

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UN SISTEMA SILVOPASTORIL  
DE *Eucalyptus dunnii* PARA OBTENCIÓN DE TROZAS DE DIÁMETROS FINOS  
EN BAJA DENSIDAD**

**por**

**Timoteo CHAMYAN KERIKIAN  
Valentina LÓPEZ MOREIRA**

**Trabajo final de grado  
presentado como uno de los  
requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2024**

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

---

Ing. Agr. Adriana Bussoni

---

Ing. Agr. Mariana Boscana

Tribunal:

---

Ing. Agr. Jaime Gonzales

---

Ing. Agr. Oscar Bentancour

---

Ing. Agr. Carolina Munka

Fecha: 13/09/2024

Estudiantes:

---

Timoteo Chamyan Kerikian

---

Valentina López Moreira

## AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo.

A nuestras tutoras, las Ing. Agr. Adriana Bussoni e Ing. Agr. Mariana Boscana, cuya orientación y apoyo fueron sustanciales desde el inicio hasta la finalización de esta tesis. Su ayuda, conocimiento y disposición fueron un pilar fundamental para nuestro desarrollo como futuros profesionales, así como sus valiosas contribuciones e invitaciones a jornadas de capacitación relacionadas con nuestro tema en estudio.

También extendemos nuestro reconocimiento al Ing. Agr. Franco Schinato y al Ing. Agr. Oscar Bentancur por su colaboración invaluable en el trabajo de laboratorio y en el análisis estadístico respectivamente. Sus aportes y orientación fueron fundamentales para el desarrollo y la calidad de esta investigación.

Por otro lado, agradecer a la facultad de Agronomía por colaborar con nuestro desempeño como profesionales, a todos los profesores, en especial al departamento Forestal por permitirnos realizar este trabajo.

A los encargados del establecimiento “Patria Vieja” quienes siempre estuvieron a disposición brindándonos datos del predio y colaborando en el trabajo de campo.

Al departamento de biblioteca por la corrección del documento.

Y a nuestras respectivas familias que nos han apoyado desde el comienzo.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>PÁGINA DE APROBACIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>3</b>
<b>LISTA DE TABLAS Y FIGURAS</b> .....	<b>6</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>8</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>9</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>12</b>
1.1.1 General .....	12
1.1.2 Específicos.....	12
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 Distribución natural, características e influencia en Uruguay del género <i>Eucalyptus</i></b> .....	<b>13</b>
2.1.1 Características de la especie <i>E. dunnii</i> .....	14
2.1.2 Sitios de producción forestal en Uruguay .....	15
2.1.3 Importancia económica del sector forestal en Uruguay.....	16
2.1.4 <i>Eucalyptus dunnii</i> para pulpa y madera sólida .....	16
2.1.5 Ganadería en Uruguay .....	18
2.1.6 Ganadería en Florida.....	19
2.1.7 Raza Wagyu .....	20
2.1.8 Emisiones de GEI .....	21
2.1.9 Protocolo de Kioto y Tratado de París .....	22
2.1.10 Balance de los GEI.....	24
2.1.11 Mercados de carbono .....	24
<b>3. SISTEMAS SILVOPASTORILES</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1 Producción en Uruguay</b> .....	<b>27</b>
<b>4. ANTECEDENTES ECONÓMICOS Y FINANCIEROS</b> .....	<b>28</b>
<b>5. HIPÓTESIS</b> .....	<b>30</b>
<b>6. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
<b>6.1 Caracterización del sitio</b> .....	<b>31</b>
<b>6.2 Descripción de suelos</b> .....	<b>33</b>
6.2.1 Suelo 10.3.....	33
6.2.2 Suelo 2.21 .....	34
6.2.3 Suelo 10.12.....	34
6.2.4 Suelo 5.02b.....	34

6.2.5 Suelo 5.4.....	35
<b>6.3 Trabajo de campo .....</b>	<b>38</b>
6.3.1 Inventario forestal.....	38
6.3.2 Crecimiento del rodal.....	42
<b>6.4 Clases diamétricas .....</b>	<b>43</b>
6.4.1 Obtención de tarugos .....	43
<b>6.5 Análisis de laboratorio.....</b>	<b>45</b>
6.5.1 Medición de volumen.....	45
6.5.2 Peso seco y molienda .....	46
6.5.3 Cálculo de densidad .....	47
<b>6.6 Técnica de determinación del carbono .....</b>	<b>47</b>
6.6.1 Materiales y reactivos .....	47
6.6.2 Soluciones .....	49
6.6.3 Digestión y preparación de curva de calibración.....	49
6.6.4 Determinación del porcentaje de carbono .....	51
<b>6.7 Fijación, emisión y balance de carbono .....</b>	<b>52</b>
6.7.1 Biomasa forestal .....	52
6.7.2 Carbono fijado por la masa forestal.....	53
6.7.3 GEI emitidos por la actividad ganadera.....	53
6.7.4 Balance total de carbono fijado vs emitido .....	54
<b>6.8 Análisis estadístico .....</b>	<b>55</b>
<b>6.9 Análisis económico financiero .....</b>	<b>55</b>
<b>7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>61</b>
7.1 Resultados dasométricos .....	61
7.2 Resultados de laboratorio.....	70
7.3 Resultados financieros .....	76
<b>8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>82</b>
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>86</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>87</b>
<b>11. ANEXO .....</b>	<b>93</b>

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla	Página
Tabla 1 Características de la pulpa en diferentes sitios de plantación para <i>E. dunnii</i> .....	17
Tabla 2 Grupos de suelo CONEAT del Padrón 11946.....	35
Tabla 3 Grupos de Suelo CONEAT del Padrón 11962 .....	36
Tabla 4 Clases diamétricas utilizadas (cm CAP).....	43
Tabla 5 Clases diamétricas utilizadas (cm DAP).....	43
Tabla 6 Curva de calibración.....	49
Tabla 7 Costos para la preparación del sitio y laboreo .....	56
Tabla 8 Costos para la plantación y replantación .....	57
Tabla 9 Costos para tratamientos periódicos, administración y el total de costos de plantación .....	57
Tabla 10 Producción de madera en metros cúbicos/hectárea .....	57
Tabla 11 Estimación promedio del carbono fijado (Tn CO <sub>2e</sub> ) en plantación <i>E. dunnii</i> , 12 años de rotación .....	59
Tabla 12 Número de individuos por parcela, individuos suprimidos y faltantes en cada una de las mediciones .....	61
Tabla 13 Valores dasométricos promedio correspondientes a la primera y segunda medición en campo .....	62
Tabla 14 Análisis de varianza (ANOVA) para el factor volumen (V) .....	63
Tabla 15 Análisis de varianza (ANOVA) para el factor altura (Ht).....	64
Tabla 16 Análisis de varianza (ANOVA) para el factor DAP .....	65
Tabla 17 Medias ajustadas para el factor volumen de los estratos en la primera medición.	65
Tabla 18 Medias ajustadas para el factor volumen (V) de los estratos en la segunda medición .....	65
Tabla 19 Medias ajustadas de la altura (Ht) de los árboles por estrato en la primera medición .....	66
Tabla 20 Medias ajustadas de la altura (Ht) de los árboles por estrato en la segunda medición .....	67
Tabla 21 Medias ajustadas para el factor DAP en los diferentes estratos para la primera medición .....	68
Tabla 22 Medias ajustadas para el factor DAP en los diferentes estratos para la segunda medición .....	68
Tabla 23 Valores promedio de IMA (m <sup>3</sup> /ha/año) e ICA (m <sup>3</sup> /ha/año).....	69
Tabla 24 Carbono total en Tn/ha y CO <sub>2e</sub> retenido por la masa forestal .....	71
Tabla 25 Análisis de varianza para CO <sub>2e</sub> fijado en la masa forestal .....	71
Tabla 26 Medias ajustadas para el CO <sub>2e</sub> en cada clase diamétrica .....	72
Tabla 27 Medias ajustadas para el CO <sub>2e</sub> en los diferentes estratos de la plantación.....	72
Tabla 28 Estimación de las emisiones CO <sub>2e</sub> 2018-2022 .....	74

Tabla 29 CO <sub>2e</sub> fijado por biomasa forestal, emitido por el ganado y balance anual.....	75
Tabla 30 CO <sub>2e</sub> fijado, emitido y balance en el predio del año 2022 .....	75
Tabla 31 Inversión en tierra e instalación del monte expresado en U\$\$/ha.....	76
Tabla 32 Egresos en la vida útil del proyecto expresados en U\$\$/ha.....	77
Tabla 33 Ingresos en la vida útil del proyecto expresados en U\$\$/ha.....	78
Tabla 34 Flujo Neto de Caja 1 expresado en U\$\$ totales .....	79
Tabla 35 Indicadores financieros para diferentes precios de venta en Flujo Neto de Caja 179	
Tabla 36 Flujo Neto de Caja 2 expresado en U\$\$ totales .....	80
Tabla 37 Indicadores financieros para el Flujo Neto de Caja 2.....	80
Tabla 38 Flujo Neto de Caja 3 expresado en U\$\$ totales .....	81
Tabla 39 Indicadores financieros para el Flujo Neto de Caja 3, con diferentes tasas de descuento .....	81

Figura	Página
Figura 1 Comparación Cartografía 2018 y Cartografía 2021.....	14
Figura 2 Ubicación del predio Patria Vieja .....	31
Figura 3 Padrones 11962 y 11946 del establecimiento.....	32
.....	32
Figura 4 Grupos de Suelos CONEAT .....	33
Figura 5 Tipos de suelo que presenta el sistema silvopastoril bajo estudio con sus respectivos estratos .....	37
Figura 6 Marco de plantación bajo estudio .....	38
Figura 7 Ubicación de los estratos 1 y 2 y su respectiva separación de parcelas.....	39
Figura 8 Blume Leiss .....	42
Figura 9 Barreno de Pressler .....	44
Figura 10 Balanza utilizada para el proceso.....	45
Figura 11 Molienda de tarugos.....	46
Figura 12 Ftalato de K.....	48
Figura 13 Ácido sulfúrico .....	48
Figura 14 Tubos de ensayo para curvas de calibración.....	50
Figura 15 Tubo de ensayo pre-reacción .....	50
Figura 16 Tubos de ensayo en horno y reacción.....	51
Figura 17 Espectrofotómetro.....	51
Figura 18 Medias ajustadas para la variable volumen (V) por sitio y por año.....	66
Figura 19 Medias ajustadas para la variable altura por sitio y por año.....	67
Figura 20 Medias ajustadas para la variable DAP por sitio y por año.....	68
Figura 21 Valores proyectados para el crecimiento del IMA e ICA.....	70
Figura 22 Medias ajustadas para el factor CO <sub>2e</sub> en cada sitio.....	73
Figura 23 Distribución diamétrica interanual de la plantación (año 4-12) .....	74

## RESUMEN

Los compromisos internacionales asumidos por el Uruguay para la reducción de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), implica tener parámetros nacionales confiables en sistemas silvopastoriles que tengan como objetivo la reducción de emisiones. Estos sistemas deben ser a su vez, viables financieramente para que se puedan incorporar como una opción productiva. El trabajo tuvo como objetivo evaluar, desde una perspectiva económica y ambiental, una plantación de *Eucalyptus dunnii* en un sistema silvopastoril. Para ello, se instalaron 8 parcelas permanentes, en 2 estratos forestales. Se realizaron 2 mediciones de variables dasométricas altura total (Ht) y circunferencia a la altura de pecho (CAP) a los 4 y 5 años de la plantación. Se extrajeron muestras de madera en tres clases diamétricas (CD), sobre las que se obtuvo la densidad y el contenido de carbono. Se realiza un balance anual de GEI en base a registros ganaderos de 5 años. Se aplica análisis de varianza sobre los resultados dasométricos y el contenido de carbono. Finalmente, a partir de Capital Budgeting se calcula el retorno financiero. Se encontraron diferencias significativas de volumen y carbono, siendo la CD central (10,4 – 18,0 cm) la que resulta en mayor carbono, al ser la CD más frecuente y la que acumula mayor volumen en el sistema. En base a los resultados de laboratorio el 45% de la biomasa forestal está compuesta por carbono, mayormente concentrado en el fuste. La fijación de carbono promedio en los 5 años que lleva la plantación fue de 10,4 Tn CO<sub>2e</sub>/ha/año; mientras que las emisiones por parte de la ganadería fueron de 3,5 Tn CO<sub>2e</sub>/ha/año; esto resulta en un balance de carbono positivo de 6,9 Tn CO<sub>2e</sub>/ha/año en el sistema silvopastoril para los años 2017-2022. Sin embargo, al considerar la totalidad del predio (3.281 ha), el balance de carbono fue negativo (-11.108 Tn CO<sub>2e</sub>/año), destacando la importancia de ampliar los sistemas integrados con árboles para compensar estas emisiones. El análisis financiero demostró que el proyecto es económicamente viable, con un Valor Actualizado Neto esperable de 2.760 U\$S en 28 ha y una Tasa Interna de Retorno del 6,2%. A su vez, se evaluó el impacto positivo en la generación de créditos de carbono con su posterior venta en la viabilidad del proyecto, lo que mejora la rentabilidad del sistema. Esto podría beneficiar al productor a partir de la posibilidad de comercializar su producción ganadera en un sistema de bajas emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

*Palabras clave:* dióxido de carbono equivalente, porcentaje de carbono, GEI, indicadores financieros, viabilidad económica

## SUMMARY

This research aims to evaluate, from both an economic and environmental perspective, a *Eucalyptus dunnii* plantation within a low-density silvopastoral system intended for pulpwood production. Eight permanent plots were established, each containing 30 trees, and two forest strata were identified based on topographical differences and soil types. Measurements of height (Ht) and circumference at breast height (CBH) were taken at 4,1 and 5,0 years after planting to calculate other relevant variables such as basal area (BA), diameter at breast height (DBH), and volume (V). Three trees were sampled in each plot, representing three different diameter ranges; wood density and carbon content were measured for each diameter class (DC) using spectrophotometry in the laboratory. Statistical analysis showed no significant differences in the dasometric variables (DBH, Ht, V) between the studied strata. It was found that 45,33% of the forest biomass in the silvopastoral system consisted of carbon, mainly concentrated in the tree stem. While no differences were found in the carbon percentage per individual DC, the central DC with a range of 10,4 – 18,0 cm of DBH accumulated the most carbon due to its higher frequency and final volume in the system. Carbon sequestration averaged 10,4 Tn CO<sub>2e</sub>/ha/year over the 5 years of the plantation, while emissions from livestock were 3,5 Tn CO<sub>2e</sub>/ha/year, resulting in a positive carbon balance of 6,9 Tn CO<sub>2e</sub>/ha/year for the years 2017-2022. However, when considering the entire property (3.281 ha), the carbon balance was negative (-11.108 Tn CO<sub>2e</sub>/year), underscoring the importance of expanding integrated tree systems to offset these emissions. Financial analysis demonstrated the project's economic viability, with an expected Net Present Value of \$2.760 USD assuming a 6% opportunity cost and an Internal Rate of Return of 6,2%. Additionally, the positive impact of potential carbon credit generation and subsequent sale on project viability was evaluated. Considering carbon sequestration by these systems could benefit producers through the production of low-greenhouse gas emissions meat.

*Keywords:* carbon dioxide equivalent, carbon percentage, greenhouse effect, financial indicators, economic viability

## 1. INTRODUCCIÓN

Uruguay se sitúa en el sur de América Latina y pertenece a la clasificación de biomas de pastizales. Su clima presenta características diversas: en el norte, las temperaturas se asemejan a las zonas tropicales, aunque durante el invierno, esta región se vuelve notablemente más fría que las áreas tropicales. En el sur, las temperaturas son más moderadas, con veranos cálidos, pero no extremos, e inviernos fríos, aunque igualmente sin extremos marcados. Las estaciones intermedias son bastante similares en todo el país, siendo la primavera el periodo donde se observa el mayor contraste entre el norte y el sur. La región costera, especialmente en el sureste, muestra una moderación en el calentamiento debido a su proximidad al mar. En cuanto a las precipitaciones, estas son abundantes durante el invierno y escasas en verano, ya que la evaporación local no logra compensar la falta de lluvias (Barreiro et. al. 2019).

Por lo general, los suelos son ricos en minerales como el carbono y se caracterizan por ser profundos; compuestos bióticamente por sistemas de herbazales dominados por gramíneas y algunas zonas de arbustales y bosques ocasionales (Marques Severo & Matte, 2020).

La superficie efectiva de plantaciones forestales al año 2021 fue de 1.108.371 hectáreas (Dirección General Forestal [DGF], 2022). Se entiende por superficie efectiva la ocupada únicamente por las plantaciones arbóreas, sin incluir cortafuegos, caminos u otras áreas anexas a la explotación. Los datos registrados al año 1982 eran de una superficie de 150.571 hectáreas efectivas por lo que se ha registrado un crecimiento de aproximadamente 957.800 hectáreas hasta la fecha aproximadamente.

Según la DGF (2022), las especies históricamente más importantes en términos de superficie son aquellas pertenecientes al género *Pinus* y *Eucalyptus*. La especie predominante para el primer género es el *Pinus taeda*, abarcando el 86,6% de las plantaciones, seguida por el *Pinus elliottii* con un 11,2%. En el caso de las especies correspondientes al género *Eucalyptus*, han experimentado diferentes procesos de utilización. Los avances de investigación y desarrollo han permitido mejorar la selección de estas especies, considerando factores como la adaptación a sitios específicos y la calidad de la madera en función del

propósito productivo deseado. Entre las especies destacadas de *Eucalyptus* se encuentran el *E. grandis*, *E. dunnii* y *E. globulus* (DGF, 2022).

Para la FAO, como se cita en Sancho et al. (2021), los Sistemas Silvopastoriles (SSP) son una combinación natural o una asociación intencionada de uno o varios tipos de vegetación leñosa (arbustiva y/o arbórea) en un área de pasto con gramíneas y leguminosas herbáceas, ya sean nativas o cultivadas, que se utilizan junto a rumiantes y otros herbívoros. Estos sistemas buscan establecer diferentes estratos en un modelo que integra árbol, pastura y animales, con los siguientes objetivos (Sancho et al., 2021):

- Promover la reposición forestal de manera parcial y ordenada en áreas de pastoreo
- Ofrecer sombra y mitigar las temperaturas extremas, creando un entorno más favorable para la producción y reproducción del ganado
- Mejorar el ciclo orgánico y la disponibilidad de nutrientes, especialmente mediante la inclusión de árboles fijadores de nitrógeno
- Proveer suplementación alimenticia a los animales a través de especies de árboles forrajeros
- Generar productos maderables, leña y postes que puedan ser utilizados en la finca, así como otros productos forestales con valor económico
- Diversificar la producción de recursos forestales y ganaderos en la unidad de producción

El pastoreo de ganado en montes de especies exóticas es común en Uruguay. Desde la década de 1960, se ha registrado el uso de árboles en la ganadería permitiendo diversificar ingresos. En Uruguay, la información sobre sistemas silvopastoriles diseñados específicamente para introducir forraje en las filas es escasa y difícil de obtener a nivel nacional. A pesar de los incentivos gubernamentales para promover la adopción de sistemas silvopastoriles (Tamosiunas, 2015), su implementación aun es baja debido a limitaciones culturales, tecnológicas (Pastorini & Acosta, 2011) y de percepción de los beneficios (Tamosiunas, 2015). Para aumentar la adopción de estos sistemas es necesario desarrollar planes de gestión integral junto con los productores y fomentar la formación de grupos de productores en zonas específicas para facilitar los procesos de cosecha y comercialización (Viñoles Gil et al., 2022).

Se cuantificó una superficie total de 6.392 hectáreas de sistemas silvopastoriles en Uruguay. En la mayoría de los establecimientos estudiados, se observó un buen estado general de las plantaciones en sistemas silvopastoriles. En este contexto, el país cuenta con

terrenos aptos para este enfoque, donde la integración de especies forestales con la ganadera se ha convertido en una estrategia clave para mejorar la productividad agropecuaria, aumentando la rentabilidad a largo plazo, ofreciendo una alternativa para mitigar el efecto del cambio climático y contribuyendo a la reducción de emisiones de carbono, logrando posicionar a Uruguay como un referente en el desarrollo sostenible de la agricultura y ganadería (Sancho et al., 2021).

