	19,10	0,12

Tabla 30. Regresión lineal de cada propiedad de interés en función de la densidad básica.

Los modelos estimados permiten interpolar valores para las variables de interés para el rango de densidad básica entre 682,10 y 909,85 kg/m³, obtenidos en este trabajo.

4.5 Discusión de la sección

Antes de iniciar con la discusión de los resultados de las distintas propiedades de la madera, resulta interesante mencionar la detección de un insecto en las trozas de la localidad 2. Se observó la presencia de galerías con aserrín compactado y larvas (algunas vivas) del género *Phoracantha*. Conocido como “taladro del eucalipto”, es considerado plaga para las plantaciones forestales del género *Eucalyptus* en Uruguay [102], [105], [106]. Si bien en la bibliografía se presenta la susceptibilidad de la madera de *E. bosistoana* a insectos del género *Lyctus* [27], no hay registros de ataques por *Phoracantha*. Las galerías generadas por este insecto, dificultaron significativamente la obtención de probetas para los distintos ensayos con las trozas de la loc. 2.

Dado que dos de las trozas de la localidad 3 no resultaron ser *E. bosistoana*, el análisis de las propiedades de la madera continuó adelante con las localidades 1 y 2, ya que al contar con una troza, no se pudo tomar como representativo de la localidad 3. La caracterización completa de la localidad 3 en cuanto a su suelo y clima, permitirá completar esta localidad a futuro en cuanto se dispongan de trozas de *E. bosistoana* cultivadas en este lugar.

La densidad básica para la localidad 1 (23 años) resultó en 879,21 kg/m³ el cual es comparable a otros trabajos que obtuvieron valores de 820 kg/m³ para árboles de 42 años en Cerro Largo (Uruguay) [10] y un rango de 780 a 980 kg/m³ en Australia [26]. Para la localidad 2, se obtuvo una media de 698,03 kg/m³. Este resultado es muy similar al obtenido en Guaíba (RS, Brasil) donde estudiaron la densidad básica de 5 árboles de *E. bosistoana*, también de 7 años de edad, obteniendo un valor de 676 kg/m³ [72]. En proporción, la densidad básica promedio para la loc. 1 fue 20% mayor respecto a la loc. 2. A modo de comparación, para *E. nitens* se observó que la densidad básica aumentó en un 4,6% y 9,7% a los 15 y 20 años con respecto a los 13 años, respectivamente [107].

En tanto a la variación en el radio, se observaron las menores densidades básicas en la zona próxima a la médula, con un aumento a la zona media y disminuyendo levemente en la zona cercana a la corteza aunque no hay una diferencia clara. Estas diferencias pueden deberse a la albura y duramen, ya que la primera se caracteriza por ser menos densa [108]. En comparación con el único antecedente a nivel nacional para esta especie, se observó que la densidad tendía a aumentar de médula a corteza [10].

Por otro lado, la densidad básica en cada zona del radio es menor en comparación a los valores de densidad media obtenidos para las trozas, lo que se debe en parte que para esta última se utilizaron probetas sobrantes de compresión (las cuales eran en su mayoría de zonas del medio de la troza).

Se observa que en la estabilidad dimensional de las probetas de la localidad 1 alcanzaron un contenido de humedad del 50% cuando fueron saturadas con agua destilada mientras que las de la localidad 2 llegaron a un 70%, ambas en las mismas condiciones e intervalos de tiempo. Las trozas de la localidad 2, al alcanzar mayores niveles de humedad, se verifica que son menos densas comparado a las trozas de la localidad 1. Conocer la estabilidad dimensional es importante para considerar los posibles usos y ambientes donde la madera puede estar expuesta, como por ejemplo en ambientes muy húmedos, en los que la madera puede sufrir alteraciones en sus dimensiones reduciendo la calidad y desempeño según el objetivo de utilización.

El coeficiente de contracción tangencial fue mayor que en la dirección radial en ambas localidades, como era de esperarse. En tanto a la contracción volumétrica, se observó que fue mayor para la localidad 2 comparado a la localidad 1 (15,9% y 15,1% respectivamente). Estos resultados son comparables a los observados en Uruguay donde la contracción radial fue de 6,5%; la tangencial de 12% y volumétrica de 17,7% [10]. Según los coeficientes de anisotropía calculados para cada localidad, la madera de *E. bosistoana* se clasifica como “apta para secado o normal” y “estable” según la estabilidad dimensional [66], [75], como también se observó en [10].

Respecto a las propiedades mecánicas, e iniciando con el MOE de flexión estática (MOE_f), se obtuvieron medias de 19767 y 17140 MPa para las localidades 1 y 2 (respectivamente), los cuales son comparables a los que se encuentra en la literatura para *E. bosistoana*, encontrándose valores de 21000 MPa en Australia [18] y de 18477 MPa en Uruguay [10].

En tanto al MOR de flexión (MOR_f), los resultados promedios para las localidades 1 y 2 (150,7 y 134,0 MPa, respectivamente) son similares a los obtenidos en Uruguay [10] y Australia

[18]. Todos estos resultados (tanto de MOE y MOR de flexión) son mayores a los de otras especies del género *Eucalyptus* cultivadas a nivel nacional [70].

Para la resistencia a la compresión (MOR_c) se obtuvieron 69,4 y 57,6 MPa, para las localidades 1 y 2. En Uruguay, se obtuvo un valor de 66,2 MPa [10] y comparando con su región de origen se presenta un valor de 73,0 MPa [89]. Cuando se compara con otras especies de *Eucalyptus*, la resistencia a la compresión del *E. tereticornis* es similar (68,5 MPa), registrado en Argentina [87], mientras que la de *E. grandis* es menor (entre 34 a 44,5 MPa). En tanto al módulo de elasticidad (MOE_c), se obtuvieron 13361 y 12125 MPa para las localidades 1 y 2 (respectivamente). Estos últimos no pudieron ser comparados con la bibliografía dado a que no se han encontrado referencias tanto a nivel nacional como internacional.

En tanto a la dureza en sentido radial, se obtuvo una media de 114,16 MPa para la localidad 1 y 93,86 MPa para la localidad 2. Respecto al sentido tangencial los valores obtenidos fueron de 120,85 y 93,61 MPa; y por último, la dureza longitudinal, resultó en 119,93 y 102,80 MPa para las localidades 1 y 2, respectivamente. A modo de comparación con el único antecedente nacional, la dureza radial de *E. bosistoana* resultó en 142,23 MPa con un desvío estándar de 20,5 MPa el cual es cercano al obtenido en este trabajo para la localidad 1. En tanto a la dureza tangencial fue de 136,36 MPa y 127,34 MPa para la dureza longitudinal [10].

Los valores de dureza en sentido longitudinal fueron mayores que en sentido radial y tangencial en ambas localidades, mientras que en sentido radial y tangencial las diferencias son pequeñas. Estos resultados demuestran que *E. bosistoana* tiene una madera muy dura, lo que sugiere su utilización en construcción, pisos, además de postes y durmientes, coincidiendo con lo recomendado por la bibliografía nacional [10].

La correlación entre propiedades de la madera por localidad no fue posible realizarla debido al bajo número de trozas por localidad. Si bien los coeficientes de correlación (r) fueron altos, los p-valores indicaron que no se deben considerar las tendencias como estadísticamente válidas como para asumir tendencias por localidad. Pero, analizando toda la base de datos (las 7 trozas), sí se pueden presentar las correlaciones entre las distintas propiedades físicas y mecánicas (como se presentó en la sección 4.4.3.1).