A lo largo de este trabajo se obtendrán datos experimentales de gran importancia para el desarrollo científico de los sistemas silvopastoriles, específicamente en la especie *Eucalyptus dunnii*; el impacto de estos sistemas sobre variables ambientales y su viabilidad económica en la aplicación.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 General

Evaluar desde el punto de vista económico y ambiental, una plantación de *Eucalyptus dunnii* en un sistema silvopastoril de baja densidad para obtención de trozas de diámetros finos, en la zona Centro-Sur del país.

### 1.1.2 Específicos

- Evaluar la viabilidad económica financiera de sistemas productivos forestales en baja densidad.
- Evaluar el servicio ambiental de fijación de carbono en la biomasa forestal, en un sistema silvopastoril.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DISTRIBUCIÓN NATURAL, CARACTERÍSTICAS E INFLUENCIA EN URUGUAY DEL GÉNERO *EUCALYPTUS*

El género *Eucalyptus* comprende alrededor de 950 especies, es parte de la familia Myrtaceae y se desarrolla en la zona Oeste de Australia e islas vecinas, la especie *E. dunnii* específicamente en el ángulo nordeste de Nueva Gales del Sur y el Sureste de Queensland (ANEXO Figura A1). Según Boland et al. (2006), el correcto desarrollo de la especie (*E. dunnii*) se da en condiciones de suelos húmedos y altamente fértiles, particularmente de origen basáltico, pero también en aquellos que derivan de rocas sedimentarias.

Los *Eucalyptus* muestran una distribución edafoclimática particular que les otorga la capacidad de adaptarse a condiciones distintas a las de su hábitat original, una habilidad derivada de su alta sensibilidad al entorno forestal (Brussa, 1994). El concepto de “sitio forestal”, definido por Barnes et al. (1998) como una ubicación geográfica determinada por la interacción entre el clima y el suelo; es considerado un factor crítico según Schlatter y Gerding (2014), quienes lo integran entre los factores macro climáticos, clima local, suelo y estado nutricional del suelo, manteniendo un orden jerárquico de importancia. Barros (2012) destaca la amplia dispersión natural de este género y su inherente capacidad para adaptarse a una variedad de condiciones edafoclimáticas, lo que lo convierte en una opción prominente en el contexto de las plantaciones forestales.

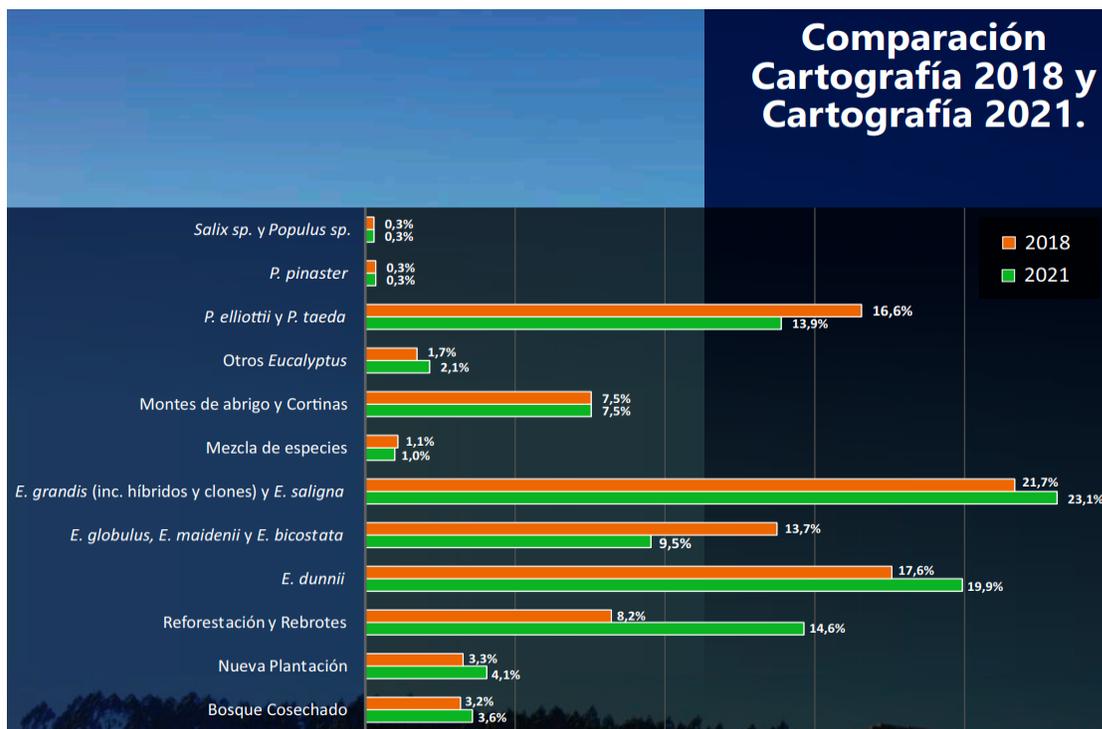
La segunda Ley n° 15.939 (1988), surgió como un mecanismo clave para estimular el crecimiento a largo plazo del sector forestal en Uruguay. Esta legislación tuvo como objetivo primordial incentivar la actividad forestal y promover su desarrollo mediante varias estrategias, que incluían exoneraciones fiscales para áreas cubiertas por bosques de producción artificial en suelos prioritarios para la forestación, subsidios directos del estado, financiamiento a tasas preferenciales para plantaciones y exoneraciones tributarias en la importación de equipamiento e insumos (Panario & Gutiérrez, 2007). Este marco regulatorio contribuyó significativamente al aumento de la superficie forestada en el país, siendo de 6,21% en 2021.

En la Figura 1 se observa una comparación entre los años 2018 y 2021 sobre la evolución de las diferentes especies de árboles cultivados en el país. Según la información

obtenida del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP, (2021) se ha visto un aumento de la plantación de ciertas especies, como una disminución en otras, específicamente sobre la especie de nuestro estudio, el *E. dunnii* con un aumento de 2,3%.

### Figura 1

Comparación Cartografía 2018 y Cartografía 2021



Nota. Tomada de DGF (2021).

#### 2.1.1 Características de la especie *E. dunnii*

El hábitat natural de esta especie se encuentra principalmente en la región centro este de Australia. Esta área de distribución natural está caracterizada por un clima templado que registra temperaturas máximas promedio de 27-30°C en sus y entre 0-3°C en sus mínimas, con alrededor de 60 días de heladas al año. Además, se destaca por su humedad, con precipitaciones estivales que oscilan entre 1000-1750 mm anuales (Brussa, 1994).

Crece en suelos de alta fertilidad, buena capacidad de retención de agua y buena aireación, siendo sensible al mal drenaje. Es más resistente al frío que *E. grandis* y *E. saligna*, por lo que es una especie que se ha distribuido en Uruguay como materia prima para la producción de celulosa. Por último, sus características distintivas corresponden a tener

corteza lisa en casi todo el tronco, caduca en fajas largas con pequeña porción basal persistente; hojas juveniles ovales o elípticas de base muchas veces cordada; intermedias de hasta 30 cm de largo; flores en inflorescencias simples, axilares, frutos hemisféricos con fuertes valvas existentes (Brussa, 1994).

### 2.1.2 Sitios de producción forestal en Uruguay

Según los criterios establecidos por la DGF, como se cita en Uruguay XXI (2021), Uruguay se divide en tres regiones distintas en función de las características de suelo, clima y proximidad a los puntos de exportación de la producción forestal:

- 1) La región sureste, cercana al puerto de Montevideo, se ve influenciada notablemente por el clima marítimo, lo que evita la presencia de temperaturas extremas. Esta área es propicia para plantaciones de especies como *E. globulus* y *E. dunnii*, destinadas principalmente a la producción de madera para la industria de pulpa de celulosa.
- 2) La región centro-norte alberga la mayor área forestada del país, concentrando aproximadamente el 42% de los bosques cultivados de Uruguay. Caracterizada por inviernos con heladas y veranos más cálidos; predominan suelos arenosos, siendo un área adecuada para el desarrollo del género *Eucalyptus* y *Pinus*. La madera producida aquí se destina principalmente a procesos de transformación mecánica.
- 3) La región litoral-oeste se caracteriza por la presencia de heladas y suelos predominantemente franco arenosos a arenosos. Aquí, el género *Eucalyptus* prevalece, aunque en menor medida el *Pinus* también está presente. La principal aplicación de la madera en esta zona es la producción de celulosa.

Como resultado de la segunda Ley n° 15.939 (1988) en Uruguay, se identificaron los suelos de prioridad y aptitud forestal. Los suelos catalogados como prioritarios por el MGAP se encuentran en los grupos CONEAT de las zonas 7, 8, 9 y 2.

En Uruguay según la última cartografía forestal realizada por DGF (2021) hay una superficie efectiva total de 216.581 hectáreas correspondientes a plantaciones de *E. dunnii* mayores a 3 años de edad. Adicionalmente, existen 203.197 hectáreas efectivas de bosques menores a 3 años, de las cuales se divide en: 49% *E. dunnii*; 36% *E. grandis*; 14% de otros *Eucalyptus* y 1% *Pinus sp.*

### 2.1.3 Importancia económica del sector forestal en Uruguay

Según un informe especial del Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social (*La producción forestal*, 2023), el sector forestal en Uruguay se prevé como el principal exportador del país en 2024, especialmente con la esperada operación a pleno rendimiento de la segunda planta de celulosa de UPM. Este crecimiento responde no solo a la estabilidad institucional y legal, proporcionando seguridad para las inversiones a largo plazo, sino también a políticas que han fomentado la producción forestal de manera consistente a lo largo de diferentes gobiernos.

El informe del Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social (*La producción forestal*, 2023) también señala que Uruguay cuenta con tierras aptas para la forestación que no serían utilizadas para la agricultura debido a sus características particulares, como la estructura del suelo, la baja fertilidad y la presencia de pedregosidad. Además, la integración de la forestación con la ganadería está en aumento, brindando numerosos beneficios. Las regulaciones vigentes del MGAP y del Ministerio de Ambiente (MA), junto con el amplio cumplimiento del Código Nacional de Buenas Prácticas Forestales y las certificaciones internacionales, garantizan una supervisión rigurosa de cualquier tipo de plantación, independientemente de su escala, lo que mitiga significativamente el impacto ambiental.

El sector forestal ejemplifica el concepto de economía circular y desempeña un papel crucial en la reducción de las emisiones netas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el Uruguay. Liderado por empresas que deben cumplir con estándares internacionales elevados y con una demanda internacional en aumento, se espera que las inversiones en este sector sigan creciendo, consolidando así su papel fundamental como motor del desarrollo de la economía uruguaya (*La producción forestal*, 2023).

### 2.1.4 *Eucalyptus dunnii* para pulpa y madera sólida

Hay diferentes factores relevantes para estudiar antes de realizar una plantación y estos varían dependiendo del destino final que se tenga con la madera. Factores importantes como el sitio, la densidad de plantación y la edad de corte varían según el destino final de la madera para producir pulpa de celulosa o madera sólida (madera estructural).

El sitio y la edad pueden afectar el rendimiento y la calidad de la pulpa. Se han hecho varias evaluaciones en cuanto a las características de la pulpa en *E. dunnii* proveniente de distintos sitios forestales (Tabla 1). Árboles de *E. dunnii* de 8 años cultivados en Boambee (Nueva Gales del Sur) fueron más fáciles de pulpar, produjeron un 53% de pulpa tamizada y obtuvieron un rendimiento de pulpa más alto en comparación con árboles de la misma edad cultivados en Megan (Nueva Gales del Sur) (Muneri et al., 2007). Se observa también en la Tabla 1 que los resultados de pulpeo en Boambee son similares tanto a los de *E. dunnii* de 9 años cultivados en Newry en el norte de Nueva Gales del Sur como a los *E. dunnii* de 4 años en Uruguay

**Tabla 1**

*Características de la pulpa en diferentes sitios de plantación para E. dunnii*

<b>Sitio plantación</b>	<b>Edad</b>	<b>Rendimiento pulpa</b>	<b>Ref.</b>
<b>Boambee NWS</b>	8	53,3	1
<b>Megan NSW</b>	8	50,1	2
<b>Newry NSW</b>	9	54,8	3
<b>Uruguay</b>	4	50,1	4
<b>Tasmania</b>	10	53,8	5

*Nota.* Elaborado a partir de <sup>1,2</sup>Muneri et al. (2007), <sup>3,5</sup>Hicks y Clark (2001), <sup>4</sup>Backman y De Leon (1998), como se cita en Thomas et al. (2009).

Cabe destacar que la madera con destino pulpa de celulosa no requiere tratamientos silviculturales como la poda y el raleo; estos tratamientos son necesarios realizar cuando la madera tiene destino de calidad/estructural. El no tener que realizar estas prácticas de manejo influye en los resultados económicos, ya que no hay egresos ni ingresos relacionados a estas tareas en el correr del crecimiento de los árboles y desarrollo del proyecto.

Las propiedades de la madera sólida de *E. dunnii* son, en muchos aspectos, más difíciles de determinar que las características de pulpeo. Un problema común de la madera cultivada para plantaciones de *E. dunnii* en Australia en comparación con la madera de bosques nativos de *E. dunnii* en dicho país está relacionado con las tensiones de crecimiento (Thomas et al., 2009). Independientemente del mecanismo de generación, la presencia de tensiones de crecimiento no está en duda y se cree que está relacionada con la tasa de crecimiento de los árboles; las tensiones o gradientes de tensión a menudo disminuyen con

la edad del árbol (Thomas et al., 2009). Las tensiones de crecimiento manifestadas en forma de agrietamiento en los extremos están bajo control genético en *E. dunnii* como indica Swain et al. (2000) como se cita en Thomas et al. (2009), lo que sugiere la posibilidad de utilizar la selección genética para reducir las pérdidas por agrietamiento. La gestión silvícola también puede afectar las tensiones de crecimiento y, por lo tanto, el agrietamiento en los extremos de la madera.

Se ha estimado que un tercio del material aserrado de *E. dunnii* cultivado en plantaciones puede sufrir degradación atribuible a tensiones de crecimiento (Thomas et al., 2009). De todas formas, existen técnicas de aserrado alternativas que se basan en eliminar las tensiones en todo el tronco, lo que aumenta la recuperación de madera. Estas técnicas han permitido la producción exitosa de madera estructural a partir de material joven cultivado en plantaciones de varios eucaliptos (Thomas et al., 2009). Además, se han utilizado diversos métodos para reducir y liberar tensiones de crecimiento antes de la cosecha como indica Malan (1995) como se cita en Thomas et al., (2009). Técnicas como el anillado de árboles en pie o la defoliación parcial antes de la cosecha y los cortes de herbicida fueron los más efectivos para reducir las tensiones de crecimiento en *E. dunnii*. Asimismo, los tratamientos de vaporización posteriores a la cosecha antes del aserrado también fueron efectivos para reducir el agrietamiento y otros defectos relacionados (Severo & Tomaselli, 2000).

#### 2.1.5 Ganadería en Uruguay

Uruguay se destaca con sus 16,4 millones de hectáreas destinadas a uso agropecuario, lo cual representa más del 90% de su superficie terrestre. La ganadería es la actividad preeminente en el país y emplea alrededor de 106.000 personas, distribuidas en actividades primarias y en la industria. En la última década, el país experimentó un cambio en el uso de la tierra, aumentando la superficie destinada a la agricultura y reduciendo la dedicada a la ganadería, que actualmente se realiza de manera más intensiva. Para el año 2020, de acuerdo con los datos del Anuario Estadístico de DIEA, de los 16,4 millones de hectáreas destinadas a uso agropecuario, los establecimientos ganaderos ocupan una superficie de 12,8 millones de hectáreas Oficina de Estadística Agropecuaria (DIEA, 2021b). Esto no significa que no se realicen otras actividades agropecuarias dentro de los

establecimientos, pero es de interés para tener un acercamiento a las estimaciones de cada actividad.

En el informe del Instituto Nacional de Carnes (INAC, 2022), se observa que, en 2021, Uruguay contaba con 11,83 millones de cabezas de ganado, con una estructura de stock que incluye una proporción significativa de vacas de cría, terneros, vaquillonas y novillos; toros en menor proporción. La faena de bovinos alcanzó un récord histórico de 2,64 millones, con un crecimiento del 31% en comparación con 2020. Además, las exportaciones de carne bovina siguieron en aumento, representando el 82% de la producción total (INAC, 2022).

El sector agropecuario, en el que la ganadería desempeña un papel fundamental, contribuye significativamente al PBI uruguayo, representando entre el 6% y el 7% (2015-2019). En 2021, el sector ganadero alcanzó un récord histórico de ingresos, generando 3,614 millones de dólares, con un crecimiento interanual del 60%. Uruguay exporta productos ganaderos a casi 100 destinos, con una presencia destacada en Asia, Medio Oriente, Europa y América del Norte (INAC, 2022).

El país se destaca en la trazabilidad de la producción y es líder mundial en la certificación de carne carbono neutral, con cinco empresas certificadas bajo estrictos estándares internacionales (INAC, 2022). Además, Uruguay se ha comprometido a lograr emisiones netas de GEI iguales a cero antes del 2050, y el sector ganadero está desarrollando una estrategia nacional de ganadería climáticamente inteligente para reducir las emisiones y mejorar la sostenibilidad. Este esfuerzo es parte del proyecto Ganadería y Clima, que cuenta con el apoyo de FAO y el financiamiento del GEF.

#### 2.1.6 Ganadería en Florida

El departamento de Florida contribuye con un 2% al producto bruto interno de Uruguay (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2021). Sin embargo, a pesar de su importancia económica, la región ha presentado distintos desafíos en estos últimos años, como la sequía y la competencia con Argentina, lo que ha afectado la prosperidad del sector de comercio y servicios. La sequía ha llevado a un aumento en el endeudamiento de los empresarios del sector agropecuario en el departamento de Florida y en todo el país en general. En una serie de encuestas realizadas por la cámara empresarial de Florida, se observó un incremento en la deuda en comparación con años anteriores. Según la economista Eloisa

Léaniz, responsable de los informes semestrales del Observatorio Económico de Florida (OEF), esta deuda refleja la difícil situación que enfrentaron los productores, quienes se vieron obligados a recurrir a préstamos para afrontar la necesidad de agua para sus tierras, animales y actividades agrícolas (Léaniz, 2021).

En este contexto, el departamento de Florida registro un pico de 11% de desempleo en marzo de 2022. No obstante, esta cifra se redujo al 9% en mayo, según datos del INE (2021). En cuanto a la tasa de informalidad laboral, Florida supera con un 22,4% a los promedios nacionales, que se ubican en el 20,7% (Léaniz, 2021).

Florida sigue siendo un motor importante en la generación de divisas para el país, con la lechería y la ganadería como los principales sectores productivos. El INAC (2022) reportó que el 8% de la faena total de bovinos en Uruguay en el año 2022 provino de Florida, y la región continúa siendo el mayor remitente de leche.

#### 2.1.7 Raza Wagyu

El ganado Wagyu es originario de Japón y se comprende por cuatro principales razas, siendo las más importantes Wagyu Negro (Tajima) y Wagyu Colorado (Akaushi). Históricamente este ganado era utilizado como animales de trabajo, principalmente como animales de tiro o carga habiendo muy pocos de ellos distribuidos principalmente en la superficie de Japón. Además de ser una isla, Japón contaba con clausura comercial, por lo que el ganado permaneció aislado hasta 1868, año en que la economía japonesa se expande. A partir de 1868 se inicia la importación de ganado forastero proceso que provoca el intercambio genético; este último proceso provocó que la calidad de la carne y fuerza de los animales se viera disminuida razón por la cual a partir del año 1919 comienza el registro oficial de animales Wagyu y cierre de los linajes.

Los primeros puntos de exportación en el mundo fueron de Japón, Estados Unidos y Canadá. Por otro lado, Uruguay comenzó con la cría de esta raza en 2003 y hoy según el número de animales puros registrados en Sudamérica se encuentra detrás de Brasil (Mazolla, 2022).

La cría de ganado Wagyu se ha adaptado a las condiciones productivas de Uruguay, se ha establecido en Artigas, Florida, Maldonado, Soriano y Treinta y Tres. Esta raza se destaca por dos características fundamentales: el bajo peso al nacer y la fertilidad y

precocidad sexual. El bajo peso al nacer es una característica destacable en esta especie que se mantiene a pesar de las cruza lo que es beneficioso ya que reduce problemas en parto; dado lo anterior, varios productores están utilizando la crusa con esta raza para el entore de vaquillonas (Mazolla, 2022).

Por otro lado, la actividad sexual precoz en las hembras observándose celos a partir de los 10 a 12 meses. Los toros por su lado poseen fertilidad y capacidad de servicio altos (Mazolla, 2022).

En la etapa de recría se genera la estructura ósea del animal y las células grasas que tendrá para la posterior terminación y llenado, estos dos factores determinan el tamaño de la carcasa. Estos animales tienen una tasa de engorde promedio de 600 gr/día garantizando un buen desarrollo del tejido graso; es importante destacar que se ha reportado que la ganancia diaria tiene muy pocas fluctuaciones en comparación con otras razas, asegurando un buen desarrollo. Estos animales no crecen demasiado en alto, pero si ensanchan incluso en la adultez (Mazolla, 2022).

En cuanto al engorde y reproducción la grasa intramuscular o marmoreo proviene de la genética del animal. Dependiendo de la cantidad de grasa intramuscular que el productor desee es la proporción de crusa que necesitará y la dieta a proporcionar (M. Mazolla, comunicación personal, 2022).

Por último, cabe destacar que en Uruguay existe la Sociedad de Criadores de Wagyu que funciona hace más de 15 años, esta sociedad trabaja en evaluación genética, certificación racial y clasificación de carcasa y tropas, difusión y promoción de la raza, entre otros aspectos (M. Mazolla, comunicación personal, 2022).

#### 2.1.8 Emisiones de GEI

Los Informes Nacionales de Emisiones de GEI suministrados por el Ministerio de Ambiente de Uruguay, recopilan información sobre la emisión de GEI en el país, incluyendo los tipos de gases, los sectores emisores y las cantidades emitidas. Estos informes representan uno de los compromisos fundamentales de los países que forman parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). En ellos se estiman las emisiones y absorciones de GEI en los sectores de Energía, Procesos Industriales y Uso

de Productos, Agricultura, Silvicultura y otros Usos de la Tierra y Desechos (Ministerio de Ambiente [MA], 2020).

La elaboración de estos informes sigue una metodología aprobada y utilizada a nivel internacional, lo que permite comparar las contribuciones de los países al efecto invernadero de manera coherente. Actualmente, se siguen las directrices del Intergovernmental Panel on Climate Change Climático (IPCC) de 2006, que dividen las estimaciones de emisiones y absorciones de GEI en sectores principales.

En el sector Agricultura, Silvicultura y otros Usos de la Tierra, se consideran las emisiones de GEI derivadas de actividades agrícolas y prácticas relacionadas, así como las emisiones y absorciones de Dióxido de Carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{e}$ ) debido al cambio de uso de la tierra. El  $\text{CO}_2\text{e}$  es la unidad en común de los GEI. En Uruguay, las principales emisiones de este sector provienen del metano ( $\text{CH}_4$ ) generado por la fermentación entérica del ganado, las emisiones de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) de suelos agrícolas gestionados y, en menor medida, las emisiones de metano del cultivo de arroz (MA, 2020).

#### 2.1.9 Protocolo de Kioto y Tratado de París

El protocolo de Kioto, adoptado el 11 de diciembre de 1997 y en vigor desde el 16 de febrero del 2005, es una extensión de la CMNUCC. Su propósito es comprometer a los países industrializados a limitar y reducir las emisiones de GEI según metas acordadas individualmente (*What is the Kyoto*, s.f.).

Comprende varios anexos, dentro de ellos, en el Anexo B, el protocolo establece objetivos vinculantes y reducción de emisiones para 36 países industrializados y la Unión Europea. La enmienda de Doha, aprobada en 2012, estableció un segundo periodo de compromiso (2013 – 2020) con responsabilidades adicionales (*What is the Kyoto*, s.f.).

El protocolo de Kioto introdujo mecanismos de mercado flexibles, como el comercio Internacional de Emisiones, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y la Aplicación Conjunta. Estos buscan estimular la reducción de GEI de manera eficiente en costos, incentivando inversiones verdes en países en desarrollo (*What is the Kyoto*, s.f.).

Este acuerdo base fue cambiando en las sucesivas reuniones de las partes, derivando en otros acuerdos como el Acuerdo de París firmado el 12 de diciembre de 2015, un acuerdo histórico en el ámbito del cambio climático. El acuerdo fue adoptado durante la 21<sup>a</sup>

Conferencia de las Partes (COP21) CMNUCC, celebrada en París, Francia. El 4 de noviembre de 2016, el acuerdo entró en vigor tras ser ratificado por más de 55 países que representan al menos el 55% de las emisiones globales de GEI (Naciones Unidas [ONU], s.f.). Este acuerdo sienta las bases para incorporar mecanismos de reducción de Gases Efecto Invernadero a partir de acuerdos de partes, implementa los mecanismos para las reducciones en los mercados voluntarios, dando un rol preponderante a la seguridad alimentaria (ONU, s.f.).

Propuestas y Puntos Principales (ONU, s.f.):

- 1) Limitación del Calentamiento Global: El objetivo principal del Acuerdo de París es mantener el aumento de la temperatura media global por debajo de 2 grados Celsius respecto a los niveles preindustriales, y realizar esfuerzos para limitar ese aumento a 1.5 grados Celsius. Esto busca reducir los impactos catastróficos del cambio climático.
- 2) Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional: Los países firmantes se comprometen a establecer objetivos de reducción de emisiones de GEI. Cada país establece sus propias metas en función de su situación y capacidades.
- 3) Transparencia y Rendición de Cuentas: El acuerdo establece un marco de transparencia y rendición de cuentas para garantizar que los países informen de manera regular y transparente sobre sus emisiones y los progresos realizados hacia el logro de sus objetivos.
- 4) Adaptación: Reconoce la necesidad de fortalecer la capacidad de adaptación de los países para hacer frente a los impactos inevitables del cambio climático, especialmente en las comunidades más vulnerables.
- 5) Financiamiento: Establece el compromiso de movilizar fondos significativos tanto de fuentes públicas como privadas para apoyar a los países en desarrollo en la mitigación y la adaptación al cambio climático, así como para facilitar la transición hacia un desarrollo bajo en emisiones de carbono y resiliente al clima.

Según la ONU (s.f.), el comercio internacional de emisiones se apoya en los bonos de carbono como una forma de compensar la liberación de GEI. Estos bonos representan la reducción de una tonelada de dióxido de carbono ( $Tn CO_2e$ ), proveniente de proyectos de

mitigación. Son emitidos por entidades comprometidas con la reducción de emisiones, estos bonos fomentan la inversión en acciones sostenibles, como energías renovables o reforestación, ofreciendo una medida económica para incentivar la lucha contra el cambio climático y cumplir con objetivos internacionales de reducción de emisiones como los del Acuerdo de París (ONU, s.f.).

La adquisición de bonos de carbono presenta diversos beneficios, como respaldar la financiación de proyectos que abordan las causas del cambio climático, como la energía renovable o la reducción de residuos. También financia iniciativas que capturan emisiones de CO<sub>2e</sub>, como proyectos de reforestación, contribuyendo así a reducir la concentración de GEI en la atmósfera. Además, brinda a las empresas la oportunidad de compensar sus emisiones y participar activamente en controlar el cambio climático (*¿Qué son los bonos*, 2022).

#### 2.1.10 Balance de los GEI

Según los Inventarios Nacionales de GEI realizados por el Ministerio de Ambiente en el Uruguay, el balance de los GEI es positivo. Es decir, en términos de absorción de CO<sub>2e</sub>, esta ha superado a las emisiones de CO<sub>2e</sub> a lo largo de los años, siendo el resultado de cambios en las existencias de carbono en tres reservorios distintos: biomasa viva, materia orgánica muerta y carbono orgánico en el suelo (MA, 2020).

#### 2.1.11 Mercados de carbono

Según lo expuesto por Joaquín Echeverrigaray y Jerónimo Quintela en su entrevista con el Ing. Agr. Agustín Inthamoussu (J. Echeverrigaray y J. Quintela, comunicación personal, 2023), especialista en cambio climático y sostenibilidad, los créditos de carbono operan en un mercado de bonos voluntarios, caracterizado por relaciones directas entre proveedores y compradores sin compromisos obligatorios, a diferencia de los mercados abiertos convencionales. Destaca el crecimiento constante del mercado a nivel mundial, evidenciando una creciente demanda. En el contexto uruguayo, el mercado inició su operativa en 2018, experimentando una expansión inicial seguida de una fase más estable. La obtención de créditos implica procedimientos y requisitos específicos, como la presentación de documentación que cumpla con estándares internacionales establecidos por entidades como Verra y Gold Standard. Además, los créditos se generan a partir de la captura

de carbono excedente, con requisitos adicionales como proyecciones a largo plazo y la garantía de permanencia. En términos de valor, la forma en que se genere el crédito determina su precio, siendo los proyectos silvopastoriles capaces de generar créditos de alto valor debido a sus diversos impactos en los ámbitos ambiental, social y económico. Actualmente, según el Ing. Agr. Agustín Inthamoussu, las plantaciones forestales convencionales comercializan bonos de carbono a 20 US\$/unidad, es decir, por Tn/CO<sub>2</sub>e. No obstante, en un sistema silvopastoril, se anticipa un rendimiento mínimo de 25 US\$ por bono (Tn/CO<sub>2</sub>e). Cabe destacar que estos créditos de carbono potenciales se pagarían una vez sola al finalizar el proyecto (J. Echeverrigaray y J. Quintela, comunicación personal, 2023).

### 3. SISTEMAS SILVOPASTORILES

Conforme a la investigación de Chizmar et al. (2020), se sostiene que la idea fundamental detrás de los sistemas silvopastoriles radica en la capacidad de los sistemas integrados para diversificar las fuentes de ingresos, disminuir los riesgos financieros y biológicos, y aumentar en general los beneficios de la explotación al permitir la obtención de productos tanto maderables como no maderables. Se enfatiza que la rentabilidad de estos sistemas está estrechamente vinculada a la competencia entre los árboles. En densidades moderadas, los árboles pueden complementar la producción de pasturas para el ganado, pero en densidades elevadas, la producción de pastura disminuirá significativamente debido a la competencia por recursos, particularmente por la luz disponible.

La interacción en los SSP (sistemas silvopastoriles), que involucra árboles, pasturas y animales, conlleva beneficios significativos. En relación con el componente animal, proporciona protección adicional contra los elementos, como el viento y radiación solar, lo que aumenta la ganancia diaria de peso por animal y reduce el estrés térmico (Calle et al., 2012). En términos de suelos, mejora la resistencia a condiciones climáticas extremas y diversifica la producción, generando ingresos adicionales (Cubbage et al., 2014). Además, estos sistemas crean un microclima óptimo al proporcionar sombra y protección contra el viento y la lluvia, lo que puede aumentar la ingesta de alimentos y mejorar indicadores reproductivos, como el porcentaje de preñez. Estos hallazgos subrayan como la interacción en sistemas silvopastoriles beneficia diversos aspectos de la producción ganadera y el bienestar animal.

Según Chizmar et al. (2020), los sistemas silvopastoriles presentan una diversificación de las ganancias a través de la producción tanto a corto plazo, mediante la obtención de leche y carne, como a largo plazo, a través de la producción de madera. Otra ventaja destacada es la capacidad de los árboles para secuestrar carbono, lo que modifica la producción de forraje y la calidad del suelo al aumentar la disponibilidad de nutrientes y reducir la erosión. En este contexto, las pasturas que crecen bajo la sombra de los árboles tienden a presentar adaptaciones, como una menor relación raíz-parte aérea, lo que se traduce en un mayor valor nutritivo, caracterizado por un menor porcentaje de fibra cruda y un mayor

contenido de proteína cruda. Además, se observa una menor presencia de malezas que competirían con los árboles jóvenes por recursos (Cubbage et al., 2014).

Según Cubbage et al. (2014), la modificación del microclima debido a la presencia de árboles conlleva una ampliación de la estación de crecimiento de pasto. Aunque los picos de producción se mantienen en primavera, los rendimientos durante el verano e invierno son superiores en sistemas silvopastoriles en comparación con pastizales abiertos. Además, un estudio realizado en Minnesota por Ford et al. (2019) respalda la superior calidad de las pasturas en sistemas silvopastoriles en comparación con sistemas de bosques no gestionados y pastizales abiertos. Esto se atribuye principalmente a las condiciones micro climáticas favorables creadas por la sombra de los árboles en los sistemas silvopastoriles.

### 3.1 PRODUCCIÓN EN URUGUAY

Según datos del MGAP (2021), en Uruguay se incrementan cada año las plantaciones de especies exóticas comerciales como *Eucaliptus spp* y en menor medida *Pinus spp*; el 90% de las hectáreas plantadas se combinan con bovinos sobre suelo forestal.

Como se ha comentado anteriormente, los sistemas silvopastoriles mejoran la calidad del suelo y reducen la erosión lo que resulta en una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes. Esto ha permitido una mayor captación de carbono a través de la fijación de carbono por los árboles y la incorporación de carbono orgánico al suelo a través de las raíces y los residuos de pasturas; en términos económicos estos sistemas demuestran ser rentables a largo plazo y si son bien manejados pueden llegar a producir una mayor cantidad de kilogramos de carne y/o litros de leche por hectárea. También ofrecen una fuente adicional de ingresos a través de la venta de madera y otros productos forestales. Así es, que los sistemas silvopastoriles han tenido un impacto positivo en la producción agropecuaria uruguaya (MGAP, 2021).

#### 4. ANTECEDENTES ECONÓMICOS Y FINANCIEROS

En proyectos de inversión, se pueden utilizar varios indicadores financieros para evaluar la viabilidad y rentabilidad del proyecto. Algunos de los indicadores financieros más comúnmente utilizados son los siguientes:

- 1) Valor actual neto (VAN): Es una medida que evalúa la rentabilidad de un proyecto al calcular la diferencia entre los flujos de efectivo esperados generados por el proyecto y el costo inicial de la inversión, corregidos por la tasa de interés que se quiere obtener. Un VAN positivo indica que el proyecto es rentable y, por lo tanto, que genera retornos por encima de la tasa de interés propuesta, mientras que un VAN negativo indica que no es una inversión favorable.
- 2) Tasa interna de retorno (TIR): La TIR es la tasa de descuento que iguala el VAN a cero, es decir, es la tasa de rendimiento esperada del proyecto. Una TIR mayor que la tasa de descuento requerida indica que el proyecto es rentable.
- 3) Beneficio costo (B/C): El B/C es la relación entre los beneficios esperados y los costos del proyecto. Un B/C mayor que 1 indica que los beneficios superan los costos, lo que sugiere que el proyecto es viable.

Es importante tener en cuenta que las elecciones de los indicadores financieros a utilizar dependerán del tipo de proyecto, las características específicas de la inversión y los objetivos del inversionista o empresa. Además, se recomienda utilizar varios indicadores en conjunto para obtener una evaluación más completa del proyecto de inversión. El informe será centrado en dos de estos indicadores, los cuales corresponden al VAN y TIR.

El retorno económico en proyectos forestales puede variar según factores como la densidad, especie y uso comercial de la madera (Boscana et al., 2023). Un estudio realizado en Corrientes, Argentina por Lacorte et al. (2016) compararon el flujo de efectivo de un modelo puramente forestal con el de un sistema silvopastoril. Los resultados mostraron que el VAN calculado a una tasa de interés del 8% dio 1.596 U\$/ha para el modelo puramente forestal y 1.342 U\$/ha para el SSP. También sugieren que el ingreso anual equivalente de la inversión forestal es de 170 U\$/ha/año para las plantaciones forestales y 162 U\$/ha/año para los SSP; finalmente, el estudio obtuvo mayores tasas internas de retorno en el SSP (34,5%) que en las plantaciones puramente forestales (25,9%). Por otra parte, un estudio de

Cubbage et al. (2014) señalan que los sistemas integrados suelen tener una baja utilización de insumos a lo largo de todo el ciclo de producción, donde se estudiaron los retornos económicos para plantaciones exóticas de *Eucalyptus* en casi toda América del Sur: Brasil, Argentina, Uruguay, Chile, Colombia, Venezuela y Paraguay. En esta publicación, los autores sugieren que se obtuvo tasas internas de retorno de entre 7% y 12% y que en promedio fueron superiores a las generadas por plantaciones del género *Pinus*. A su vez, un estudio realizado por Boscana et al. (2023), donde en parte se evaluó la rentabilidad de un sistema silvopastoril versus un sistema de plantación forestal convencional en Uruguay con destino de trozas para celulosa, se vieron tasas internas de retorno del 15,1% y 13,7% respectivamente, otorgando la mayor rentabilidad al sistema silvopastoril debido al ingreso por la renta ganadera generada. Asimismo, una tesis realizada por Balestí González et al. (2022) correspondiente a una plantación de *Eucalyptus grandis* en un sistema silvopastoril con destino para producción de madera sólida obtuvo rentabilidades de entre el 11% y 13%.

## 5. HIPÓTESIS

H1: Los sistemas de baja densidad para pulpa no son viables económica y financieramente.

H2: Un sistema silvopastoril en baja densidad resulta en un balance anual de carbono negativo con respecto a las emisiones ganaderas.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

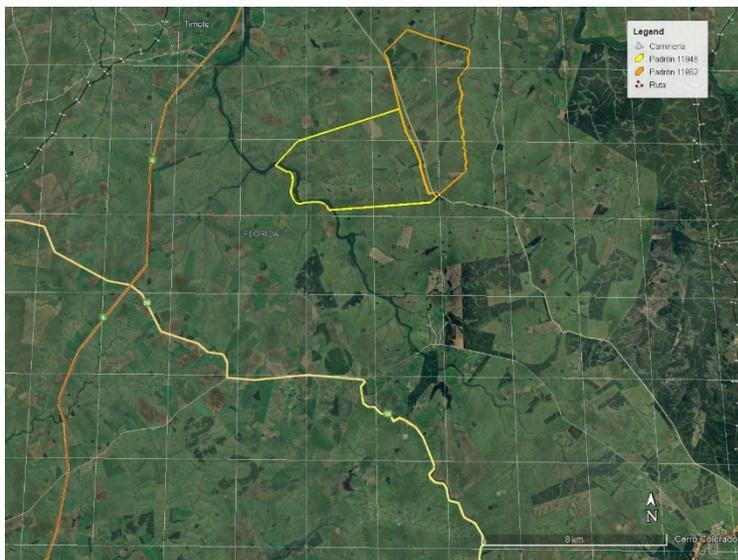
### 6.1 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

Se realizó un estudio en el establecimiento “Patria Vieja” (33°41’31.14”S – 55°39’36.19”) ubicado en la localidad Alejandro Gallinal, departamento de Florida. Pertenece a una familia extranjera y es administrado por personal calificado nacional. Se encuentra a 29,4 kilómetros del pueblo Alejandro Gallinal y a 30,5 kilómetros del pueblo Capilla del Sauce. La oferta de servicios dependiendo de lo que se necesite puede ser limitada, pero en la zona se pueden encontrar almacenes y pequeños negocios, estaciones de servicio, servicios de transporte urbano, centros educativos y centros de salud. Mismo caso para Capilla del Sauce, zona que cuenta con infraestructura de servicios.

En el siguiente mapa satelital (Figura 2) se puede observar la localización de “Patria Vieja”, entre las rutas 6 y 7, además de los caminos secundarios y su cercanía a los centros poblados como Cerro Colorado.

#### **Figura 2**

##### *Ubicación del predio Patria Vieja*



*Nota.* Tomado de Google (2023).