Se expresaron las correlaciones entre la densidad básica frente a las demás propiedades físicas y mecánicas. De esta manera, se obtuvieron correlaciones altas y positivas, como una aproximación general para la especie. El antecedente nacional, muestran correlaciones no tan fuertes por ejemplo para el MOE de flexión y densidad básica, pero sí para el MOR de flexión [10].

Luego, en la regresión lineal se obtuvieron resultados interesantes dado que es posible predecir en cierto grado el valor de las demás propiedades a partir de la densidad básica de la madera, aunque solamente es válido para densidades entre 682,10 y 909,85 kg/m³.

Por otro lado, comparando las localidades 1 y 2, el análisis de varianza mostró que todas las propiedades de la madera de *E. bosistoana* son estadísticamente distintas (excluyendo únicamente el MOE de compresión). De este resultado, surge la pregunta de cuál o cuáles variables de cada localidad son las que generaron estas diferencias, y es lo que se discute a continuación.

5. DISCUSIÓN GENERAL

Las plantaciones con *E. bosistoana* en Uruguay no están cuantificadas de manera oficial lo que demuestra el hecho de que existen escasas hectáreas forestadas con esta especie, las cuales en su mayoría tienen fines de estudio. Las investigaciones realizadas hasta el momento son de provecho para el conocimiento de la especie y los potenciales usos a nivel comercial, e indican que es una madera con propiedades físicas y mecánicas muy satisfactorias para utilizarla con diversos fines como la construcción de estructuras, pisos, y aplicaciones donde requieran alta durabilidad y dureza.

En este trabajo se esperaba comparar la localidad 1 y 3 para analizar el efecto del suelo y clima, dado que las edades de las plantaciones eran similares. A su vez, se suponía que entre las localidades 1 y 2 las variables clima y suelo serían muy similares por lo que se esperaba atribuir el efecto más contrastante a la edad. Sin embargo, al no ser posible desacoplar la variable edad y suelo, el efecto de las mismas se analiza en conjunto (sin conocer el efecto de cada una por separado).

Se encontraron diferencias significativas entre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *E. bosistoana* (excepto el MOE de compresión) entre las localidades 1 y 2, por lo que surge la cuestión de analizar e identificar cuál o cuáles variables generaron estas diferencias.

De acuerdo a la variable clima, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas a lo que refiere a temperaturas, precipitaciones y radiación entre las tres localidades. Entonces, se puede afirmar que la variable clima es equivalente, por lo que esta variable sale del estudio entre las localidades 1 y 2. Esto puede deberse en parte a la corta distancia entre las localidades (40 km) y que las tendencias climáticas para la región son parecidas.

Respecto al suelo, el pH y la pendiente de las localidades 1 y 2 son similares por lo que se asume que tampoco tuvieron un efecto distintivo comparando ambas localidades. Sin embargo, existen algunas diferencias entre la profundidad (123 y 76 cm, loc. 1 y 2 respectivamente) y textura de los horizontes de los perfiles de suelo tomados como representativos de cada localidad. A su vez, el agua potencialmente disponible también es diferente, siendo el de la localidad 1 una categoría levemente más alta que el de la localidad 2, por lo que la discusión se enfoca en estos últimos tres parámetros del suelo. De esta manera se podría inferir a grandes rasgos el efecto de estos parámetros del suelo sobre las propiedades de la madera de *E. bosistoana*.

El suelo de la localidad 1 al tener mayor rango de agua disponible, mayor profundidad de los horizontes superficiales (A y E) y textura arenosa, pudo haber favorecido la absorción de agua y nutrientes del suelo puesto que las raíces pudieron explorar una mayor área comparado al suelo de la localidad 2, que es menos profundo y con horizontes más arcillosos.

Según la bibliografía, la tasa de crecimiento es uno de los factores más importantes que generan variaciones entre las distintas propiedades de la madera y parámetros como agua en el suelo son determinantes en la variación de la tasa de crecimiento [11], [109]. La tendencia es que a mayor tasa de crecimiento, la densidad básica sea menor, aunque existen estudios donde esta tendencia no es tan lineal [110]. Al tener mayores recursos (hídricos, nutricionales, suelos profundos, entre otros), los árboles de la localidad 1 tendrían una mayor tasa de crecimiento que los de la localidad 2, por lo que se esperaría que la densidad fuera inferior respecto a esta última, al comparar edades similares.

La inferencia anterior no puede ser tomada como conjetura por lo que sería necesario contar con mayor cantidad de información sobre los árboles durante todo su periodo de vida, como por ejemplo registros de DAP (diámetro a la altura del pecho) y/o alturas, estimando así la tasa de crecimiento para las localidades 1 y 2. No existen estos registros debido a que los árboles

sufrieron daños por heladas por lo que UPM no continuó evaluando la especie en estas localidades. Posiblemente, el daño de las heladas pudo haber ocasionado alguna variación en la tasa de crecimiento y por ende las propiedades de la madera también pudieron verse afectadas en alguna medida.

La localidad 1 tenía aproximadamente el triple de edad que la localidad 2 (23 y 7 años respectivamente), por lo que la edad fue una de las variables que generaron las diferencias en las propiedades de la madera de *E. bosistoana*. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, las variables edad y suelo no pudieron desacoplarse, por lo que las diferencias en las propiedades se deben al conjunto y no se sabe *a priori* el efecto de cada una.

Por otro lado, la proporción de madera juvenil en los árboles de las localidades 1 y 2 pudo incidir en las propiedades de la madera (por ejemplo en la densidad) dado que la madera juvenil se caracteriza por una tasa de crecimiento más rápida, menor densidad y resistencia, comparado a la madera adulta [12], [111].

Otra posible variable que pudo generar un efecto sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera es la procedencia ya que la semilla utilizada en la localidad 1 y 2 eran distintas. Para las demás variables como el marco de plantación y manejos silviculturales, fueron las mismas en las localidades 1 y 2, por lo que, al igual que al clima, se las descartan como variables que causaron las diferencias en las propiedades de la madera.

6. CONCLUSIONES GENERALES

Las diferencias entre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *E. bosistoana* de las localidades 1 y 2, se pueden atribuir al efecto combinado de la edad y el suelo. Dentro de la variable suelo, los parámetros contrastantes fueron la profundidad, textura de los horizontes superficiales de cada perfil de suelo y en menor medida el agua potencialmente disponible. En tanto a la variable clima, las tres localidades no presentaron diferencias significativas para el rango de años estudiado, por lo que las diferencias encontradas en las propiedades físicas y mecánicas no se deben a las temperaturas, precipitaciones y radiación.

Si bien la localidad 3 no ha sido evaluada debido a que se contó con una única troza, la caracterización muestra que es una localidad que podría generar algunas limitantes para un adecuado crecimiento de los árboles, debido a la textura arcillosa del perfil del suelo considerado. De acuerdo a la clasificación de Sganga, es una localidad “poco apta” para el cultivo forestal. Geográficamente, se puede notar que en la región de esta localidad no hay plantaciones comerciales de ninguna especie, a no ser pequeñas cortinas y montes de abrigo. Aunque esta última aseveración puede deberse también a criterios políticos ya que no son suelos de prioridad forestal.

A partir de los resultados de las distintas propiedades físicas y mecánicas, se concluye que esta especie puede ser utilizada a nivel estructural como por ejemplo en pisos y construcción, entre otros elementos que requieren alta dureza y durabilidad. En tanto a la estabilidad dimensional y los coeficientes de contracción, se puede considerar a la madera de *E. bosistoana* como estable.