El predio consta de una superficie arrendada correspondiente al padrón 11946 (1.172 hectáreas) y una superficie que es propiedad de la empresa correspondiente al padrón 11962

(2.109 hectáreas). Por lo tanto, en la totalidad del establecimiento se manejan 3.281 hectáreas.

La empresa tiene como actividad agropecuaria principal la ganadería de ciclo completo con la raza Wagyu, debido a que en Uruguay no es común criar este tipo de raza y, por lo tanto, al hacer ciclo completo pueden tener su propia reposición de los animales. La terminación de los animales la realizan a corral (feedlot) y el campo está estratégicamente pensado con una zona de aproximadamente 200 hectáreas de agricultura destinada 100% para proveer ración al mismo. A su vez, todos los años realizan en el entorno de 200 hectáreas de verdeos (raigrás o avena), 600 hectáreas de pasturas permanentes (en base a festuca o leguminosas como trébol blanco y/o lotus) y cuentan con 1.000 hectáreas propias de campo natural.

En la siguiente imagen satelital (Figura 3) se observan los dos padrones, los cuales son linderos uno con el otro, facilitando la logística y el trabajo de campo.

### Figura 3

*Padrones 11962 y 11946 del establecimiento*



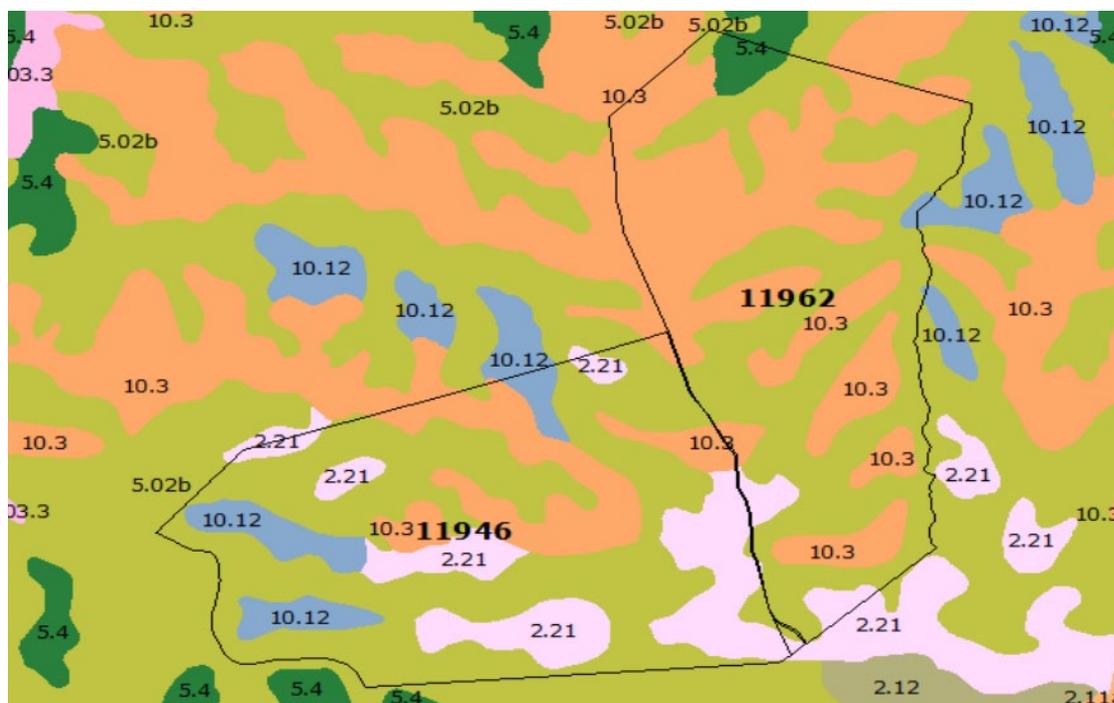
*Nota.* Tomado de Google (2023).

## 6.2 DESCRIPCIÓN DE SUELOS

El campo en estudio se encuentra dentro de los padrones 11962 y 11946, en los cuales se identifican distintos grupos de suelos CONEAT, 10, 2 y 5 (Figura 4). Cada grupo tiene distintas formaciones geológicas, distinta productividad y, por lo tanto, son recomendados para realizar distintas actividades agropecuarias en base a la aptitud que tengan. A continuación, se hará un resumen de las descripciones de cada uno de los suelos predominantes en el predio según Dirección General de Recursos Naturales (DGRN, 2023).

### Figura 4

#### *Grupos de Suelos CONEAT*



*Nota.* Tomado de DGRN (2023).

#### 6.2.1 Suelo 10.3

Según DGRN (2023), el material geológico de este grupo de suelo consiste en un delgado sedimento limo arcilloso que varía de 0,50 a 2 metros de espesor y se encuentra en contacto con las rocas del basamento cristalino, de las cuales hereda arenas gruesas y gravillas. El terreno presenta un relieve suavemente ondulado con pendientes de 1 a 3%. Los suelos predominantes son Brunosoles Eutrícos Lúvicos, siendo altamente fértiles y con

drenaje moderadamente bueno. Se encuentran también Brunosoles Eutricos Tipicos y Vertisoles Rupticos Luvicos, con un índice de productividad de 140 (DGRN, 2023).

#### 6.2.2 Suelo 2.21

La información otorgada por DGRN (2023) para este grupo de suelos en esta zona tiene un relieve con pendientes entre 6 y 12% donde predominan Brunosoles Luvicos y Argisoles Subeutricos Melanicos de textura franca. Los Brunosoles se encuentran en laderas convexas o planas, mientras que los Argisoles estan en áreas altas y suaves entre las colinas. Esta configuración de suelos es característica del sur de Treinta y Tres y el norte de Rocha, con Brunosoles de texturas más finas y mayor fertilidad natural en el sur de Rocha y Maldonado. Se observan también suelos menos profundos como Brunosoles Luvicos moderadamente profundos y ocasionalmente Litosoles Subeutricos Melanicos superficiales, asociados a afloramientos rocosos cercanos. El material madre es un delgado manto de sedimentos limo arcillosos cuaternarios sobre roca del basamento cristalino. La vegetación predominante es de pradera estival y el uso principal de estos suelos es para pastoreo, con un índice de productividad de 105 (DGRN, 2023).

#### 6.2.3 Suelo 10.12

Este grupo de suelos según el DGRN (2023), se ubica en la región del basamento cristalino, caracterizada por interfluvios discontinuos de varios tamaños. El relieve es suavemente ondulado, con pendientes de 2 a 5%. Los suelos predominantes son Vertisoles Rupticos Luvicos y Brunosoles Eutricos Tipicos Luvicos, de color negro y textura franca, con alta fertilidad y drenaje moderadamente bueno. Estas tierras se utilizan principalmente para la ganadería, con vegetación de pradera de alta calidad. El índice de productividad es de 193 (DGRN, 2023).

#### 6.2.4 Suelo 5.02b

Este grupo abarca más del 80% de la subzona en los departamentos de Florida y Flores, así como otras áreas. El relieve es mayormente ondulado con pendientes moderadas de 5 a 7%. Geológicamente, se compone de granitos, migmatitas y rocas metamórficas esquistas predevonicas. Los suelos predominantes son Brunosoles Subeutricos Haplicos, de color pardo a pardo rojizo, con textura franca a franco gravilosa o arenosa con gravillas,

y fertilidad media o baja. Hay una moderada rocosidad con afloramientos en un 2% a 10% del área. Son utilizados principalmente para la ganadería, con un índice de productividad de 88 (DGRN, 2023).

#### 6.2.5 Suelo 5.4

Este tipo de suelo se encuentra en áreas pequeñas dentro de la región cristalina, como en San Gabriel (ruta 6 y 56) y Reboledo en el Departamento de Florida, y al sur de Cardona en la ruta 2, departamento de Colonia. Estos suelos suelen estar en interfluvios con pequeñas mesetas y a veces manantiales, con pendientes de 3 a 5% en los bordes más altos. Se formaron a partir de materiales cristalinos y sedimentos limo-arcillosos poco espesos y discontinuos que los cubren, con profundidad moderada a superficial, texturas francas y fertilidad media o baja. Se utilizan principalmente para el pastoreo, aunque también hay áreas para la agricultura, con un índice de productividad de 114 (DGRN, 2023).

En las siguientes tablas (Tabla 2 y 3) se observa resumido cada grupo de suelo dentro de cada uno de los padrones del establecimiento y a su vez, el índice de productividad y el porcentaje que abarca cada uno dentro del padrón correspondiente.

**Tabla 2**

*Grupos de suelo CONEAT del Padrón 11946*

<b>Grupo</b>	<b>Índice productividad</b>	<b>Porcentaje cubierto (%)</b>
<b>2,21</b>	105	20,21
<b>10,12</b>	193	8,15
<b>10,3</b>	140	15,28
<b>5,02b</b>	88	56,35

*Nota.* Elaborado a partir de datos brindados por DGRN (2023).

**Tabla 3***Grupos de Suelo CONEAT del Padrón 11962*

<b>Grupo</b>	<b>Índice productividad</b>	<b>Porcentaje cubierto (%)</b>
<b>10,3</b>	140	46,37
<b>2,21</b>	105	2,75
<b>10,12</b>	193	0,4
<b>5,02b</b>	88	48,35
<b>5,4</b>	114	2,13

*Nota.* Elaborado a partir de datos brindados por DGRN (2023).

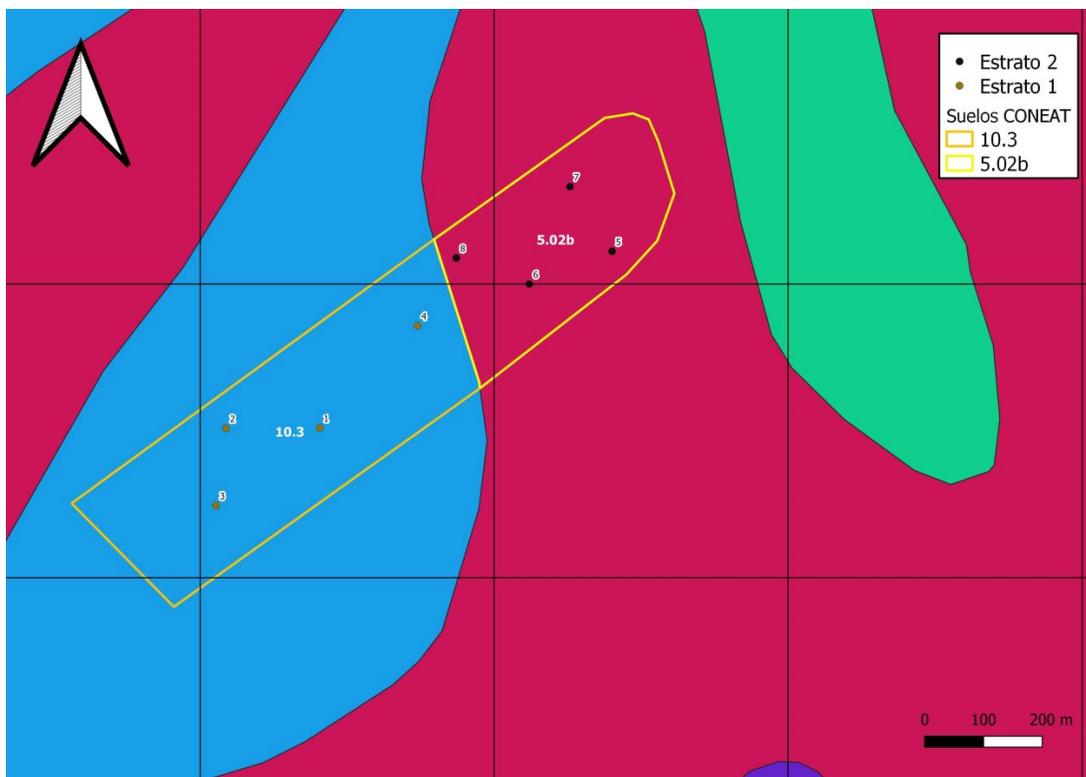
En cuanto a la actividad agropecuaria que se puede realizar en estas áreas es principalmente la ganadería, especialmente la producción de pasturas para la alimentación del ganado. Sin embargo, también es posible llevar a cabo prácticas agrícolas en algunos de estos suelos, principalmente en aquellos con mayor fertilidad. Se puede observar que las mejores condiciones se encuentran en los suelos del grupo 10.3 y 10.12, que presentan buena fertilidad y drenaje.

Por otro lado, en los suelos 2.21 se pueden llevar a cabo tanto prácticas agrícolas como ganaderas, debido a su buena fertilidad y drenaje, aunque en menor medida que en los suelos del grupo 10.3 y 10.12.

Como se observa en la Figura 5 el sistema silvopastoril en estudio se encuentra dentro de los grupos CONEAT 10.3 (17 hectáreas) y 5.02b (11,31 hectáreas). Actualmente en el Uruguay, ninguno de estos dos grupos de suelos se considera de prioridad forestal, es decir, que estos suelos se consideran aptos para otras actividades agropecuarias antes que la forestación.

## Figura 5

*Tipos de suelo que presenta el sistema silvopastoril bajo estudio con sus respectivos estratos*



*Nota.* Elaborado utilizando software QGIS.

Los suelos del grupo 5, principalmente el 5.02 está en conflicto y discusión por varios productores para que sea considerado de prioridad forestal debido a sus características morfológicas, químicas y físicas (J. Hernández, comunicación personal, 2023). Por lo tanto, a pesar de que estos suelos no son considerados actualmente en nuestro país como prioridad para plantaciones forestales, se reconoce por gran parte de los productores que estos suelos por lo general presentan una buena aptitud para las plantaciones.

Cabe destacar que la definición de aptitud forestal según el Decreto n° 452/988 (1988) es “suelos que por sus condiciones permiten un buen crecimiento de los bosques, con buena capacidad de enraizamiento, adecuado drenaje y baja fertilidad natural” (Artículo 3); se procura excluir los suelos de mayor valor para la agricultura de secano y ganadería, por lo general con índices CONEAT mayores a 100 en promedio.

## 6.3 TRABAJO DE CAMPO

### 6.3.1 Inventario forestal

La plantación en estudio corresponde a la especie *E. dunnii*, plantado en la primavera del año 2017 (Figura 6), con un marco de plantación en filas dobles de 3 metros entre filas, 2 metros entre árboles y 18 metros de ancho de callejón ( $3 \times 2 + 18$ ), cuya densidad teórica inicial se traduce en 476 árboles/hectárea. El estudio realizado se centra en 8 parcelas permanentes que fueron instaladas para representar la totalidad del sistema silvopastoril. Cada una tiene dimensiones de 30 metros de longitud y 3 metros de ancho, abarcando una totalidad de al menos 30 árboles/parcela.

#### Figura 6

*Marco de plantación bajo estudio*



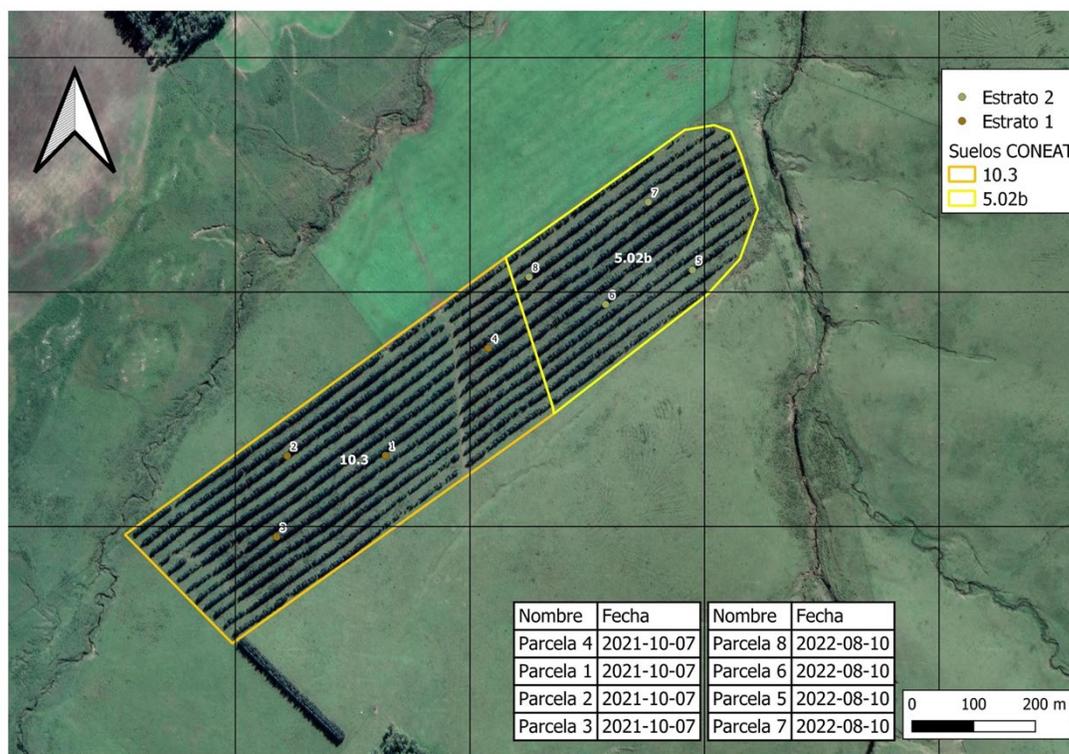
*Nota.* La foto “a” corresponde a la distancia entre filas y la foto “b” a la distancia entre callejones.

Se establecieron 2 estratos (sitios) forestales (Figura 7) en base a una muestra piloto, con el objetivo de obtener un error de muestra menor al 10%. Esta elección y separación entre estratos fue debido a la diferencia que presentan en cuanto a topografía y, como dicho anteriormente, que ambos pertenecen a diferente tipo de suelo según los suelos CONEAT

definidos. El estrato 1 corresponde al grupo de suelo 10.3 y el estrato 2 al 5.02b. En cuanto a la ubicación de cada una y su topografía, el estrato 2 está en una zona baja cercana a un arroyo tributario del Arroyo Mansavillagra y el estrato 1 hacia el otro lado.

### Figura 7

*Ubicación de los estratos 1 y 2 y su respectiva separación de parcelas*



*Nota.* Elaborado a partir de Google (2023).

La elección de las parcelas a priori (Figura 7) se hizo mediante una inspección visual de sitio, donde se observaron diferencias en crecimiento, faltantes de árboles en las filas de plantación, circunferencia a la altura de pecho (CAP), altura total (Ht), entre otros. Se buscó que cada parcela tuviera una cantidad de árboles mayor a 20 para evitar un efecto ambiental del sitio capaz de sesgar cada medición, según las recomendaciones para inventarios forestales (Sorrentino Fattoruso, 1997).

Se realizaron dos mediciones dasométricas en cada una de las 8 parcelas: la primera en julio del año 2021 y la segunda en noviembre del año 2022. Las variables dasométricas que se midieron fueron altura de los árboles (Ht) y circunferencia a la altura del pecho (CAP). Con estas mediciones fue posible calcular otras variables dasométricas de interés para el

estudio como son el diámetro a la altura del pecho (DAP), el área basal (AB) y el volumen (V) de cada uno de los árboles. Las fórmulas que se utilizaron fueron las siguientes:

$$1) \text{ DAP (cm)} = \text{CAP (cm)} \div \text{PI} (\pi)$$

El DAP representa el diámetro a la altura del pecho, aproximadamente a 1,30 metros sobre el suelo. Esta fórmula se utiliza para estandarizar la medición del diámetro de los árboles, ya que la circunferencia puede variar según la ubicación donde se mida, dividido por el número PI, lo que convierte el valor de CAP en el diámetro del árbol. De esta manera, se asegura que la medición del DAP sea consistente y comparable entre diferentes árboles y sitios.

El DAP es una medida clave para la gestión sostenible de los bosques, en el ámbito económico influye en la valoración forestal, la planificación de la industria maderera y la cuantificación de los servicios ecosistémicos. Desde el punto de vista ambiental, el DAP es crucial para evaluar el papel de los árboles en la mitigación del cambio climático, en parte por la captación de GEI.

$$2) \text{ Área basal (m}^2\text{/árbol)} = (\text{DAP (cm)} \div 100)^2 \times \text{PI} (\pi) \div 4$$

Esta fórmula cuantifica el área de cada árbol individual en metros cuadrados. Para obtener el AB del área forestal completa en la parcela, es necesario sumar el área basal de todos los árboles individuales presentes en la unidad de superficie evaluada.

El cálculo de AB es importante en el ámbito económico porque se relaciona con el potencial de madera que un bosque puede producir. Desde la perspectiva ambiental, AB proporciona información sobre la productividad del bosque, su capacidad para almacenar carbono, entre otros.

$$3) \text{ Volúmen (m}^3\text{/árbol)} = \text{Ht (m)} \times \text{AB(m}^2\text{)} \times \text{ff}$$

La ecuación anterior determina, por lo tanto, el volumen (V) individual en metros cúbicos de cada árbol relacionando la altura (Ht) con el área basal (AB) y un factor de forma (ff) de 0,365. Este factor es una constante que se utiliza para tener en cuenta la forma del fuste del árbol y en promedio para el *E. dunnii* es pertinente utilizar 0,365 (I. López, comunicación personal, 2021) para reflejar las características específicas de la especie en estudio y las condiciones del sitio.

A su vez, es necesario normalizar estos valores, llevando las unidades a hectáreas. Para llevar a cabo este proceso fue necesario calcular el área de cada una de las parcelas correspondientes y luego con el área de cada parcela fue posible calcular el coeficiente de expansión utilizado para poder expresar cada uno de los resultados en una hectárea. Las fórmulas utilizadas para este proceso fueron las siguientes (todo expresado en metros):

- 4)  $\text{Área de parcela (m}^2\text{)} = \text{Largo de parcela} \times ((\text{Ancho callejón 1} + \text{Ancho callejón 2} + \text{Ancho callejón 3} + \text{Ancho callejón 4}) \div 4) + ((\text{Ancho fila 1} + \text{Ancho fila 2}) \div 2)$
- 5)  $\text{Coeficiente de expansión} = 10.000 \div \text{Área de parcela (m}^2\text{)}$

Luego, para obtener el volumen/hectárea, se multiplicó el volumen de la parcela por el coeficiente de expansión calculado. El mismo procedimiento se aplicó para calcular la densidad de árboles en la hectárea.

El cálculo del Error de Medición se realizó para evaluar la precisión de la estimación de las variables medidas. Se utilizó la variable Error Relativo, expresada en porcentaje y se comparó con un umbral predefinido menor al 10%. Para calcular el Error de Medición de las variables (DAP y V) se utilizó el siguiente procedimiento y cálculos en el Excel:

- 6) *Desvío estándar y promedio de las variables*
- 7)  $\text{Coeficiente de variación (CV)} = (\text{Desvío} \div \text{Promedio}) \times 100$
- 8)  $\text{Error de Medición} = (\text{CV} \times 1,96) \div (\text{Raíz cuadrada } 4)$

Si el Error Relativo es menor al 10%, se considera que la estimación es aceptablemente precisa. En caso contrario, se deberían revisar los métodos de muestreo y cálculo para mejorar la precisión de la estimación. Cabe destacar la importancia de estos cálculos y evaluaciones de precisión, para garantizar que las estimaciones de densidades y volúmenes sean confiables y representativas de toda el área forestal de interés.

Para medir la altura se utilizó la siguiente herramienta:

El Blume Leiss (Figura 8) es un instrumento de medición de altura de forma rápida y precisa. Para el uso de esta herramienta se reguló la escala para una distancia de 20 metros del árbol y de esta manera, al ver todo el árbol es posible enfocar la base del mismo y luego la parte más alta para que el instrumento entregue el resultado de altura.

**Figura 8***Blume Leiss*

Por otro lado, la Circunferencia a la altura de pecho (CAP) se midió con una cinta métrica al contorno del árbol a la altura de pecho de una persona.

### 6.3.2 Crecimiento del rodal

En el ámbito terminológico forestal, se identifican dos modalidades fundamentales para expresar el desarrollo de un árbol o un rodal, diferenciándose entre sí en relación al periodo temporal al que hacen referencia. En este contexto, el incremento corriente anual (ICA) se define como el aumento de la variable (por ejemplo, V) en un año, representando así el crecimiento experimentado durante ese período en particular.

$$ICA(m^3/ha/año) = volumen(n) - volumen(n-1)$$

Por otro lado, el incremento medio anual (IMA) se concibe como el crecimiento promedio anual desde la fase inicial del árbol o de la plantación hasta cualquier edad. Su determinación implica la división del crecimiento acumulado hasta un punto específico en el tiempo por la edad correspondiente del árbol o de la plantación.

$$IMA(m^3/ha/año) = \frac{Volumen\ acumulado(m^3/ha)}{n\ (años)}$$

## 6.4 CLASES DIAMÉTRICAS

Las clases diamétricas de los árboles se definieron para la extracción de las muestras de carbono que se llevaron a cabo para el posterior análisis. Se calcularon tres clases a partir del máximo valor de CAP (80 cm) y el mínimo valor de CAP (8,5 cm) de todos los árboles en estudio. Se dividió en 3 clases diamétricas para poder abarcar la mayor variabilidad posible al momento de realizar el análisis de carbono en laboratorio.

El rango de clases (Tabla 4) fue calculado de la siguiente manera:

$$\text{Rango a utilizar (cm)} = ((80 - 8,5) \div 3) = 24$$

Al mínimo valor de CAP (8,5 cm) se le sumo el rango (24 cm) para marcar la primera clase diamétrica, lo mismo se hizo en la segunda y tercera clase diamétrica.

Los valores de CAP se pasaron a DAP (Tabla 5) para facilitar el análisis de resultados de la siguiente manera:

$$\text{DAP (cm)} = \text{CAP(cm)} \div \pi$$

**Tabla 4**

*Clases diamétricas utilizadas (cm CAP)*

Clases	1	2	3
<b>Rango (cm)</b>	8,5 – 32,5	32,5 – 56,5	> 56,5

**Tabla 5**

*Clases diamétricas utilizadas (cm DAP)*

Clases	1	2	3
<b>Rango (cm)</b>	2,7 – 10,4	10,4 – 18,0	> 18,0

### 6.4.1 Obtención de tarugos

Se procedió a la extracción de las muestras de carbono, los llamados “tarugos” en cada área de estudio. La extracción de los tarugos se realizó en marzo del año 2023, al igual que todas las posteriores etapas a la extracción que se explican en los siguientes párrafos:

Para la extracción de tarugos se utilizó el Barreno de Pressler (Figura 9); los mismos se extraen a una altura de 1,3 metros desde la base del árbol. Estas muestras son los insumos para la determinación en laboratorio del contenido de carbono en la madera.

### **Figura 9**

*Barreno de Pressler*



El funcionamiento consiste en introducir la barrena en el tronco del árbol seleccionado. Se ejerce presión y se gira en sentido horario para perforar la madera. La barrena se avanza lentamente en el tronco, cortando una sección cilíndrica de madera a medida que avanza. Una vez que se ha alcanzado la profundidad deseada o se ha obtenido la longitud necesaria de la muestra, se detiene la rotación de la barrena y se retira suavemente del tronco del árbol. La muestra extraída se mantiene dentro de la barrena y se asegura para evitar su contaminación o daños.

La extracción se hizo sobre 24 árboles en total; en cada parcela (8 en total) se extraen tarugos en las 3 clases diamétricas anteriormente detalladas. A su vez, por cada árbol barrenado se tomaron 2 muestras, para mejorar la precisión en el análisis de laboratorio. Esto da un total de 48 muestras adquiridas, de las cuales una vez llevadas al laboratorio quedarían en 24 muestras totales ( $48 \div 2$ ), debido a que se juntan las dos muestras que se habían tomado en diferente posición del árbol. Luego, se llevaron a cabo análisis para determinar la densidad básica de la madera y el contenido de carbono. Estos análisis se realizaron utilizando el

método de desplazamiento de volumen y el método de vía húmeda y calorimetría (Nelson & Sommers, 1996), respectivamente.

## 6.5 ANÁLISIS DE LABORATORIO

En laboratorio se realizó el análisis de los tarugos extraídos del campo, para la obtención de la densidad y el porcentaje de carbono retenido en la masa forestal. Este análisis consta de varias etapas a partir de que los tarugos llegan al laboratorio, a continuación, se detalla cada una de ellas:

### 6.5.1 Medición de volumen

El primer paso en llevarse a cabo fue colocar los tarugos en agua, con el objetivo de que se saturen, para que no absorban agua en el momento de la lectura del volumen falseando los datos. Luego de pasado algunos días, se procedió a la evaluación del volumen de las muestras, utilizando un vaso de bohemia con agua y una balanza de precisión (Figura 10).

#### **Figura 10**

*Balanza utilizada para el proceso*



Al vaso de bohemia se le colocó agua suficiente para poder cubrir el tamaño de los tarugos a medir y luego se ubicó en la balanza de precisión. Se taró la balanza (se puso en 0) y se procedió a introducir los tarugos húmedos individualmente tomando nota del peso de

estos, el cual equivale al volumen (ANEXO Tabla A1). Cuando un cuerpo es irregular, calcular su volumen de forma directa no es posible, por lo tanto, se aplicó el principio de Arquímedes para calcularlo de forma indirecta: “Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje igual al peso del volumen de líquido desalojado”; si el fluido es agua, cuya densidad es la unidad, el peso en gramos coincide numéricamente con el volumen medido en centímetros cúbicos.

### 6.5.2 Peso seco y molienda

Los tarugos húmedos, luego de la medición de volumen se colocaron en hornos a 60°C durante 3 días para que se sequen completamente. Una vez secos, se procedió a pesarlos individualmente en la balanza de precisión (Figura 11) y anotar los resultados.

El siguiente paso luego de la medición en peso seco fue proceder a la molienda, para su posterior análisis. En este paso se utilizó una maquina específicamente para esto, que consiste en introducir los tarugos por su parte superior, prender la máquina y luego en su parte inferior obtener las muestras molidas. Cabe destacar la importancia de que las muestras sean molidas y es debido a que, para obtener una disolución en las sustancias de manera efectiva, deben ser lo más pequeñas posible, por eso es que este procedimiento se realizó varias veces por muestra.

### **Figura 11**

#### *Molienda de tarugos*



### 6.5.3 Cálculo de densidad

Para esta etapa ya se contaba con los datos del peso seco de las muestras y el volumen de estas. A partir de estos datos, se obtuvo la densidad de la madera (ANEXO Tabla A1) aplicando la siguiente ecuación:

$$9) \text{ Densidad (g/cm}^3\text{)} = \text{Masa (g)} \div \text{Volumen (cm}^3\text{)}$$

Una vez calculada la densidad de los tarugos, juntamente con el volumen obtenido previamente, es posible calcular la biomasa tanto del fuste como de las ramas de los árboles, aplicando las ecuaciones de Hirigoyen et al. (2021):

$$10) \text{ Biomasa fuste (Tn/parcela)} = \text{Densidad (g/cm}^3\text{)} \times V(\text{m}^3/\text{parcela})$$

Estos cálculos se abordan más en profundidad en la etapa “Fijación, emisión y balance de carbono”, donde juntamente se explica la metodología para obtener el balance final de carbono en el establecimiento.

## 6.6 TÉCNICA DE DETERMINACIÓN DEL CARBONO

En esta etapa del laboratorio, se procedió a determinar el contenido de carbono de las 24 muestras compuestas mediante vía húmeda y colorimetría, conforme al método descrito por Nelson y Sommers (1996). A continuación, se describen cada uno de los pasos y materiales necesarios para llevar a cabo este proceso:

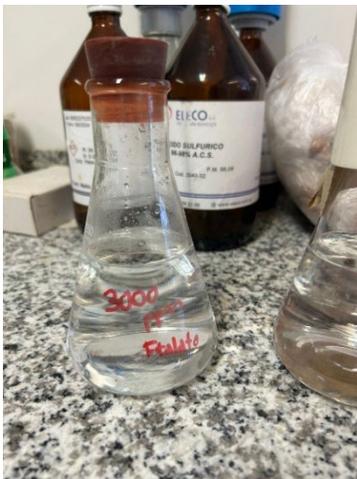
### 6.6.1 Materiales y reactivos

- Tubos pyrex con tapa rosca de 40 mL
- Pipeta automática de 5 mL
- Dispensador automático ajustable a 15 mL
- Matraces aforados de 250 mL
- Bloque digestor
- Balanza analítica

- Dicromato de K ( $K_2CrO_7$ ) ppa
- Ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) ppa
- Ftalato de K ( $C_8H_5KO_4$ ) ppa

**Figura 12**

*Ftalato de K*



**Figura 13**

*Ácido sulfúrico*



### 6.6.2 Soluciones

- Dicromato de K 1N: Diluir 49,035 gramos de  $K_2CrO_7$  ppa en 1 litro de agua desionizada.
- Ftalato acido de K 3000 ppm (C): Diluir 1,5940 gramos de  $C_8H_5KO_4$  ppa en 250 mL de agua desionizada.
- Ftalato acido de K 1500 ppm (C): Diluir 0,7970 gramos de  $C_8H_5KO_4$  ppa en 250 mL de agua desionizada.

### 6.6.3 Digestión y preparación de curva de calibración

Se realizó una curva de calibración con cantidades de Carbono conocidas que van desde 0 mg de Carbono a 15 mg de Carbono. Esta curva se realiza a partir de la solución de Ftalato de K y el esquema utilizado fue el siguiente:

**Tabla 6**

*Curva de calibración*

<b>Curva de calibración</b>			
<b>Ppm sol. de C.</b>	<b>mL sol.</b>	<b>mL H<sub>2</sub>O</b>	<b>Mg C</b>
<b>1500</b>	0	5	0
<b>1500</b>	2	3	3
<b>1500</b>	4	1	6
<b>3000</b>	3	2	9
<b>3000</b>	5	0	15

Estas combinaciones fueron colocadas en tubos pírex con tapa de rosca.

A continuación, se pesaron  $0,030 \pm 0,001$  gramos de material seco y molido (detallado anteriormente en la etapa “peso seco y molienda”). El material, como se observa en la Figura 14, se trató con 5 mL de agua desionizada, 5 mL de una solución de  $K_2CrO_7$  1 N y 15 mL de  $H_2SO_4$  ppa (mismo procedimiento que se usó para la curva de calibración).

**Figura 14**

*Tubos de ensayo para curvas de calibración*



Luego se procedió a realizar la digestión de las muestras y el estándar durante 30 minutos a 50 °C en tubos de 40 mL cerrados con tapa (Figura 16). Se dejó enfriar hasta temperatura ambiente y luego en baño de agua por algunos minutos. Es necesario que se mezcle el contenido del tubo, sosteniendo el mismo con una pinza (debido a que la reacción química genera calor), siempre en la piletta del laboratorio, con la precaución necesaria ya que el líquido es corrosivo (Figura 15).

**Figura 15**

*Tubo de ensayo pre-reacción*



**Figura 16**

*Tubos de ensayo en horno y reacción*



#### 6.6.4 Determinación del porcentaje de carbono

Cada solución antes de ser medida fue diluida al 50% con agua desionizada para aumentar el rango de los valores leídos. Posteriormente se procedió a la lectura de las muestras en espectrofotómetro (Figura 17) a 600 nm.

**Figura 17**

*Espectrofotómetro*



Luego de la lectura, para obtener la concentración de Carbono de las muestras, se procedió a la realización de una regresión lineal con los datos de la curva de calibración y estimar el dato para las muestras objetivos. El cálculo final de la concentración de Carbono en % se hizo en Excel con los datos obtenidos de la siguiente manera:

$$11) \text{ Porcentaje de Carbono } (\%C) = (\text{Peso seco} \div 1.000) \div \text{mg Carbono}$$

## 6.7 FIJACIÓN, EMISIÓN Y BALANCE DE CARBONO

En esta etapa se procedió al cálculo de la biomasa forestal obtenida por cada parcela para luego poder evaluar la capacidad de fijación de carbono por parte de la masa forestal. A su vez, se detalla la metodología utilizada para calcular las emisiones de carbono por parte de la ganadería, para poder determinar el balance de carbono que se puede generar por parte del sistema silvopastoril.

### 6.7.1 Biomasa forestal

Posteriormente al cálculo del porcentaje de carbono para cada una de las muestras obtenidas, se procedió a la obtención de la biomasa del fuste de los árboles. Para este momento, ya se contaba con todos los datos necesarios para calcular la biomasa, por lo tanto, se realizó de la siguiente manera:

- 1) Se separó dentro de cada una de las 8 parcelas el promedio del volumen para cada clase diamétrica utilizada.
- 2) Se separó por densidades ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) para cada clase diamétrica dentro de las 8 parcelas.
- 3) Se calculó la biomasa del fuste en toneladas (Tn)/clase diamétrica (CD)/parcela de la siguiente manera:

$$a. \text{ Biomasa fuste (Tn/CD/parcela)} = \text{Densidad (gr/cm}^3) \times V(\text{m}^3)$$

- 4) Esta biomasa calculada se pasó a hectáreas utilizando el factor de expansión correspondiente (16):

$$b. \text{ Biomasa fuste (Tn/CD/ha)} = \text{Biomasa fuste (Tn/CD/parcela)} \times 16$$

A su vez, se realizó el cálculo de la biomasa en ramas a partir de las ecuaciones de Hirigoyen et al. (2021), mediante las siguientes etapas:

- 1) Se separó la  $H_t$  y el DAP promedio para cada una de las 8 parcelas.

- 2) Se calculó la materia seca de las ramas en kg/árbol, aplicando la función de Hirigoyen et al. (2021) con los datos de  $H_t$  y DAP promedios para cada parcela.
- 3) Se calculó la biomasa de las ramas en Tn/ha:

$$a. \text{Biomasa ramas (Tn/ha)} = \text{MS Ramas (kg/árbol)} \times N \div 1.000$$

Siendo MS la materia seca y N la cantidad de árboles/ha.

#### 6.7.2 Carbono fijado por la masa forestal

El objetivo de esta etapa fue calcular, a partir de la biomasa, la capacidad por parte de la plantación de fijar carbono y así posteriormente realizar un balance entre lo fijado y lo emitido por parte de la actividad ganadera.

A partir de la biomasa anteriormente calculada y el porcentaje de carbono, se procedió a calcular la fijación de carbono por cada parcela en estudio y luego convertir estos resultados a la hectárea a través del factor de expansión.

Cantidad de carbono fijado expresado en Tn/parcela:

$$12) \text{Carbono (Tn/parcela)} = \text{Biomasa (Tn/parcela)} \times \% \text{Carbono por parcela}$$

Cantidad de carbono fijado expresado en Tn/ha:

$$13) \text{Carbono (Tn/ha)} = \text{Carbono (Tn/parcela)} \times \text{Factor de expansión}$$

Cantidad de carbono fijado expresado en Tn CO<sub>2e</sub>/ha (dióxido de carbono equivalente):

$$14) \text{CO}_{2e}(\text{Tn/ha}) = \text{Carbono (Tn/ha)} \times 3,67$$

Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2024), el carbono se utiliza como una medida estándar para rastrear las emisiones a lo largo del ciclo de carbono. Una forma común de convertir una cantidad de carbono en su equivalente en dióxido de carbono (CO<sub>2e</sub>) es multiplicar por el factor 3,67. El resultado obtenido de CO<sub>2e</sub> corresponde al año 2022, año en el que se realizaron las mediciones y los datos para poder hacer el análisis de laboratorio.

#### 6.7.3 GEI emitidos por la actividad ganadera

Se obtuvieron las declaraciones juradas de DICOSE correspondientes a la empresa para los años 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022, en el cual se detalla todos los movimientos que

hubo de ganado durante el ejercicio de cada año en el establecimiento (M. Mazolla, comunicación personal, 2023).