Finalmente, el desarrollo de este trabajo aumenta el conocimiento sobre esta especie en Uruguay, siendo el segundo en el país a lo que refiere a las propiedades de la madera, y también a nivel internacional debido a los pocos estudios existentes. La información aquí generada y presentada aporta al conocimiento climático y edáfico de tres localidades de Uruguay, como así a las propiedades de una especie que aún no es explotada comercialmente. Este tipo de conocimiento puede ser tenido en cuenta al momento de tomar decisiones estratégicas en cuanto a la diversificación de especies con destino comercial.

6.1 Perspectivas a futuro

Con el fin de continuar y profundizar el estudio de esta especie y analizar el efecto de alguna variable externa, se recomienda realizar algunas estrategias que pueden ser enriquecedoras para la investigación.

Se plantea (en el caso de contar con una parcela de árboles de esta especie) realizar una selección aleatoria de individuos de manera de capturar la variabilidad natural dentro de la parcela en cuestión. A su vez, recopilar más árboles y que tengan edades iguales (o similares) para que la edad no tenga influencia tan marcada, de manera de capturar el efecto de otras variables de interés, si corresponde.

Se sugiere también que se realicen muestreos cada cierto intervalo de tiempo con el fin de determinar las propiedades de la madera en distintos momentos de crecimiento para cuantificar y detectar las tendencias de las mismas. Además, al tener mayor información a lo que refiere al diámetro y altura de los árboles, se puede estimar la tasa de crecimiento anual de los mismos y de esta manera evaluar si existe una relación directa con las propiedades de la madera.

Debido a los objetivos y alcance de este trabajo final de grado, en tanto a la variable suelo, se trabajó en base a la información disponible a nivel virtual (mapas, visores, entre otros) y con las tablas con los análisis físico-químicos de suelos cercanos a las tres localidades. Si bien no son los suelos donde precisamente estaban los árboles, no dejan de ser menos válidos ni tampoco muy generales, ya que engloba una variación que se da comúnmente en las plantaciones forestales donde en pocos metros se pueden observar grandes diferencias. De todas maneras, se plantea realizar varios muestreos de los suelos acompañado de los respectivos estudios físico-químicos de los mismos, lo cual permitiría tener una mayor precisión de los parámetros edáficos de cada localidad. Asimismo, se podría implementar el monitoreo de clima de manera continua (por ejemplo con una estación meteorológica instalada en el local de plantación).

Por otro lado, cuando se quiera comparar el efecto aislado de alguno de las variables (como por ejemplo el suelo solamente), es fundamental reducir la variabilidad de factores que no sean de interés evaluar. De esta manera el estudio sería más completo, aunque para llevarlo a cabo es necesario una considerable inversión en tiempo (años) y personal dedicado al seguimiento continuo de los árboles. Para este fin, se plantea un trabajo directo el cual será extraer árboles de la localidad 2 dentro de 14 años (en el 2035) para estudiar las propiedades físicas y mecánicas, y volver a recopilar la información climática para el período de tiempo correspondiente. Con estos resultados, sería posible el contraste con la localidad 1 y con la propia localidad 2, pero a la edad de 7 años.

Por último, se podrían incluir otros ensayos como el de tracción y durabilidad natural, con el fin de aumentar el conocimiento de esta especie en Uruguay.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Soust, “A 25 años de la aprobación de la ley 15.939 (Ley Forestal),” *Anu. OPYPA 2012*, vol. 939, pp. 167–172, 2012.
- [2] E. Arriaga, “Resultados de la Cartografía Forestal Nacional,” 2018.
- [3] DGF - MGAP, “Superficie efectiva en hectáreas por uso forestal y especies por departamento (2018),” 2018.
- [4] SPF - Sociedad de Productores Forestales del Uruguay, “Forestación y Zonas Forestadas.” <http://www.spf.com.uy/forestacion-zonas-forestadas/> (accessed May 20, 2021).
- [5] J. Paseyro, “Más vale especie conocida que otra por conocer,” *Rev. For. N°11*, 16-22., pp. 16–22, 2015, [Online]. Available: <http://www.revistaforestal.uy/wp-content/uploads/2015/04/Silvicultura-11.pdf>.
- [6] Y. Li and C. Altaner, “Screening Eucalyptus bosistoana for heartwood,” *Spec. Wood Prodcnts Res. Partnersh.*, vol. New Zealan, no. August, 2016.
- [7] C. Mantero, H. O'Neill, A. Cardoso, and A. Castagna, “Propiedades físicas y mecánicas de la madera de una población de Eucalyptus bosistoana F. Muell. cultivada en Uruguay,” *Agrociencia Uruguay*, vol. 18, no. 1, pp. 65–74, 2014, doi: 10.2477/vol18iss1pp65-74.
- [8] C. A. Brussa, *Eucalyptus: especies de cultivo de más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Montevideo (Uruguay): Hemisferio Sur, 1994.
- [9] G. Balmelli and F. Resquin, “Comportamiento de especies de Eucalyptus para sombra y abrigo en suelos sobre basalto,” *Rev. INIA*, pp. 25–27, 2005.
- [10] A. Cardoso and A. Castagna, “Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de una población de Eucalytus bosistoana cultivado en Uruguay,” *Fac. Agron. UdelaR*, p. 63, 2012.
- [11] B. J. Zobel and J. P. Van Buijten, *Wood Variation*, vol. 53, no. 9. 1989.
- [12] M. F. V. Rocha, T. R. L. A. Veiga, B. C. D. Soares, A. C. C. de Araújo, A. M. M. Carvalho, and P. R. G. Hein, “Do the growing conditions of trees influence the wood properties?,” *Floresta e Ambient.*, vol. 26, no. 3, 2019, doi: 10.1590/2179-8087.035318.
- [13] H. Pretzsch and A. Rais, “Wood quality in complex forests versus even-aged monocultures: review and perspectives,” *Wood Sci. Technol.*, vol. 50, no. 4, pp. 845–880, 2016, doi: 10.1007/s00226-016-0827-z.
- [14] S. Salekin, E. G. Mason, J. Morgenroth, M. Bloomberg, and D. F. Meason, “Modelling the effect of microsite influences on the growth and survival of juvenile Eucalyptus globoidea (Blakely) and Eucalyptus bosistoana (F. Muell) in New Zealand,” *Forests*, vol. 10, no. 10, 2019, doi: 10.3390/f10100857.
- [15] E. A. Penón *et al.*, “Modelos de crecimiento de Eucalyptus globulus a partir de las propiedades del suelo,” no. 1992, pp. 44–48, 2006.
- [16] M. D. Dos Santos Barzotto Ribeiro, S. A. Rodrigues, and A. W. Ballarin, “Multivariate association of wood basic density with site and plantation variables in Eucalyptus spp.,” *Can. J. For. Res.*, vol. 50, no. 2, pp. 193–202, 2020, doi: 10.1139/cjfr-2019-0220.
- [17] M. N. F. de Almeida *et al.*, “Heartwood variation of Eucalyptus urophylla is influenced by climatic conditions,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 458, no. October 2019, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1016/j.foreco.2019.117743.

- [18] I. Nicholas and P. Millen, “Durable Eucalypt Leaflet Series Eucalyptus bosistoana Why grow durable eucalypts ? Natural distribution in Australia Australian and New Zealand grown wood characteristics,” no. December, 2012.
- [19] C. Altaner and M. Sharma, “Technical Report Heartwood in Eucalyptus bosistoana Authors :,” no. March, 2019.
- [20] M. R. Jacobs, *Eucalypts for planting*, vol. 11. 1981.
- [21] “Eucalyptus bosistoana,” *Euclid - Online edition*.
https://apps.lucidcentral.org/euclid/text/entities/eucalyptus_bosistoana.htm?zoom_highlight=Eucalyptus+bosistoana (accessed Aug. 15, 2020).
- [22] K. Fern, “Eucalyptus bosistoana - Useful Tropical Plants.”
<http://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Eucalyptus+bosistoana> (accessed Aug. 23, 2020).
- [23] G. M. Chippendale, “Eucalyptus bosistoana,” *Flora of Australia*, 1988.
https://profiles.ala.org.au/opus/foa/profile/Eucalyptus_bosistoana (accessed Aug. 15, 2020).
- [24] “Eucalyptus bosistoana F. Muell.”
http://www.plantillustrations.org/illustration.php?id_illustration=63161 (accessed Aug. 15, 2020).
- [25] P. Zanatta, T. Baldin, D. D. Ribes, P. Soares, B. Dos, and D. Alberto, “Macroscopia da Madeira de Eucalyptus como ferramenta para identificação a campo,” vol. 53, no. 4, pp. 587–595, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.31055/1851.2372.v53.n4.21981>.
- [26] H. E. Dadswell, “The Anatomy of Eucalypt Woods,” *For. Prod. Lab. Div. Appl. Chem. Technol. Pap.*, vol. 66, no. 66, p. 28, 1972.
- [27] D. Boland *et al.*, *Forest Trees Of Australia*. CSIRO Publishing, 2006.
- [28] I. Southwell, “Eucalyptus leaf oils: Use, chemistry, distillation and marketing,” *Phytochemistry*, vol. 31, no. 6, p. 2193, 1992, doi: 10.1016/0031-9422(92)80403-2.
- [29] O. Høibø and G. I. Vestøl, “Modelling the variation in modulus of elasticity and modulus of rupture of scots pine round timber,” *Can. J. For. Res.*, vol. 40, no. 4, pp. 668–678, 2010, doi: 10.1139/X10-021.
- [30] G. Balmelli and F. Resquin, “Evaluación productiva de especies de Eucalyptus en Zona 9, a los 13 año,” *INIA Ser. Act. Difusión*, vol. 535, pp. 9–12, 2008, [Online]. Available: [http://www.ainfo.inia.uy/consulta/busca?b=pc&id=8091&biblioteca=vazio&busca=forestacion&qFacets=\(forestacion\) AND \(\(assunto:%22EUCALYPTUS%22\)\)&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1](http://www.ainfo.inia.uy/consulta/busca?b=pc&id=8091&biblioteca=vazio&busca=forestacion&qFacets=(forestacion) AND ((assunto:%22EUCALYPTUS%22))&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1).
- [31] T. G. Townsend, H. Solo-Gabriele, T. Tolaymat, and K. Stook, “Impact of chromated copper arsenate (CCA) in wood mulch,” *Sci. Total Environ.*, vol. 309, no. 1–3, pp. 173–185, 2003, doi: 10.1016/S0048-9697(03)00047-0.
- [32] J. A. Herrera Barbosa, “Propiedades del Suelo.”
<https://www.monografias.com/trabajos65/propiedades-suelo/propiedades-suelo.shtml> (accessed Oct. 20, 2020).
- [33] L. Rucks, F. García, A. Kaplán, J. Ponce de León, and M. Hill, “Propiedades Físicas del Suelo,” *Fac. Agron. UdelaR*, 2004, doi: 10.1039/TF9686403358.
- [34] United States Of Department Agriculture (USDA), “Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo,” p. 88, 1999, [Online]. Available: https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/WI/Soil_Quality_Test_Kit_Guide.pdf.

- [35] F. Dalla Tea, “Factores del suelo que afectan la productividad del *Eucalyptus grandis*,” *Inf. For. INTA EEA Concordia*, 1995, C.9, p. 1-6., 1995.
- [36] R. Sands and D. R. Mulligan, “Water and nutrient dynamics and tree growth,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 30, no. 1–4, pp. 91–111, 1990, doi: 10.1016/0378-1127(90)90129-Y.
- [37] J. J. Gaitán, E. A. Penón, and M. C. Costa, “Distribución de raíces de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenni* y su relación con algunas propiedades del suelo,” *Ciência Florestal, St. Maria*, pp. 33–41, 2005.
- [38] FAO, “Factores ambientales.” <http://www.fao.org/3/x8234s/x8234s08.htm> (accessed Oct. 25, 2020).
- [39] FAO, “Glosario de términos sobre humedad del suelo.” <http://www.fao.org/3/y4690s/y4690s02.htm> (accessed Nov. 23, 2020).
- [40] J. P. Castaño, A. Giménez, M. Ceroni, J. Furest, and R. Aunchayna, *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. 2011.
- [41] “Influencia de la temperatura ambiental en las plantas,” *CANNA España*. https://www.canna.es/influencia_temperatura_ambiental_en_las_plantas (accessed Nov. 06, 2020).
- [42] “Sección 6. Explicaciones sobre el desarrollo de la planta,” *FAO*. <http://www.fao.org/3/x8234s/x8234s0b.htm> (accessed Oct. 20, 2020).
- [43] D. S. Thomas, K. D. Montagu, and J. P. Conroy, “Changes in wood density of *Eucalyptus camaldulensis* due to temperature - The physiological link between water viscosity and wood anatomy,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 193, no. 1–2, pp. 157–165, 2004, doi: 10.1016/j.foreco.2004.01.028.
- [44] P. J. Ferrar, R. O. Slatyer, and J. A. Vranjic, “Photosynthetic temperature acclimation in *Eucalyptus* species from diverse habitats, and a comparison with *Nerium oleander*,” *Aust. J. Plant Physiol.*, vol. 16, no. 2, pp. 199–217, 1989, doi: 10.1071/PP9890199.
- [45] B. E. Medlyn *et al.*, *An Assessment of the Vulnerability of Australian Forests to the Impacts of Climate Change: 2. Biophysical impacts of climate change on Australia’s forests*, no. January. 2011.
- [46] R. Asshoff, G. Zotz, and C. Körner, “Growth and phenology of mature temperate forest trees in elevated CO₂,” *Glob. Chang. Biol.*, vol. 12, no. 5, pp. 848–861, 2006, doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01133.x.
- [47] “Elección de especies para plantación,” *FAO*. <http://www.fao.org/3/AC459S/AC459S17.htm> (accessed Jan. 13, 2021).
- [48] “El eucalipto en la repoblacion forestal,” *FAO*. <http://www.fao.org/3/AC459S/AC459S18.htm> (accessed Dec. 02, 2020).
- [49] “Requerimientos ecológicos *Eucalyptus globulus*,” *FAO*. http://www.gestionforestal.cl/pt_02/plantaciones/txt/ReqEcol/REGLO.htm (accessed Dec. 20, 2020).
- [50] “El eucalipto en la repoblacion forestal - *E. grandis*,” *FAO*. <http://www.fao.org/3/AC459S/AC459S20.htm> (accessed Nov. 20, 2020).
- [51] “Requerimientos ecológicos *Eucalyptus nitens*,” *FAO*. http://www.gestionforestal.cl/pt_02/plantaciones/txt/ReqEcol/RENIT.htm (accessed Nov. 25, 2020).
- [52] R. Albuquerque, “Environmental Effects on *Eucalyptus saligna* Sm. Wood Density,” vol.

XXXVII, 1977.