Para calcular las estimaciones de las emisiones de GEI, se parte de las ecuaciones de estimación del IPCC (2006). Se considera la ganancia diaria en diferentes categorías de animales, la disponibilidad de forraje, la digestibilidad y la proteína cruda, además de tener en cuenta el consumo energético de los animales durante el pastoreo. Con esta información fue posible calcular el total de las emisiones de la empresa por parte de la actividad ganadera, de acuerdo a la cantidad total de animales en el predio en los años 2018-2022 y separado por las categorías correspondientes.

Estos valores obtenidos fueron los totales anuales del predio, por lo que se procedió a dividir cada uno por las hectáreas totales del predio y obtener el resultado en toneladas de CO<sub>2e</sub> por año y por hectárea.

#### 6.7.4 Balance total de carbono fijado vs emitido

Una vez obtenida la fijación por parte de la masa forestal de la plantación y las emisiones por parte de la actividad ganadera, se procedió al cálculo del balance de carbono:

- *Balance anual = Fijado anual en la biomasa leñosa – Emitido anual por el ganado*

Es importante recalcar que este balance anual de carbono comprende solamente la fijación por parte del sistema silvopastoril de extensión 28,31 hectáreas, mientras que la emisión es por la actividad ganadera en todo el establecimiento de 3.281 hectáreas; por esta razón es que los resultados obtenidos se pasan a hectáreas, para que la comparación del balance sea lo más representativo posible.

A su vez, para la fijación de carbono se realizó una proyección de la plantación forestal en el Sistema de Apoyo a la Gestión (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], 2015) (ANEXO Figura A3) para poder estimar cuanto fija la plantación en los primeros años (2018-2021); debido a que no se tenía los datos necesarios para realizar la fijación de carbono como se hizo en el trabajo de campo para el año 2022. En cuanto a lo emitido por la actividad ganadera si se contó con los datos reales de las declaraciones juradas por parte de la empresa y se calculó para cada año.

## 6.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La herramienta utilizada para estructurar los resultados fue mediante el Excel; a su vez, para los resultados dasométricos y de laboratorio se procedió a la utilización del software R studio versión 5701.9.1.0 para realizar los análisis estadísticos correspondientes.

Los análisis estadísticos se realizaron para determinar si las diferencias observadas entre las variables son estadísticamente significativas o simplemente el resultado del azar y de esta manera poder realizar conclusiones confiables.

El software utilizado tiene variada forma de leer los datos y muchas funciones analíticas, pero que, a su vez, pueden ser de difícil comprensión. En esta tesis se procedió a la utilización de los análisis de varianza para determinar la significancia de los datos, las medias ajustadas y la utilización de gráficos de barra para observar los resultados de manera más representativa.

## 6.9 ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

En relación a los objetivos de la tesis, uno de ellos fue determinar la viabilidad financiera de este sistema silvopastoril, por lo cual, se procedió a elaborar un flujo de fondos con el propósito de presentar de manera clara y concisa la información relacionada con los egresos e ingresos generados en el área de estudio de la plantación forestal a lo largo de un periodo de 12 años. Se ha considerado el año 2017 como el punto inicial (año 0), ya que es cuando se llevó a cabo la plantación de la población bajo estudio.

Las principales inversiones en el año 0 corresponden a la obtención de la tierra y la instalación del monte en una superficie de 28,31 ha. El valor de la tierra utilizado en el flujo de fondos se estimó mediante un comunicado del MGAP a través de estadísticas agropecuarias (DIEA, 2020) en el cual se determina una serie de compraventas, para estimar con la mayor precisión posible se tomó la serie de compraventas desde el año 2017 (año de la plantación) hasta la fecha y se hizo un promedio. Para el departamento en estudio (Florida), asciende a un valor de 3.724 U\$S/ha. Sobre la superficie de esta tierra es en la que se realiza la inversión de instalar el monte de *E. dunnii*, del cual se obtuvieron los costos reales de la plantación llevada a cabo en el año 2017.

En la Tabla 7 se observan los costos reales que incluyen la preparación del sitio y el laboreo necesarios para llevar a cabo la plantación. En la Tabla 8 se observan los costos relacionados a la plantación y replantación que en general se realiza en el año 1, luego de la plantación en el año 0, debido a que los plantines que no se pudieron adaptar e implantar correctamente se vuelven a reponer en la replantación. En esta misma etapa se toman en cuenta todos los insumos necesarios en cuanto a la nutrición de los plantines como son el uso de fertilizantes. Por último, en la Tabla 9 se observan los costos relacionados a tratamientos periódicos como son el control de hormigas, herbicida y la administración, los cuales se toman luego en el flujo de fondos como egresos a medida que se aplican en diferentes años.

**Tabla 7**

*Costos para la preparación del sitio y laboreo*

<b>Ítem</b>	<b>Unidad</b>	<b>US\$/ha</b>
<b>Hormiguicida + Aplicación</b>	US\$/ha	17
<b>Marcación de curvas</b>	US\$/ha	5
<b>Herbicida pre-emergente</b>	US\$/L	30
<b>Aplicación herbicida línea</b>	US\$/ha	8
<b>Alambrado</b>	US\$/m	20
<b>Subsolado</b>	US\$/ha	56
<b>Excéntrica</b>	US\$/ha	49
<b>Disquera</b>	US\$/ha	32
<b>Taipera</b>	US\$/ha	40

*Nota.* Elaborado a partir de M. Mazolla (comunicación personal, 2023).

**Tabla 8***Costos para la plantación y replantación*

Ítem	Unidad	US\$/ha
<b>Fertilizante</b>	US\$/kg	16
<b>Distribución de plantas</b>	US\$/ha	114
<b>Plantines</b>	US\$/pl	63
<b>Replantación</b>	US\$/pl	6

*Nota.* Elaborado a partir de M. Mazolla (comunicación personal, 2023).

**Tabla 9***Costos para tratamientos periódicos, administración y el total de costos de plantación*

Ítem	Unidad	US\$/ha
<b>Control de hormigas</b>	US\$/kg	17
<b>Herbicida</b>	US\$/L	30
<b>Administración</b>	US\$/ha	10
<b>Total costos</b>	<b>US\$/ha</b>	<b>513*</b>

*Nota.* Elaborado a partir de M. Mazolla (comunicación personal, 2023). \*El costo total surge a partir de la suma de los costos de las tablas 7, 8 y 9.

Para los egresos e ingresos del proyecto, es necesario poder estimar la cantidad de madera que generará el sistema silvopastoril al año de cosecha (año 12). Para ello se utilizó el software SAG (INIA, 2015) en el cual, mediante el ingreso de variables dendrométricas de la plantación, se obtiene una proyección al año de cosecha. Esta proyección permite estimar el volumen de madera a obtener del sistema (Tabla 10). Los datos necesarios a ingresar en el SAG corresponden a los datos de inventario: altura media dominante de la plantación (AMD), N, AB y DAP.

**Tabla 10***Producción de madera en metros cúbicos/hectárea*

Año cosecha	Población (árboles/ha)	Vol. Comercial (m <sup>3</sup> /ha)
12	442	150

*Nota.* Según la simulación obtenida del software SAG (INIA, 2015)

En cuanto a los egresos generados por el proyecto, se incluyen los impuestos y la administración que se necesita para mantener un seguimiento en el monte, junto con el manejo de la ganadería; los egresos generados por la cosecha de la madera y el flete necesario para transportar la madera hacia la planta de celulosa que hará el procesamiento. Los impuestos y administración se asumieron en 13 US\$/ha/año (A. Bussoni, comunicación personal, 2023); la cosecha asciende a un egreso al año 12 de 15 US\$/m<sup>3</sup> (MGAP, 2021); el egreso por flete toma en cuenta la distancia desde el establecimiento a planta y a su vez, un costo por km y tonelada de madera transportada, siendo utilizado para el proyecto un flete de 11,04 US\$/m<sup>3</sup>.

La generación de ingresos fue calculada en base a la estimación de volumen final cosechado al año 12. Se puede dividir principalmente en los ingresos otorgados por la cosecha final de la madera y su venta a planta, la renta ganadera generada por el sistema silvopastoril y los potenciales bonos de carbono generados por la plantación.

Para el cálculo económico de la actividad ganadera en el establecimiento, se llevó a cabo una estimación hipotética del ingreso por arrendamiento. Se utilizó un valor promedio de alquiler de tierras para actividades ganaderas y de uso agropecuario en el área (Florida) que asciende a un valor de 120 US\$/ha/año, basado en los precios registrados en los años 2017-2022 según datos de DIEA (2020, 2021a). Sin embargo, la renta ganadera en el sistema silvopastoril se ve reducida debido al área cubierta por los árboles, los cuales quitan superficie al potrero y es superficie de las cuales los animales no cuentan con alimento, por lo tanto, para estimar un valor adecuado, se estimó una reducción del 30% del área de pastoreo lo que se traslada al valor de arrendamiento, quedando de 84 US\$/ha/año.

Por otro lado, los ingresos relacionados con la actividad forestal corresponden a la venta de la madera generada al año 12 de la plantación para pulpa de celulosa. Se ha utilizado un precio FOB de madera puesto en planta (zona franca) para *E. dunnii* de 54 US\$/m<sup>3</sup> (Boscana & Arriaga, 2021). Se evaluó financieramente, diferentes escenarios en el precio de la madera ( $\pm 10\%$ ) sobre un valor base de 54 US\$/m<sup>3</sup>. Los resultados permiten evaluar cómo rendiría el proyecto en cuanto a rentabilidad, al variar el precio de la madera al momento de venta.

La generación de créditos de carbono se calculó en base al promedio anual de captura de carbono por parte de la plantación. Para esto, se tuvo que recurrir a la simulación

realizada en el SAG (INIA, 2015) (ANEXO Figura A2) y llevar la biomasa potencialmente producida a lo largo de los 12 años de crecimiento, a Tn CO<sub>2e</sub>/ha/año como se observa en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Estimación promedio del carbono fijado (Tn CO<sub>2e</sub>) en plantación E. dunnii, 12 años de rotación*

Cosecha año	Volumen	Tn	Tn CO <sub>2e</sub> /ha	Tn CO <sub>2e</sub> /ha/año
12	madera (m <sup>3</sup> /ha)	MS/ha		
<b>Total</b>	150,2	120,2	216	18

Este enfoque ha permitido elaborar un informe detallado sobre la situación financiera, lo que facilita la comprensión y evaluación de la rentabilidad del sistema silvopastoril. Se han utilizado dos indicadores financieros principales: el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno.

Para establecer la tasa de interés empleada en este análisis, se tomó como referencia un estudio realizado por Busby et al. (2020), donde se construyeron varios portafolios de inversión para diversos países, señalando una tasa de retorno esperada del 7% para Uruguay. Esta tasa se fundamenta en diversos factores, como el número de empresas inversoras en el sector forestal, las especies utilizadas y la situación del mercado forestal en Uruguay.

Por consiguiente, los resultados de los indicadores financieros se calcularon utilizando una tasa de interés del 7% considerado como el valor más representativo y, por ende, el más esperado en el proyecto. Sin embargo, cabe destacar que en el contexto específico de este estudio, además de utilizar la tasa del 7%, se realizó un análisis de sensibilidad con tasas de descuento del 5% y 6% para poder evaluar distintos escenarios posibles a lo largo del proyecto. Se considera relevante el poder evaluar y tener en cuenta distintos factores, como la variabilidad de los precios del mercado y el volumen a cosechar de madera, que pueden hacer variar las tasas de descuento y por ende la rentabilidad del proyecto.

El VAN se define como la cantidad de dinero que el proyecto genera en función de la tasa de descuento aplicada. Si el resultado es positivo, implica que se obtiene una ganancia que supera los costos de operación, la inversión inicial y el costo de oportunidad del inversionista (Álvarez & Falcao, 2009).

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Fnt}{(1+i)^t}$$

Donde:

- Fnt representa el flujo neto en el año t
- “i” es la tasa de descuento en términos porcentuales

Esta fórmula calcula el valor presente de todos los flujos netos generados por el proyecto, descontados a su valor actual utilizando la tasa de descuento “i”. Si el resultado del VAN es mayor a cero, indica que el proyecto genera un valor adicional que compensa la inversión y el costo de oportunidad.

Por otro lado, la TIR representa la rentabilidad de la inversión:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{Fnt}{(1+i)^t}$$

## 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El siguiente capítulo tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos y analizarlos; para esto se estructura el capítulo en:

- 1) Resultados de las variables dasométricas
- 2) Resultados de laboratorio
- 3) Resultados económicos

### 7.1 Resultados dasométricos

En la Tabla 12 se observa el número total de individuos que fueron utilizados para las mediciones a lo largo del estudio. El número total de individuos “N/parcela” es la sumatoria del total de los árboles que tenían inicialmente cada una de las parcelas en el momento de la plantación, restándole los árboles faltantes y las muertes que hubo a lo largo de los años. Por otro lado, se presentan los árboles suprimidos, los cuales por su baja altura y diámetro la mayoría no pudieron ser considerados para las mediciones en el estudio.

**Tabla 12**

*Número de individuos por parcela, individuos suprimidos y faltantes en cada una de las mediciones*

Estrato	Primera medición (julio 2021)				Segunda medición (noviembre 2022)			
	Parcela	N/parcela	Suprimidos	Faltantes	Parcela	N/parcela	Suprimidos	Faltantes
	1	24	1	4	1	25	1	4
1	2	23	1	4	2	24	1	4
1	3	24	4	2	3	28	4	2
1	4	24	2	2	4	26	2	2
2	5	23	3	3	5	24	3	5
2	6	21	3	5	6	23	2	7
2	7	21	3	5	7	22	3	7
2	8	28	2	1	8	29	2	2

Los resultados, en la Tabla 13, muestran un incremento considerable en la altura total (Ht), el diámetro a la altura de pecho (DAP) y el volumen de los árboles entre la primera y la segunda medición. En la primera medición, las alturas variaron entre 5,91 y 9,08 metros, mientras que en la segunda medición las alturas oscilaron entre 7,65 y 11,37 metros. Del mismo modo, los valores de DAP promedios fueron de 11,45 a 14,74 cm en la primera y segunda medición, respectivamente. En cuanto al V, se observó un incremento general de metros cúbicos, siendo el promedio en la primera medición de 12,43 m<sup>3</sup>, mientras que en la segunda medición fue de 27,91 m<sup>3</sup> en promedio. Por lo tanto, se observó un aumento de 15,48 m<sup>3</sup> en promedio entre la primera y segunda medición respectivamente. Estos cambios indican un crecimiento sustancial en los árboles durante el periodo, lo cual es consistente con el patrón de crecimiento esperado.

**Tabla 13**

*Valores dasométricos promedio correspondientes a la primera y segunda medición en campo*

Estrato	Parcela	Primera medición			Segunda medición			
		Ht (m)	DAP (cm)	V (m <sup>3</sup> /ha)	Parcel a	Ht (m)	DAP (cm)	V (m <sup>3</sup> /ha)
1	1	8,67	11,58	13,2	1	10,72	14,98	28,8
1	2	8,85	11,93	13,7	2	10,90	15,28	29,4
1	3	9,08	12,55	16,8	3	10,98	15,09	35,3
1	4	9,00	12,55	16,3	4	11,37	15,48	35,4
2	5	5,91	9,51	6,8	5	7,65	13,01	18,1
2	6	7,25	10,21	7,5	6	9,22	14,25	21,5
2	7	7,89	12,09	10,5	7	10,12	15,70	22,9
2	8	8,52	11,20	14,6	8	10,29	14,14	31,9

Por otro lado, no se observan diferencias importantes entre las variables dasométricas (DAP, Ht y V) en los distintos estratos de la plantación, esto puede deberse a que ambos sitios o estratos están en el mismo padrón, muy cercanos el uno del otro y la diferencia mayor que presentan es la cercanía al bajo del estrato 2. Los siguientes análisis

estadísticos muestran el resultado de las medias ajustadas para cada uno de los estratos en las diferentes variables dasométricas, a su vez, se puede observar el intervalo con el dato de menor límite de clase (Lower.CL) y el dato de mayor límite de clase (Upper.CL) de cada estrato. Esto permite determinar si estadísticamente existen diferencias significativas entre los estratos y, por lo tanto, entre los tipos de suelo o si no se observan diferencias significativas para las variables dasométricas en la separación de los sitios bajo estudio.

**Tabla 14**

*Análisis de varianza (ANOVA) para el factor volumen (V)*

	<b>Sum Sq</b>	<b>Df</b>	<b>F value</b>	<b>Pr (&gt;F)</b>
<b>(Intercept)</b>	1,05	1	0,0610	0,8078
<b>CD</b>	754,20	2	21,8790	1,518e-05 ***
<b>Sitio</b>	0,00	1	0,0001	0,9920
<b>CD:Sitio</b>	26,25	2	0,7615	0,4814
<b>Residuals</b>	310,24	18		

*Nota.* Códigos de significancia: 0 ‘\*\*\*\*’ 0,001 ‘\*\*\*’ 0,01 ‘\*\*’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘.’ 1 → Indican el nivel de confianza estadística asociado a los valores “p” de los resultados del análisis. Ejemplo: ‘\*\*\*\*’ 0,001 indica un nivel extremadamente alto de significancia, donde el valor “p” es muy bajo (menor a 0,001) y por lo tanto sugiere una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula. Mientras más asteriscos haya, mayor es la significancia estadística del resultado.

En el análisis de varianza para el factor V (Tabla 14), se observa que entre las tres clases diamétricas presentadas hay diferencia significativa en el V (1,518e-05 \*\*\*); el p-valor del sitio o estrato de la plantación es mayor al nivel de significancia y por lo tanto, estadísticamente no hay diferencias significativas en el volumen entre estratos (0,9920); la interacción Clase Diamétrica y Sitio (CD:Sitio), tampoco tiene una diferencia significativa (0,4814) y por lo tanto no hay evidencia para afirmar que hay una interacción entre las clases diamétricas y el sitio para el factor V.

**Tabla 15***Análisis de varianza (ANOVA) para el factor altura (Ht)*

	<b>F value</b>	<b>Df</b>	<b>Df. Res</b>	<b>Pr (&gt;F)</b>
<b>(Intercept)</b>	32,1675	1	1069,99	1,819e-08 ***
<b>Sitio</b>	0,4320	1	1070,84	0,5111
<b>AñoMed</b>	114,3166	1	381,02	2,2e-16 ***
<b>Sitio:AñoMed</b>	0,8545	1	381,01	0,3559

*Nota.* Códigos de significancia: 0 ‘\*\*\*\*’ 0,001 ‘\*\*\*’ 0,01 ‘\*\*’ 0,05 ‘.’ 0.1 ‘.’ 1 → Indican el nivel de confianza estadística asociado a los valores “p” de los resultados del análisis. Ejemplo: ‘\*\*\*’ 0,001 indica un nivel extremadamente alto de significancia, donde el valor “p” es muy bajo (menor a 0,001) y por lo tanto sugiere una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula. Mientras más asteriscos haya, mayor es la significancia estadística del resultado.

Para el factor Ht (Tabla 15), se realizó un análisis de varianza contemplando los diferentes estratos o sitios, el año de medición y la interacción entre sitio y año de medición. Se observa que para los diferentes años si hubo una diferencia significativa en el crecimiento en Ht (2,2e-16 \*\*\*), lo cual es esperable, mientras que para el sitio y la interacción “Sitio:AñoMedición” (0,5111 y 0,3559 valores de p-valor respectivos) no hubo diferencias significativas y por lo tanto, no se puede afirmar que estos parámetros afecten la Ht de crecimiento de los árboles.

**Tabla 16***Análisis de varianza (ANOVA) para el factor DAP*

	<b>F value</b>	<b>Df</b>	<b>Df. Res</b>	<b>Pr (&gt;F)</b>
<b>(Intercept)</b>	242,5147	1	70,95	2,2e-16 ***
<b>Sitio</b>	1,4305	1	72,13	0,2356
<b>AñoMed</b>	52,2437	1	380,09	2,71e-12 ***
<b>Sitio:AñoMed</b>	0,1704	1	380,06	0,6800

*Nota.* Códigos de significancia: 0 ‘\*\*\*\*’ 0,001 ‘\*\*\*’ 0,01 ‘\*\*’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘.’ 1 → Indican el nivel de confianza estadística asociado a los valores “p” de los resultados del análisis. Ejemplo: ‘\*\*\*\*’ 0,001 indica un nivel extremadamente alto de significancia, donde el valor “p” es muy bajo (menor a 0,001) y por lo tanto sugiere una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula. Mientras más asteriscos haya, mayor es la significancia estadística del resultado.

Se observa en la Tabla 16 que la única variable que tiene diferencia significativa en el factor DAP es el año de la medición (2,71e-12\*\*\*). El sitio y la interacción “Sitio:AñoMed” no tienen estadísticamente diferencia (0,2356 y 0,6800 p-valor correspondientes) y por lo tanto, no hay evidencia suficiente para afirmar que estas dos variables puedan estar afectando diferencialmente el crecimiento en diámetro de los árboles.

**Tabla 17***Medias ajustadas para el factor volumen de los estratos en la primera medición*

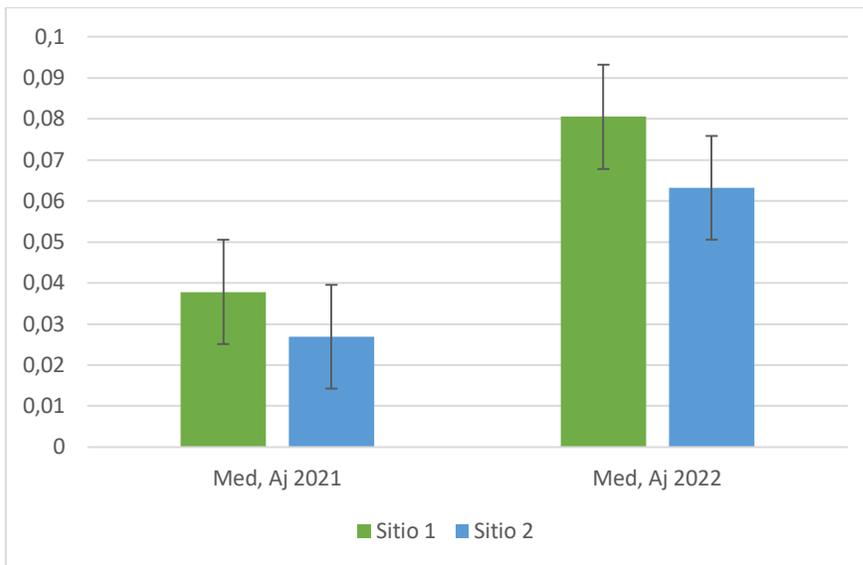
<b>Sitio</b>	<b>Emmean</b>	<b>SE</b>	<b>Df</b>	<b>Lower.CL</b>	<b>Upper.CL</b>	<b>Group</b>
<b>2</b>	0,0269	0,0127	489	0,00191	0,0518	A
<b>1</b>	0,0378	0,0127	485	0,01292	0,0627	A

**Tabla 18***Medias ajustadas para el factor volumen (V) de los estratos en la segunda medición*

<b>Sitio</b>	<b>Emmean</b>	<b>SE</b>	<b>Df</b>	<b>Lower.CL</b>	<b>Upper.CL</b>	<b>Group</b>
<b>2</b>	0,0632	0,0127	488	0,03822	0,0881	A
<b>1</b>	0,0805	0,0127	485	0,05564	0,1054	A

**Figura 18**

*Medias ajustadas para la variable volumen (V) por sitio y por año*



A partir de esta prueba estadística realizada para el V, se observa que la media para cada uno de los estratos no presenta diferencia significativa y, por lo tanto, estadísticamente no es posible observar diferencias para el factor V en los diferentes estratos. Esto está representado en la última columna en la cual se observa la misma letra “A” para ambos sitios. De todas formas, es importante recalcar que, si bien estadísticamente no hay diferencias significativas, gracias a la Figura 18 es posible observar que hay una diferencia en cada uno de los años y que el Sitio 2 es el que obtiene menor volumen.

**Tabla 18**

*Medias ajustadas de la altura (Ht) de los árboles por estrato en la primera medición*

Sitio	Emmean	SE	Df	Lower.CL	Upper.CL	Group
2	7,19	1,52	1072	4,21	10,2	A
1	8,60	1,52	1070	5,62	11,6	A

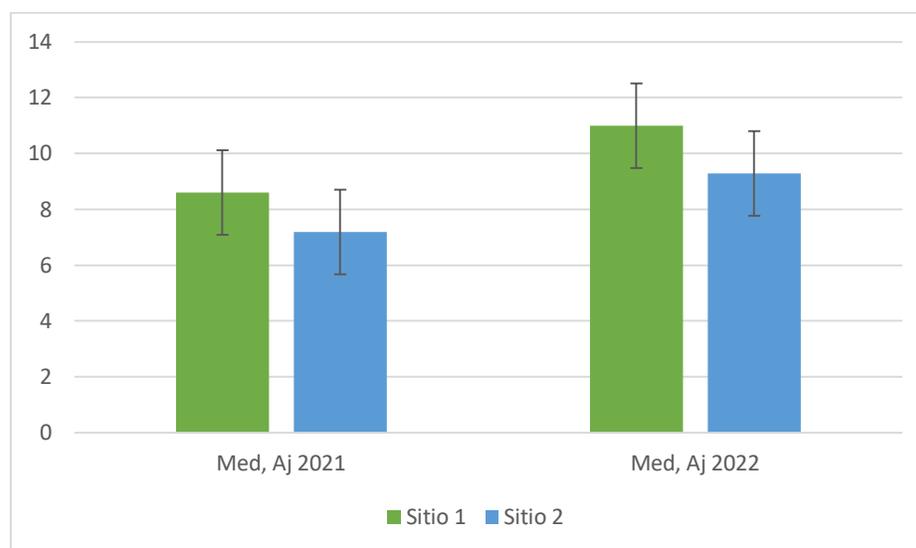
**Tabla 19**

*Medias ajustadas de la altura (Ht) de los árboles por estrato en la segunda medición*

Sitio	Emmean	SE	Df	Lower.CL	Upper.CL	Group
2	9,29	1,52	1072	6,31	12,3	A
1	11,00	1,52	1070	8,02	14,0	A

**Figura 19**

*Medias ajustadas para la variable altura por sitio y por año*



Al igual que en el factor V, se observa que, para la Ht de los árboles, en ambas mediciones (la primera en el año 2021 y la segunda en el año 2022) no hubo diferencias significativas en el crecimiento y, por lo tanto, estadísticamente no hay diferencia entre estratos para el factor Ht de crecimiento de los árboles, representado en la última columna por la misma letra “A”. A su vez, se procedió a presentarlo de manera gráfica (Figura 19) y se puede observar el comportamiento de la misma manera que el V, siendo el Sitio 2 el que presenta los árboles con menor Ht.

**Tabla 20**

*Medias ajustadas para el factor DAP en los diferentes estratos para la primera medición*

Sitio	Emmean	SE	Df	Lower.CL	Upper.CL	Group
2	10,4	0,756	73,3	8,88	11,9	A
1	11,7	0,749	71,0	10,16	13,1	A

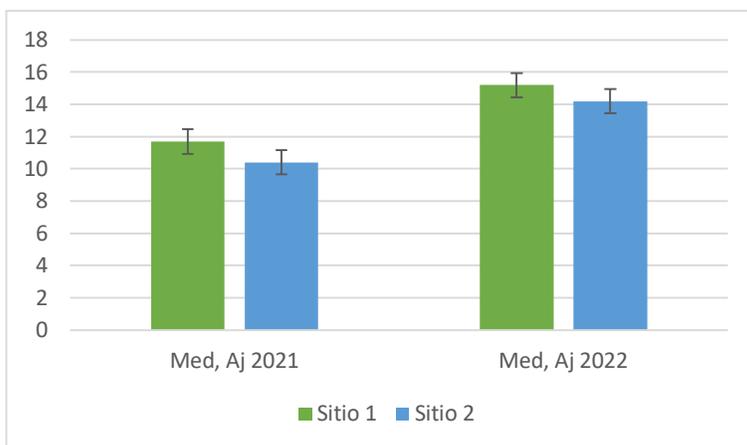
**Tabla 21**

*Medias ajustadas para el factor DAP en los diferentes estratos para la segunda medición*

Sitio	Emmean	SE	Df	Lower.CL	Upper.CL	Group
2	14,2	0,755	73,0	12,73	15,7	A
1	15,2	0,748	70,7	13,72	16,7	A

**Figura 20**

*Medias ajustadas para la variable DAP por sitio y por año*



En la prueba estadística para la variable DAP se observan los mismos resultados, no se encontraron diferencias significativas en el DAP entre estratos. Como es de esperarse también, el Sitio 2 es el que presenta los árboles con menor DAP, aunque se observa que la diferencia entre Sitios es menor que en las variables de V y Ht.

A continuación, se presentan los resultados del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) calculados para la plantación (Tabla 23):

**Tabla 22**

*Valores promedio de IMA ( $m^3/ha/año$ ) e ICA ( $m^3/ha/año$ )*

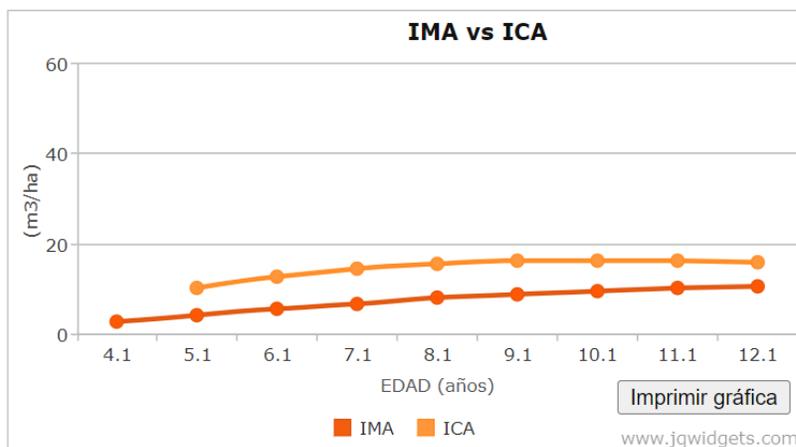
<b>Fecha</b>	<b>10/7/21</b>	<b>5/11/22</b>
<b>IMA</b>	3,24	5,40
<b>ICA</b>	-	11,61

Los valores de IMA e ICA obtenidos se sitúan dentro del rango de valores previstos por la simulación del Sistema de Apoyo a la Gestión de INIA (2015). Los resultados proyectan que, al alcanzar la edad calculada por la simulación, se lograrán valores de IMA de 3,2 y 5,0, respectivamente, mientras que el valor de ICA predicho para la edad del rodal en la segunda medición es de 12,0 (ANEXO Figura A2).

La Figura 21 muestra el crecimiento esperado del IMA e ICA para el rodal en estudio hasta el año de cosecha, según las predicciones del Sistema de Apoyo a la Gestión de INIA. Se observa un crecimiento continuo del rodal hasta el año de la cosecha, con una estimación de alcanzar un IMA de aproximadamente 12,4  $m^3/ha$  y un ICA de 17,7  $m^3/ha$ . Estos valores reflejan el potencial de crecimiento y la calidad del rodal en función de las condiciones simuladas.

**Figura 21**

*Valores proyectados para el crecimiento del IMA e ICA*



*Nota.* Obtenido a partir del software SAG (INIA, 2015).

## 7.2 Resultados de laboratorio

A continuación, se presentan los resultados de Carbono obtenido en laboratorio, a partir de las muestras extraídas. La Tabla 24 muestra el carbono total retenido en la biomasa forestal para cada parcela expresado en toneladas de Carbono y CO<sub>2e</sub> por hectárea, respectivamente. Cabe destacar que para el cálculo se tuvo en cuenta la biomasa representada por el fuste de los árboles y también la correspondiente a las ramas. El total de CO<sub>2e</sub> promedio fue de 25,67 Tn/ha; el 85% del valor se concentró en el fuste de los árboles y el 15% restante a las ramas.

**Tabla 23***Carbono total en Tn/ha y CO<sub>2e</sub> retenido por la masa forestal*

<b>Parcela</b>	<b>Carbono Tn/ha</b>	<b>CO<sub>2e</sub> Tn/ha</b>
<b>1</b>	6,98	25,61
<b>2</b>	7,06	25,92
<b>3</b>	9,61	35,28
<b>4</b>	8,33	30,57
<b>5</b>	4,64	17,03
<b>6</b>	6,67	24,48
<b>7</b>	5,59	20,50
<b>8</b>	7,08	25,98
<b>Promedio</b>	<b>6,99</b>	<b>25,67</b>
<b>Total</b>	<b>55,96</b>	<b>205,37</b>

**Tabla 24***Análisis de varianza para CO<sub>2e</sub> fijado en la masa forestal*

	<b>Sum Sq</b>	<b>Df</b>	<b>F value</b>	<b>Pr (&gt;F)</b>
<b>(Intercept)</b>	0,71	1	0,0756	0,7865
<b>CD</b>	425,28	2	22,7682	1,176e-05 ***
<b>Sitio</b>	0,01	1	0,0015	0,9700
<b>CD:Sitio</b>	17,55	2	0,9395	0,4092
<b>Residuals</b>	168,11	18		

*Nota.* Códigos de significancia: 0 ‘\*\*\*\*’ 0,001 ‘\*\*\*’ 0,01 ‘\*’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘ ’ 1 → Indican el nivel de confianza estadística asociado a los valores “p” de los resultados del análisis. Ejemplo: ‘\*\*\*\*’ 0,001 indica un nivel extremadamente alto de significancia, donde el valor “p” es muy bajo (menor a 0,001) y por lo tanto sugiere una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula. Mientras más asteriscos haya, mayor es la significancia estadística del resultado.

Como se observa en el análisis de varianza realizado para las clases diamétricas (Tabla 25), el sitio y la interacción CD:Sitio, se ha obtenido diferencia significativa

únicamente entre las clases diamétricas, esto es debido a que las diferencias que presentan cada clase en cuanto a tamaño, diámetro y demás, permite retener más o menos carbono. Por otro lado, no se encontró evidencia estadística para afirmar que la diferencia entre retención de carbono para las parcelas se deba al sitio o a la interacción CD:Sitio, debido a que el p-valor obtenido (0,9700 y 0,4092 respectivamente) es mayor al nivel de significancia utilizado (0,05).

Si bien estos resultados no muestran que haya una diferencia significativa entre los sitios, es pertinente analizar que, dentro de cada parcela si hay diferencias importantes en retención de carbono. En la Tabla 24 se observa que la parcela 5 fue la que menos carbono retuvo en su masa forestal (4,64 Tn/ha) y la parcela que más retuvo fue la 3 (9,61 Tn/ha) con una diferencia entre cada una de 4,97 toneladas.

**Tabla 25**

*Medias ajustadas para el CO<sub>2e</sub> en cada clase diamétrica*

CD	Emmean	SE	Df	Lower.CL	Upper.CL	Group
1	0,379	1,08	18	-1,89	2,65	A
3	7,294	1,08	18	5,02	9,56	B
2	13,686	1,08	18	11,42	15,96	C

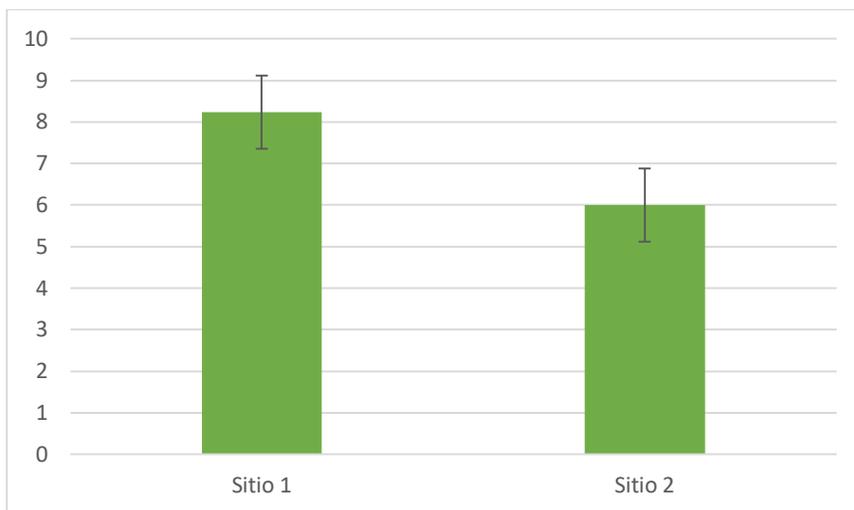
**Tabla 26**

*Medias ajustadas para el CO<sub>2e</sub> en los diferentes estratos de la plantación*

Sitio	Emmean	SE	Df	Lower.CL	Upper.CL	Group
2	6,00	0,882	18	4,15	7,86	A
1	8,23	0,882	18	6,38	10,09	A

## Figura 22

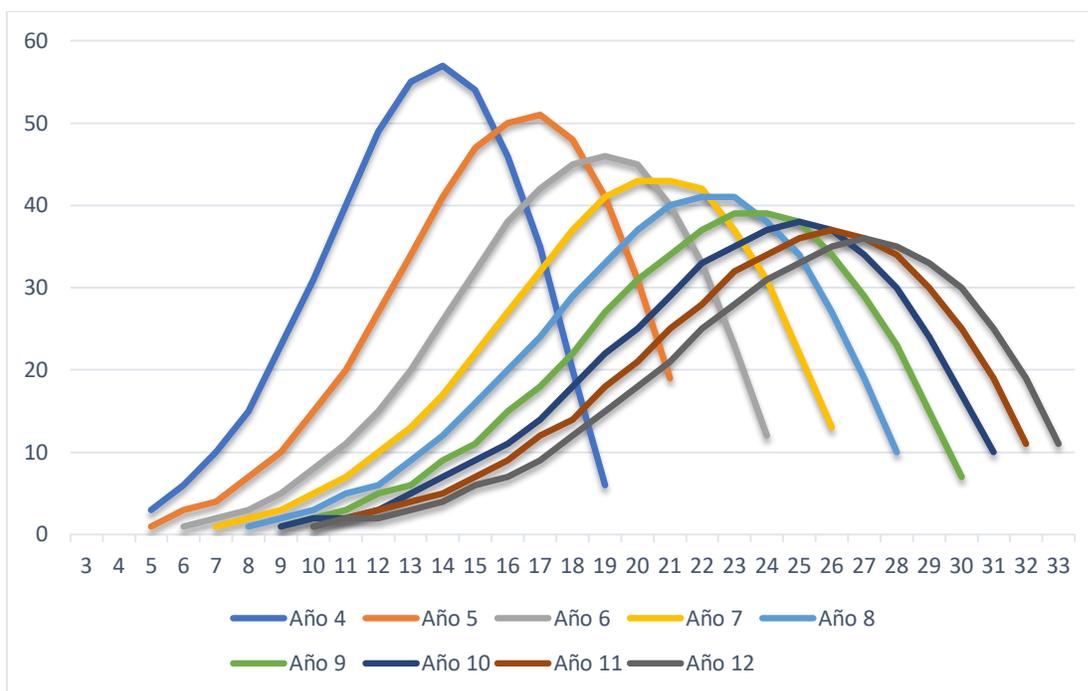
*Medias ajustadas para el factor CO<sub>2</sub>e en cada sitio*



En cuanto a estos resultados de los análisis realizados, surge que hay diferencias estadísticamente significativas para afirmar que la CD 1 es la que menos carbono fija, seguido por la CD 3; la CD 2 también presenta diferencias con respecto a las otras CD, siendo la de mayor fijación de carbono. Esto se atribuye a que la CD 2 es la que tiene mayor volumen total dentro de las parcelas, ya que la mayoría de los árboles de cada parcela pertenecen a esta CD.

Por otro lado, en la Tabla 27 está representada la fijación de carbono por cada uno de los sitios o estratos forestales. El análisis muestra que no hay diferencias significativas (representado por las mismas letras “A”), a pesar de que los valores promedio son diferentes, siendo superior la fijación por parte del sitio 1, como se observa en la Figura 22.