- [53] G. Downes *et al.*, “Wood properties of Eucalyptus globulus at three sites in Western Australia: Effects of fertiliser and plantation stocking,” *Aust. For.*, vol. 77, no. 3–4, pp. 179–188, 2014, doi: 10.1080/00049158.2014.970742.
- [54] J. Azcón-Bieto and M. Talón, *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. 2013.
- [55] DGRN - MGAP, “VISOR CONEAT.” <http://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/coneat/> (accessed Oct. 21, 2020).
- [56] “Visualizador - MVOTMA - Uruguay.” <https://www.ambiente.gub.uy/visualizador/index.php?vis=sig> (accessed Oct. 22, 2020).
- [57] MGAP, “Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000,” *Descripcion de la Unidades de Suelos*, vol. 3, no. January 1976. p. 456, 1976.
- [58] H. Molfino, “Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay - Departamento de Río Negro 1/200.000,” *Descr. la Unidades Suelos*, 2002.
- [59] MGAP/DSF, “Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1000000.” 1976, [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.bibna.gub.uy:8080/jspui/bitstream/123456789/5486/1/C.02.992.G5371C5.1973.I5.jpg>.
- [60] P. Prieto, “Base cartográfica para el desarrollo de una metodología de monitoreo de propiedades físicas y químicas de suelos forestales,” p. 93, 2011.
- [61] “KNMI.” <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/about> (accessed Oct. 21, 2020).
- [62] “Climate Explorer: Field.” https://climexp.knmi.nl/select.cgi?id=26389aa9533dfca035cd88b3b9e14f87&field=cru4_tmp (accessed Oct. 21, 2020).
- [63] R. A. Suárez, G. Abal, P. Musé, and R. Siri, “Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay,” *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1237–1246, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.072.
- [64] “Mapa Solar del Uruguay V2.” <http://les.edu.uy/online/msuv2/> (accessed Oct. 26, 2020).
- [65] F. Préchac, A. Durán, A. Califra, and M. Hill, “Propiedades Hídricas del Suelo - Agua en el suelo (capítulo 2).” .
- [66] O. Coronel, *Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas*. 1996.
- [67] F. Resquin, C. Rachid, and Z. Bennadji, “Raleo en Eucalyptus grandis: algunos efectos sobre la cantidad y calidad de la madera producida,” *Rev. INIA*, pp. 27–30, 2007.
- [68] M. Johansson, *Design of timber structures - Chapter 2 Structural properties of sawn timber and engineered wood products*, vol. 1. 2016.
- [69] Universidad de Guadalajara, “Caracterización Tecnológica de las Especies de Madera,” *Proy. ITTO PD 385/05 Rev.4*, vol. 4, p. 75, 2012, [Online]. Available: [http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2596/Competition/INFORME_FINAL_DEL_PROYECTO_ITTO_PD_385_05_Rev_4_\(I_F\).pdf](http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2596/Competition/INFORME_FINAL_DEL_PROYECTO_ITTO_PD_385_05_Rev_4_(I_F).pdf).
- [70] A. P. del Castillo, “Propiedades Mecánicas y Calidad de Madera de Eucalyptus grandis del Norte de Uruguay,” *Proy. LATU-JICA. Inf. Investig. No4*, p. 35, 2003.
- [71] J. Doldán, “Indicadores de Calidad de Madera Eucalyptus grandis de Río Negro, Uruguay,” *Proy. Tecnol. Ens. Prod. For.*, 2003.

- [72] J. C. Duarte Pereira, A. Rioyei Higa, J. O. Brito, and R. C. V. Higa, “Fichas de Caracterização Silvicultural e da Madeira de Espécies e Procedências de Eucalipto Plantadas Experimentalmente em Guaíba-RS,” *Embrapa Doc.* 72, 2002.
- [73] G. Balmelli, F. Resquin, N. Altier, and V. Marroni, “Evaluación sanitaria, productiva y de propiedades de madera de diferentes orígenes de *Eucalyptus globulus* a los 11 años,” *INIA TACUAREMBO - Estac. Exp. del Norte. Día Campo For. en la Región Sureste*, pp. 1–9, 2005.
- [74] B. Belleville, P. Ashley, and B. Ozarska, “Wood planing properties of Australian plantation-grown Eucalypts,” *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 18, no. 3, pp. 425–434, 2016, doi: 10.4067/S0718-221X2016005000038.
- [75] A. Cardoso, M. Cagno, P. Cárdenas, and F. Gatto, “Contracción, hinchamiento y peso específico aparente de madera de eucalipto colorado (*Eucalyptus tereticornis* Smith),” *Innotec*, vol. 0, no. 8, pp. 5–12, 2013, doi: 10.26461/innotec.v0i8.
- [76] R. Sargent, “Evaluating dimensional stability in solid wood: a review of current practice,” *J. Wood Sci.*, vol. 65, no. 1, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1186/s10086-019-1817-1.
- [77] J. E. CALVACHE, “Características y propiedades de la madera.” <https://javiercalvache.es.tl/SEMANA-2.htm> (accessed Apr. 20, 2021).
- [78] V. Baño Gómez and L. Moya Silva, “Pliego de condiciones técnicas para la madera estructural en la edificación en Uruguay,” 2015.
- [79] C. F. Calvo, A. D. Cotrina, A. G. Cuffré, J. C. Piter, P. M. Stefani, and E. A. Torrán, “Radial and Axial Variation of Swelling, Anisotropy and Density, in Argentinean *Eucalyptus grandis*,” *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, pp. 159–168, 2006.
- [80] E. Spavento, G. Keil, and S. Monteoliva, “Propiedades Mecánicas de la Madera,” *Xilotecnología*, pp. 1–26, 2008.
- [81] USDA Forest Service, “Wood Handbook - Wood as an Engineering Material,” pp. 1–486, 2010, [Online]. Available: [papers2://publication/uuid/3258D7CF-6851-4BF4-BBCB-CD58D90BEAE1](https://www.fpl.fs.fed.us/pubs/p20100100100012).
- [82] W. Carvalho, L. Canilha, A. Ferraz, and A. M. F. Milagres, “Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira,” *Quim. Nova*, vol. 32, no. 8, pp. 2191–2195, 2009, doi: 10.1590/s0100-40422009000800033.
- [83] M. Teixeira de Souza, S. L. Goulart, and M. Mirmehdi, “Ângulo microfibrilar e contrações das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla*,” no. September, 2015.
- [84] J. R. Sotomayor-Castellanos, “Comportamiento en flexión estática de vigas de madera antigua de *Picea abies*,” *Nov. Sci.*, vol. 7, no. 13, pp. 208–227, 2015, [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052015000100012&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.mx/pdf/ns/v7n13/v7n13a12.pdf.
- [85] UNIT, “UNIT_1137_2007 Metodo de ensayo para la determinación de los modulos de elasticidad y rotura en ensayo de flexión estatica en maderas.” 2007.
- [86] F. A. R. Lahr, M. C. D. J. A. Nogueira, V. A. De Araujo, J. S. Vasconcelos, A. L. Christoforo, and R. Gum, “Wood utilization of *Eucalyptus grandis* in structural elements: densities and mechanical properties,” vol. 4430, pp. 642–647, 2018.
- [87] M. Sanchez Acosta, “Experiencia Argentina en el uso de la madera de eucalipto,” *An. do Semin. Int. Util. da Madeira Eucalipto para Serraria*, vol. 34, no. 3200, pp. 74–92,

- 1995, [Online]. Available: http://www.ipef.br/publicacoes/seminario_serraria/cap09.pdf.
- [88] Y. Sánchez, Á. Gallardo, and R. Delgado, “Comparison of the compression resistance in native woods,” vol. 4, pp. 52–56, 2018.
- [89] K. R. Bootle, *Wood in Australia: types, properties, uses*. Sydney : McGraw-Hill, 1983., 1983.
- [90] M. Hernández, C. Zaderenko, and S. Monteoliva, “Growth stresses and physical properties of Eucalyptus dunnii wood in Argentina,” *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 16, no. 3, pp. 373–384, 2014, doi: 10.4067/S0718-221X2014005000030.
- [91] M. C. Touza Vázquez, “Tensiones de crecimiento en Eucalyptus globulus de galicia (España). Influencia de la silvicultura y estrategias de aserrado,” *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 3, no. 1–2, pp. 68–89, 2001, doi: 10.4067/S0718-221X2001000100008.
- [92] DGF - MGAP, “Uruguay - Alternativas para la Transformación Industrial del Recurso Forestal,” 1996. <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea19s/ch013.htm> (accessed May 20, 2021).
- [93] ASTM, “D2395 Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials,” *Test*, vol. 93, no. Reapproved, pp. 1–9, 2008, doi: 10.1520/D2395-07AE01.2.
- [94] ASTM D143, “American Society for Testing and Materials- ASTM. D143-94: Standard methods of testing small clear samples of timber,” *Am. Soc. Test. Mater. - ASTM. Annu. B. ASTM*, vol. 94, no. Reapproved, p. 31, 1994, doi: 10.1520/D0143-09.2.
- [95] UNIT, “UNIT 363: Maderas; determinación de la contracción,” 2008.
- [96] F. Kollmann and W. Coté, *Principles of wood science and technology*. Berlin: Springer Verlag, 1984.
- [97] “Cómo se interpreta un Diagrama de Cajas y Bigotes?” <https://www.analisisdedatos.org/single-post/2019/04/05/cómo-se-interpreta-un-diagrama-de-cajas-y-bigotes> (accessed Jul. 20, 2021).
- [98] esri, “Diagrama de caja.” <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/geoprocessing/charts/box-plot.htm>.
- [99] K. MA and S. J., “Sample Size Calculators,” *UCSF CTSI*. .
- [100] Green S B, “How Many Subjects Does It Take To Do A Regression Analysis,” *Multivariate Behav. Res.*, vol. 26, no. 3, pp. 499–510, 1991, doi: 10.1207/s15327906mbr2603.
- [101] R Core Team, “R: A language and environment for statistical computing.” R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria., 2020, [Online]. Available: <https://www.r-project.org/>.
- [102] C. Jorge and D. Gómez, “Taladro de los eucaliptos,” *Cart. N°27 - INIA*, 2014.
- [103] I. L. de Lima, “Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de Eucalyptus grandis Hill ex-Maiden,” p. 137, 2005.
- [104] J. G. Moglia and M. Pece, “Estimación de las tensiones de crecimiento en individuos selectos de Eucalyptus camaldulensis mediante extensómetro e índice de rajado,” *Quebracho (Santiago del Estero)*, vol. 22, no. 2, pp. 57–65, 2014.
- [105] M. Monné, M. Bianchi, a Sánchez, and R. Escudero, “Cerambícidos (Coleoptera) que atacan Eucalyptus globulus y Eucalyptus grandis en Uruguay,” *Agrociencia*, pp. 63–68, 2002, [Online]. Available:

<http://www.fagro.edu.uy/~agrocienza/index.php/directorio/article/view/558>.

- [106] J. Porcile, “El Taladro del Eucalipto,” *Rev. PLAN Agropecu.*, [Online]. Available: <http://www.fagro.edu.uy/~agrocienza/index.php/directorio/article/view/558>.
- [107] C. Rozas and C. Montero, “Modelo matemático para predecir las propiedades físicas en madera de *Eucalyptus nitens* para diferentes alturas y edades del árbol,” *Cienc. Florest.*, pp. 980–994, 2020, doi: <https://doi.org/10.5902/1980509832493>.
- [108] T. C. Juela Q., “Caracterización de las propiedades físicas de la madera de *Eucalyptus saligna* Smith en la provincia de Loja,” 2015.
- [109] G. Downes, D. Worledge, L. Schimleck, C. Harwood, J. French, and C. Beadle, “The effect of growth rate and irrigation on the basic density and kraft pulp yield of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*,” no. November, pp. 13–22, 2006.
- [110] J. Wilkes, “The influence of rate of growth on the density and heartwood extractives content of eucalypt species,” *Wood Sci. Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 113–120, 1984, doi: 10.1007/BF00350470.
- [111] C. R. Sette, M. Tomazello Fo, J. L. Lousada, D. Lopes, and J. P. Laclau, “Relationship between climate variables, trunk growth rate and wood density of *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden tress,” *Rev. Arvore*, vol. 40, no. 2, pp. 337–346, 2016, doi: 10.1590/0100-67622016000200016.
- [112] IAWA Committee, “IAWA List of Microscopic Features For Hardwood Identification,” *AIWA Bull. n.s.*, vol. 10, no. 3, pp. 219–332, 1989.
- [113] IAWA, “Inside Wood Database.” <https://insidewood.lib.ncsu.edu/search?2> (accessed Jul. 04, 2021).

ANEXO A: Variable suelo

A continuación se presentan tablas donde se resumen los parámetros de la variable suelo: textura, pH y profundidad de los horizontes que conforman el perfil del suelo de cada localidad.

Localidad 1						
Horizonte	Clase Textural	Referencia	Fracción	pH	Profundidad (cm)	Espesor (cm)
A	Ar	Arenoso	87,5% Arena 6,3% Limo 6,2% Arcilla	6,4	0-56	56
E	Ar	Arenoso	88,0% Arena 5,7% Limo 6,3% Arcilla	6,1	56-72	16
Bt1	FAr	Franco Arenoso	76,3% Arena 7% Limo 16,7% Arcilla	5,7	72-84	12
Bt2	FAc	Franco Arcillosa	64,4% Arena 5,8% Limo 29,8% Arcilla	5,7	84-113	29
BC	FAc	Franco Arcillosa	58,8% Arena 13,2% Limo 28% Arcilla	5,5	113-123	10

Tabla 31. Descripción del perfil de suelo para la localidad 1.

Localidad 2						
Horizonte	Clase Textural	Referencia	Fracción	pH	Profundidad (cm)	Espesor (cm)
A1	ArF	Areno Francosa	82,6% Arena 9% Limo 8,4% Arcilla	6,3	0-22	22
A2	FAr	Franco Arenosa	78,2% Arena 10,9% Limo 10,9% Arcilla	5,9	22-41	19
Bt1	Ac	Arcillosa	38,7% Arena 7,5% Limo 53,8% Arcilla	5,1	41-57	16
Bt2	AcAr	Arcillo arenosa	49,3% Arena 7,6% Limo 43,1% Arcilla	5,3	57-71	14
BC	FAcAr	Franco Arcillo Arenosa	62,2% Arena 5,6% Limo 32,2% Arcilla	5,2	71-76	5

Tabla 32. Descripción del perfil de suelo para la localidad 2.

Localidad 3						
Horizonte	Clase Textural	Referencia	Fracción	pH	Profundidad (cm)	Espesor (cm)
Ap	AcL	Arcillo limoso	7,1% Arena 40,8% Limo 52,1% Arcilla	6,1	0-15	15
BA	Ac	Arcilloso	7,4% Arena 26,1% Limo 66,5% Arcilla	6,1	15-29	14
Bt	Ac	Arcilloso	8,1% Arena 24,6% Limo 67,3% Arcilla	6,55	29-51	22
Btss	Ac	Arcilloso	7,7% Arena 25,6% Limo 66,7% Arcilla	6,75	51-70	19
BC	Ac	Arcilloso	23,4% Arena 22,1% Limo 54,5% Arcilla	7,10	70-78	8

Tabla 33. Descripción del perfil de suelo para la localidad 3.

ANEXO B: Variable clima

En tanto a la variable clima, se presentan tablas donde se muestran las temperaturas, precipitaciones y radiación, para los periodos de crecimiento de los árboles de las tres localidades (L1, L2 y L3). Estos resultados son los obtenidos de los modelos del KNMI.

Precipitaciones acumuladas - promedio mensual												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
L1	136,79	142,15	118,87	150,27	104,06	81,15	70,81	89,45	96,83	132,55	113,18	118,60
L2	140,23	163,10	93,08	129,84	107,85	53,43	80,97	121,59	114,79	142,12	109,97	137,78
L3	134,23	143,70	125,06	159,90	106,61	82,66	69,13	80,16	102,25	137,63	121,28	127,46
Temperatura media mensual												
L1	25,20	24,17	22,21	18,45	14,94	12,19	11,75	13,59	15,19	18,24	21,08	23,44
L2	24,89	24,14	21,18	18,69	15,28	12,05	11,61	13,52	15,18	17,81	20,99	23,66
L3	25,29	24,19	22,32	18,76	15,12	12,46	12,06	13,98	15,47	18,47	21,32	23,66
Temperatura mínima mensual												
L1	19,14	18,57	16,53	13,01	10,07	7,56	6,76	8,09	9,66	12,77	15,01	17,28
L2	19,11	18,73	15,48	13,44	10,88	7,16	6,89	8,04	9,79	12,64	15,10	17,66
L3	19,26	18,62	16,63	13,33	10,28	7,66	7,10	8,49	9,91	12,91	15,28	17,47
Temperatura máxima mensual												
L1	31,31	29,81	27,93	23,93	19,86	16,87	16,79	19,13	20,77	23,77	27,20	29,64
L2	30,71	29,61	26,93	24,01	19,73	17,01	16,38	19,03	20,59	23,00	26,95	29,74
L3	31,36	29,83	28,06	24,25	20,00	17,32	17,07	19,53	21,08	24,09	27,41	29,90

Tabla 34. Se muestran los promedios mensuales para el período de crecimiento de los árboles de cada localidad, para las precipitaciones y temperaturas.

Temperaturas medias anuales (°C)			
Año	L1	L2	L3
1995			18,35
1996	18,28		18,47
1997	18,78		19,03
1998	17,80		18,02
1999	18,05		18,31
2000	18,05		18,24
2001	18,75		18,97
2002	18,41		18,63
2003	17,90		18,11
2004	18,39		18,61
2005	18,31		18,56
2006	18,76		19,01
2007	17,70		17,93
2008	18,73		18,96
2009	18,41		18,63
2010	18,25		18,51
2011	18,13		18,39
2012	18,81	18,49	19,06
2013	18,14	17,86	18,37
2014	18,63	18,37	18,88
2015	18,68	18,41	18,97
2016	17,94	17,70	
2017	19,03	18,78	
2018	18,56	18,31	
2019	18,36	18,08	

Tabla 35. Temperaturas medias anuales para el período de crecimiento correspondiente a la vida de los árboles de cada localidad.

Precipitaciones acumuladas anuales (mm)			
Año	L1	L2	L3
1995			1125
1996	1125		1189
1997	1234		1263
1998	1456		1557
1999	976		988
2000	1432		1480
2001	1599		1638
2002	2009		2093
2003	1589		1637
2004	1032		1113
2005	1419		1496
2006	1233		1214
2007	1471		1490
2008	819		879
2009	1298		1312
2010	1316		1328
2011	1153		1187
2012	1523	1597	1532
2013	1083	1071	1134
2014	1744	1766	1777
2015	1327	1230	1396
2016	1265	1255	
2017	1566	1475	
2018	1353	1357	
2019	1493	1407	

Tabla 36. Precipitaciones acumuladas anuales para las tres localidades, según períodos de crecimiento de los árboles.

Localidad 1 - Radiación (kWh/m ² día)			
MES	GHI	GTI	DNI
Enero	7,20	6,75	6,97
Febrero	6,05	6,05	5,97
Marzo	5,11	5,66	5,31
Abril	3,80	4,70	4,53
Mayo	2,69	3,60	3,28
Junio	2,22	3,12	2,87
Julio	2,48	3,45	3,19
Agosto	3,23	4,15	4,01
Septiembre	4,28	4,95	4,59
Octubre	5,28	5,52	5,10
Noviembre	6,64	6,37	6,66
Diciembre	7,09	6,51	6,97
Anual	4,67	5,07	4,95

Tabla 37. Radiación promedio mensual y anual para la localidad 1.

Localidad 2 - Radiación (kWh/m ² día)			
MES	GHI	GTI	DNI
Enero	7,27	6,83	7,09
Febrero	6,09	6,10	6,05
Marzo	5,14	5,71	5,41
Abril	3,80	4,73	4,57
Mayo	2,69	3,61	3,29
Junio	2,22	3,14	2,87
Julio	2,44	3,40	3,12
Agosto	3,22	4,14	4,01
Septiembre	4,30	4,98	4,63
Octubre	5,33	5,58	5,16
Noviembre	6,68	6,42	6,71
Diciembre	7,14	6,58	7,03
Anual	4,69	5,10	5,00

Tabla 38. Radiación promedio mensual y anual para la localidad 2.

Localidad 3 - Radiación (kWh/m ² día)			
MES	GHI	GTI	DNI
Enero	7,15	6,68	6,86
Febrero	6,13	6,13	6,02
Marzo	5,22	5,76	5,37
Abril	3,90	4,82	4,66
Mayo	2,77	3,69	3,36
Junio	2,30	3,22	2,97
Julio	2,57	3,57	3,32
Agosto	3,32	4,25	4,09
Septiembre	4,31	4,96	4,59
Octubre	5,39	5,62	5,25
Noviembre	6,71	6,42	6,80
Diciembre	7,17	6,57	7,09
Anual	4,75	5,14	5,03

Tabla 39. Radiación promedio mensual y anual para la localidad 3.

ANEXO C: Análisis de anatomía

Se realizaron los análisis microscópicos de la anatomía de las trozas de la localidad 3 con el microscopio electrónico de barrido Jeol JCM 6000Plus con el apoyo de MSc. Lic. Álvaro Camargo e Ignacio Mieres (ambos del CENUR – Noreste). Se utilizaron las claves de identificación [26], [112] y una base de datos online la cual cuenta con imágenes de anatomía para más de 100 especies de *Eucalyptus* [113], para comparar las muestras de las trozas 1 y 2 respecto a la 3 (que sí era *E. bosistoana*) y ver las similitudes o diferencias. De esta manera fue posible descartar a las trozas 1 y 2 ya que se trataban de otra especie de *Eucalyptus*. Si bien no se ha verificado con precisión, puede tratarse de *E. amplifolia*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, entre otras.

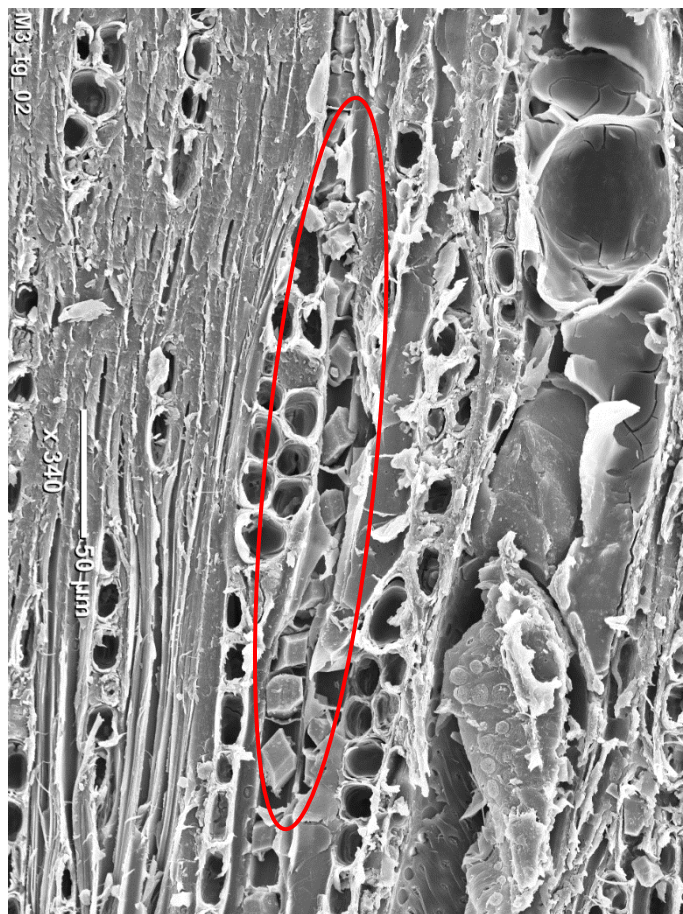


Figura 76. Troza 3. Corte tangencial (x340) de *E. bosistoana* donde se observa la presencia de cristales en el parénquima axial.

Una de las características clave para descartar las trozas 1 y 2 fue que no presentaban cristales en el parénquima axial, lo cual es una característica importante en la identificación de especies y que *E. bosistoana* se caracteriza por la presencia de cristales (figura 76) [26]. Además, se observaron diferencias en el patrón de los vasos (figura 77 y 78) y espesor de los radios. A nivel macroscópico, el duramen de las trozas 1 y 2 tenía un tono rojizo mientras que la troza 3, un tono de gris como lo menciona la bibliografía respecto a la especie (figura 76) aunque esta diferencia en el color puede deberse a contenido de extractivos en el duramen.



Figura 77. Corte transversal. Observación a lupa de vasos. Izquierda: Muestra de *E. bosistoana*. Derecha: Muestra de la troza 1 (otra especie).

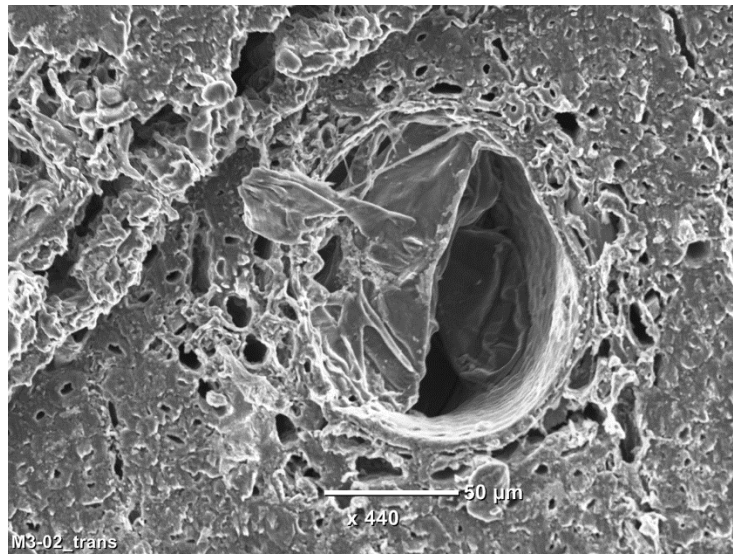
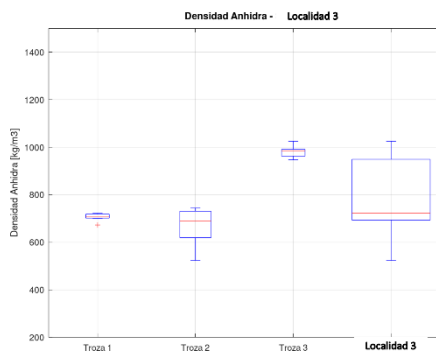
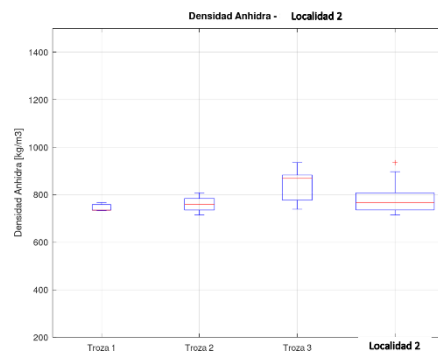
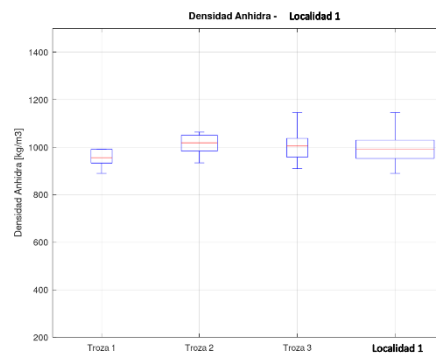
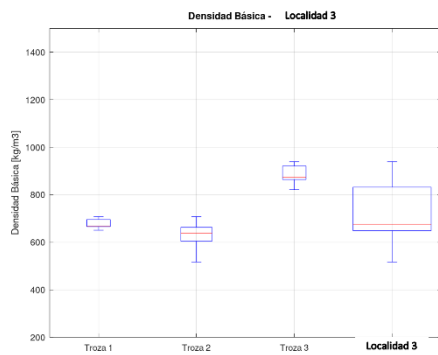
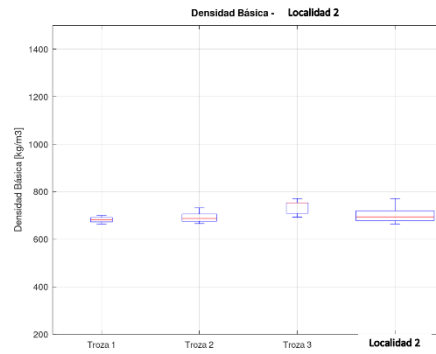
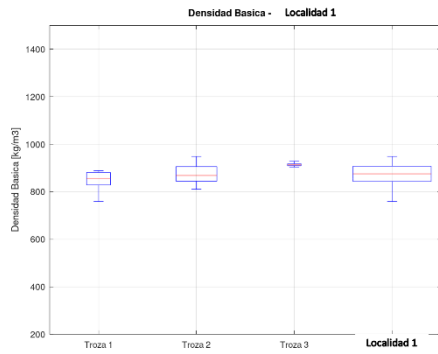


Figura 78. Corte transversal (x440) de *E. bosistoana* donde se observa la presencia de fílides en un vaso.

ANEXO D: Diagrama de cajas

A continuación se presentan los diagramas de cajas para las propiedades físicas y mecánicas, por troza y por localidad, los cuales fueron utilizados para la selección de datos.

Propiedades físicas: Densidad básica y anhidra



Propiedades mecánicas: Flexión estática, compresión paralela a la fibra y dureza