La Figura 23 ilustra la distribución diamétrica interanual hasta el año de la cosecha; los datos se obtuvieron de la proyección realizada en el SAG (INIA, 2015) (ANEXO Figura A2). Como se observa, la mayoría de los árboles se encuentran dentro de la CD 2 (10,4 – 18,0 cm de DAP) para el año en el que se realizó la segunda medición (año 5 de la plantación). A su vez, se puede observar el comportamiento esperado para los siguientes años de la plantación, en los cuales se puede estimar que la mayoría de los árboles se encontraran en potenciales rangos de CD 2, ya que el comportamiento de la distribución para cada año es similar.

**Figura 23***Distribución diamétrica interanual de la plantación (año 4-12)***Tabla 27***Estimación de las emisiones CO<sub>2e</sub> 2018-2022*

Categoría	Nº de animales	Emisiones totales	Total Tn
		Tn CO <sub>2e</sub> /año	CO <sub>2e</sub> /ha/año
<b>Toro</b>	29	100,79	0,03
<b>Vaca de cría</b>	968	2.645,28	0,81
<b>Ternera</b>	478	1.045,94	0,32
<b>Ternero</b>	478	1.045,94	0,32
<b>Vaquillona 1-2</b>	472	1.920,75	0,59
<b>Vaquillona &gt;2</b>	365	1.563,06	0,48
<b>Novillo 1-2</b>	462	1.392,07	0,42
<b>Novillo 2-3</b>	372	1.640,39	0,50
<b>Novillo &gt;3</b>	31	128,86	0,04
<b>Vaca refugo</b>	55	96,43	0,03
<b>Total</b>	<b>3.709</b>	<b>11.579,53</b>	<b>3,53</b>

En cuanto a la estimación de la emisión generada por parte de la actividad ganadera en todo el predio, se presenta la Tabla 28 donde se observa el promedio de animales de cada categoría y las Tn de CO<sub>2e</sub> generado por categoría animal. De esta manera es posible estimar el promedio de GEI emitido en la totalidad del predio, el cual asciende a un total de 3,53 Tn CO<sub>2e</sub>/ha/año. Se puede observar que la categoría que tiene mayor emisión total corresponde a las vacas de cría, esto es debido a que es un predio de ciclo completo, y, por lo tanto, con una cantidad de vacas de cría considerable para poder abastecer toda la superficie ganadera. Por otro lado, en términos de porcentaje las vaquillonas y los novillos son los que tienen mayores emisiones en comparación con las otras categorías.

**Tabla 28**

*CO<sub>2e</sub> fijado por biomasa forestal, emitido por el ganado y balance anual*

<b>Año</b>	<b>Fijado (Tn CO<sub>2e</sub>/ha/año)</b>	<b>Emitido (Tn CO<sub>2e</sub>/ha/año)</b>	<b>Balance (Tn CO<sub>2e</sub>/ha/año)</b>
<b>2018</b>	1,5	2,6	-1,1
<b>2019</b>	3,0	4,0	-1,0
<b>2020</b>	7,1	4,1	3,0
<b>2021</b>	14,9	3,3	11,6
<b>2022</b>	25,6	3,6	22,0
<b>Promedio</b>	<b>10,4</b>	<b>3,5</b>	<b>6,9</b>

**Tabla 29**

*CO<sub>2e</sub> fijado, emitido y balance en el predio del año 2022*

<b>Año</b>	<b>Fijado Tn CO<sub>2e</sub>/año</b>	<b>Emitido Tn CO<sub>2e</sub>/año</b>	<b>Balance Tn CO<sub>2e</sub></b>
<b>2022</b>	835	11.943	-11.108

En la Tabla 29 se observa el balance de carbono realizado por hectárea. Se puede observar que hay una variación en los resultados finales para cada año, y esto es debido a que a medida que pasan los años, la plantación forestal genera más biomasa, fijando cada vez valores mayores de CO<sub>2e</sub>. Para el año 2018 y 2019 se observa un balance de carbono negativo, esto se explica porque las emisiones debido a la ganadería son mayores que lo que la

plantación es capaz de fijar por hectárea. Por lo tanto, el año 2 y 3 de la plantación no llega a compensar las emisiones debido a la ganadería. En los siguientes años, a partir del año 4 de la plantación, se observa un balance positivo, donde la plantación forestal fija más carbono que lo emitido por la ganadería. Por otro lado, si se realiza un balance para la totalidad de la superficie del predio, se puede observar en la Tabla 30 que da un valor negativo (-11.108 Tn CO<sub>2e</sub>). Esto indica que en la extensión total del predio (3.281 hectáreas) el sistema silvopastoril de 28,31 hectáreas no llega a compensar lo emitido de carbono por la actividad ganadera. Tomando el promedio de lo emitido por la ganadería y lo fijado por la forestación, cada hectárea forestada, puede compensar el equivalente a 3,2 ha de ganadería.

### 7.3 Resultados financieros

En esta sección se presentan los resultados económicos obtenidos del proyecto descrito. Se tomaron en cuenta todos los costos correspondientes a la instalación del monte, los egresos del mismo junto con la inversión inicial y los ingresos que se espera obtener en la vida útil del proyecto. Se resalta que, para facilitar la comprensión de los valores, estos están expresados en las tablas en dólares/ha, mientras que en el análisis posterior de cada tabla se expresa el resultado en la totalidad del sistema silvopastoril (dólares totales) para tener un análisis completo de los resultados.

El sistema silvopastoril de 28,31 ha se estima en una inversión inicial total de 119.950 U\$\$ al año 0 para poder llevar a cabo el proyecto (ANEXO Tabla A3). Esta inversión se divide en la compra de la tierra necesaria para la instalación del monte (105.426 U\$\$) y la parte correspondiente propiamente a la instalación del monte (14.523 U\$).

**Tabla 30**

*Inversión en tierra e instalación del monte expresado en U\$\$/ha*

<b>Año</b>	<b>0</b>
<b>Tierra</b>	3.724
<b>Monte</b>	513
<b>Inversión total</b>	4.237

Los egresos del proyecto se componen principalmente de las partidas en efectivo de dinero necesarias para llevar a cabo dicho proyecto. En el sistema silvopastoril en estudio,

como se dijo anteriormente debido a la especie utilizada y el destino principal de la madera, no son necesarios los tratamientos silvícolas que incluyen poda y raleo, siendo estos los gastos más altos generalmente dentro de las plantaciones forestales. Por lo tanto, dentro de nuestro estudio las principales partidas corresponden a las tasas impositivas y la administración necesaria las cuales se estimaron en un fijo anual que asciende a la suma total de 368 U\$S anuales en la totalidad del sistema silvopastoril (ANEXO Tabla A4). Luego, las otras salidas en efectivo puestas en el flujo corresponden al costo por la cosecha y flete de la madera hacia la planta las cuales se realizan en el último año del proyecto, en nuestro estudio correspondería al año 12 (Tabla 32). En el ANEXO Tabla A4 se puede observar que el valor en dólares totales para la cosecha será de 63.698 U\$S para la extensión de todo el sistema silvopastoril y la correspondiente al flete ascendería a un valor de 46.881 U\$S.

**Tabla 31**

*Egresos en la vida útil del proyecto expresados en U\$S/ha*

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Impuestos</b>	–	13	13	13	13	13	13
<b>Administración</b>							
<b>Cosecha</b>							
<b>Flete</b>							
<b>Egresos totales</b>		13	13	13	13	13	13
<b>Año</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
<b>Impuestos</b>	– 13	13	13	13	13	13	
<b>Administración</b>							
<b>Cosecha</b>							2.250
<b>Flete</b>							1.656
<b>Egresos totales</b>	13	13	13	13	13	13	3.919

Por otro lado, los ingresos del flujo de fondos están compuestos anualmente por una renta ganadera producto del pastoreo en los callejones del sistema silvopastoril, junto con la venta de la madera al año 12 (cuando el monte está listo para ser cosechado). A su vez, en

este estudio se agregó el ingreso por los créditos de carbono, en base a los valores brindados por el Ing. Agr. Agustín Inthamoussu (comunicación personal, 2022).

Se tomó un precio de 25 U\$\$/bono, es decir, por Tn CO<sub>2e</sub> producido, por lo que se asume que se logra una ganancia de 450 U\$\$/ha a pagar al final de la rotación debido a los bonos de carbono producidos (Tabla 33). Se puede observar en la Tabla A5 de ANEXO que al año 12 se obtendrá potencialmente una ganancia de 12.740 U\$\$ en las 28,31 hectáreas del sistema silvopastoril producto de los créditos de carbono. Cabe destacar que en esta plantación los bonos de carbono no calificarían actualmente para poder venderse como tales, debido a que es una rotación corta y de poca extensión. De todas formas, se considera información relevante debido a que orienta sobre la importancia de la generación de estos sistemas de interacción para contrarrestar GEI y a su vez, la potencialidad que tienen estos sistemas como sumidero de carbono.

**Tabla 32**

*Ingresos en la vida útil del proyecto expresados en U\$\$/ha*

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Renta ganadera</b>				84	84	84	84
<b>Bonos de carbono</b>							
<b>Venta madera pulpa</b>							
<b>Valor salvamento tierra</b>							
<b>Ingresos totales</b>	0	0	0	84	84	84	84
<b>Año</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
<b>Renta ganadera</b>	84	84	84	84	84	84	
<b>Bonos de carbono</b>							450
<b>Venta madera pulpa</b>							8.100
<b>Valor salvamento tierra</b>							3.724
<b>Ingresos totales</b>	84	84	84	84	84		12.358

En última instancia se realizaron los siguientes Flujos Netos de Caja, teniendo en cuenta la inversión, egresos e ingresos totales del proyecto, para luego poder estimar los indicadores financieros de interés (VAN y TIR).

Para poder evaluar el efecto de la madera, la ganadería y por otro lado los potenciales créditos de carbono generados, se realizaron tres Flujos Netos de Caja distribuidos de la siguiente manera: Flujo Neto de Caja 1 correspondiendo únicamente a la venta de madera (Tabla 34); Flujo Neto de Caja 2 correspondiendo a la venta de madera y la renta generada por la ganadería (Tabla 36); Flujo Neto de Caja 3 correspondiendo a la venta de madera, la renta generada por la ganadería y los potenciales ingresos por la venta de créditos de carbono generados (Tabla 38). Cabe aclarar que, como se comentó anteriormente, más allá del análisis de sensibilidad que se realizó para los indicadores financieros evaluados, en los Flujos Netos de Caja se utilizó el precio de venta de madera más esperado que corresponde a 54 U\$S/m<sup>3</sup> puesto en planta.

**Tabla 33**

*Flujo Neto de Caja 1 expresado en U\$S totales*

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>FNC</b>	-119.949	-368	-368	-368	-368	-368	-368
<b>Año</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
<b>FNC</b>	-368	-368	-368	-368	-368	223.791	

**Tabla 34**

*Indicadores financieros para diferentes precios de venta en Flujo Neto de Caja 1*

<b>Precio de venta</b> <b>(U\$S/m<sup>3</sup>)</b>	<b>VAN (5%)</b>	<b>VAN (6%)</b>	<b>VAN (7%)</b>	<b>TIR</b>
49,1	-9.978	-21.975	-32.582	4,3%
54	1.608	-11.635	-23.343	5,1%
59,4	14.377	-239	-13.161	6,0%

La Tabla 35 muestra diferentes escenarios de los indicadores financieros derivados únicamente de posibles variaciones en los precios de venta de la madera. Con un precio de

venta de 49,1 U\$\$/m<sup>3</sup>, nunca se alcanzan valores positivos de Valor Actual Neto (VAN), lo que sugiere que el proyecto no cumple con la tasa de interés esperada. Por ejemplo, el VAN (5%) para este precio indica que se necesitará una ganancia adicional de 9.978 U\$\$ en el proyecto para alcanzar el punto de equilibrio, y montos superiores para generar retornos positivos. En contraste, con una venta de madera de 54 U\$\$/m<sup>3</sup>, el VAN (5%) sería positivo, lo que sugiere que el proyecto supera la tasa de interés evaluada. Finalmente, con un precio de venta de 59,4 U\$\$/m<sup>3</sup>, los escenarios serían aún más favorables, ofreciendo mayores retornos y una TIR potencial del 6%.

**Tabla 35**

*Flujo Neto de Caja 2 expresado en U\$\$ totales*

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>FNC</b>	-119.949	-368	-368	2010	2010	2010	2010
<b>Año</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
<b>FNC</b>	2010	2010	2010	2010	2010	223.791	

**Tabla 36**

*Indicadores financieros para el Flujo Neto de Caja 2*

<b>Precio de venta</b> <b>(U\$\$/m<sup>3</sup>)</b>	<b>VAN (5%)</b>	<b>VAN (6%)</b>	<b>VAN (7%)</b>	<b>TIR</b>
49,1	5.353	-7.580	-19.049	5,4%
54	16.939	2.760	-9.810	6,2%
59,4	29.708	14.156	370	7%

Se observa en la Tabla 37 los resultados obtenidos de los indicadores financieros para la venta de madera junto con la potencial producción de ganado. Estos resultados muestran que con una venta de madera de 59,4 U\$\$/m<sup>3</sup> se obtendrían VAN positivos para los tres porcentajes de interés (5,6,7) y, por lo tanto, el proyecto rinde por encima de lo esperado, obteniendo así una tasa interna de retorno de 7%.

**Tabla 37***Flujo Neto de Caja 3 expresado en U\$S totales*

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>FNC</b>	-119.949	-368	-368	2010	2010	2010	2010
<b>Año</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
<b>FNC</b>	2010	2010	2010	2010	2010	236.530	

**Tabla 38***Indicadores financieros para el Flujo Neto de Caja 3, con diferentes tasas de descuento*

<b>Precio de venta (U\$S/m<sup>3</sup>)</b>	<b>VAN (5%)</b>	<b>VAN (6%)</b>	<b>VAN (7%)</b>	<b>TIR</b>
49,1	14.603	867	-11.316	6,1%
54	26.190	11.208	-2.077	6,8%
59,4	38.959	22.604	8.104	7,6%

Las tablas 35, 37 y 39 reflejan los indicadores financieros obtenidos por cada Flujo Neto de Caja generado. Como se puede observar, la rentabilidad total del proyecto aumenta a medida que se agrega el ingreso obtenido por la ganadería y más aún, por los futuros créditos de carbono. En el Flujo Neto de Caja 1 se observa que desde el comienzo del proyecto hasta el año 11 hay un flujo neto negativo, debido a que durante la vida útil del proyecto solo se generan egresos y ningún ingreso por parte del mismo hasta que se cumpla el año en el cual se vende la madera cosechada. Esto explica en parte la importancia de la interacción entre los árboles, la pastura y el ganado, ya que como se observa en el Flujo Neto de Caja 2, el ingreso por la ganadería amortigua los egresos generados por la administración y los impuestos, y a su vez, genera un retorno anual el cual pasa a ser muy relevante para el productor por el hecho de generar liquidez por algún imprevisto que pueda surgir. Cabe destacar que los ingresos por la ganadería comienzan a generarse al año 3, porque es el año en el que los árboles ya están suficientemente desarrollados como para que pueda interactuar con los animales sin ser afectados.

## 8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En primera instancia, se observó que los diferentes sitios o estratos propuestos en el estudio no presentan diferencias significativas en las variables dasométricas evaluadas a lo largo de la investigación. A pesar de las diferencias en los estratos en cuanto a topografía y tipo de suelo, se observa que comparten un patrón similar y están ubicados en proximidad uno con el otro, lo cual influye en los resultados, no habiendo diferencias estadísticamente comprobables. Según Schlatter y Gerding (2014), la similitud tanto en la composición vegetal como en la productividad de los sitios se define por combinaciones particulares de factores. Estas combinaciones específicas generan resultados similares, lo que caracteriza a cada sitio identificado en este estudio.

Se puede concluir que, si bien los grupos CONEAT de suelos están estudiados mediante muestras y estudios a lo largo del país, esta investigación sugiere que a pesar de las variaciones en las formaciones geológicas y en la productividad de los suelos descritos por la DGRN (2023) la cercanía de los mismos tiene una influencia grande en el comportamiento de los árboles. Mediante este estudio se sostiene la importancia de realizar análisis y muestras de suelos antes de realizar cualquier actividad agropecuaria y no solo confiar exclusivamente en los análisis y separación de suelos brindada a través de los grupos CONEAT.

Los datos sobre el incremento medio anual (IMA) y el incremento corriente anual (ICA) calculados fueron 3,24 m<sup>3</sup>/ha/año (primera medición, año 2021) y 5,40 m<sup>3</sup>/ha/año (segunda medición, año 2022) para el IMA y 11,61 m<sup>3</sup>/ha para el ICA (en el año 5 de la plantación), mostrando similitudes con los valores proporcionados por el SAG (3,2 m<sup>3</sup>/ha/año y 5,0 m<sup>3</sup>/ha/año para el IMA; 12,0 para el ICA). Sin embargo, es importante reconocer que estos valores dependen de variables como el sitio específico forestal, condiciones suelo-planta-clima al momento de la implantación y condición sanitaria a lo largo del cultivo; estas características pueden hacer variar los rendimientos forestales. Según Balmelli y Resquin (2006) diferentes especies exhiben distintos niveles de crecimiento según el sitio y las condiciones ambientales. Un ejemplo notable de esta variabilidad se observa en *E. dunnii*, donde esta especie tiende a prosperar en terrenos bajos debido a su resistencia a las heladas, por ejemplo, lo que la convierte en una opción más productiva en comparación

con otras especies. Esto sugiere que, los valores observados para esta especie en los sitios representados están dentro de lo esperado.

La distribución de CO<sub>2e</sub> promedio de los resultados obtenidos puede compararse con otros estudios realizados como, por ejemplo, Ramírez López y Chagna Avila (2019) los cuales determinaron una distribución de biomasa aérea similar a la de nuestro estudio: 85% en fuste y 15% en ramas. A su vez, en ese mismo estudio mencionan una tendencia análoga presentada en el trabajo de Ribeiro et al. (2015) como se cita en Ramírez López y Chagna Avila (2019), quienes tuvieron un 82% de biomasa aérea concentrada en el fuste, 8% en la corteza, 7% en las ramas y 3% en las hojas.

Por otro lado, el promedio de 25,67 Tn/ha de CO<sub>2e</sub> obtenido (Tabla 24) se acerca al valor del Sistema de Apoyo a la Gestión de INIA (2015) (ANEXO Figura A2), que, según las proyecciones realizadas, al año de la segunda medición se esperaba obtener 34,9 Tn/ha de CO<sub>2e</sub>. Si bien en nuestros resultados se obtiene un valor menor al esperado por este sistema, también es importante recalcar que son estimaciones y mientras las variaciones no sean muy grandes, se pueden utilizar para comparar los sistemas y evaluar si los datos obtenidos son los más representativos posible.

El porcentaje de carbono en la masa forestal (ANEXO Tabla A3) calculado en el laboratorio fue en promedio de 45,33%, este valor se encuentra dentro del rango utilizado en el trabajo de Mohan Kumar y Nair (2011) donde mencionan que la cantidad de carbono en la biomasa leñosa es de 40% y 50% para plantaciones forestales. Sin embargo, es crucial reconocer que este valor puede variar según diversos factores, como la especie del árbol, el tipo de suelo y las condiciones climáticas que se generen. La sobreestimación de la capacidad de fijar carbono en la biomasa forestal puede surgir de la discrepancia entre lo asumido y lo real en cuanto al contenido de carbono. Es importante destacar que los autores advierten sobre el peligro de asumir automáticamente que un 50% de la biomasa sea carbono, ya que este valor tiende a ser un poco menor en la realidad. Los resultados obtenidos en nuestra investigación respaldan esta noción, ya que se encontró en nuestro estudio un porcentaje de carbono en la biomasa forestal promedio de 45,33%. Según nuestros resultados, existen escasos registros bibliográficos a nivel regional del cálculo del porcentaje de carbono en la biomasa forestal, lo que dificulta la comparación entre estudios y limita la comprensión de la variabilidad en la capacidad de fijación de carbono en las plantaciones forestales.

En el mismo sentido, este estudio demuestra que los árboles con clases diamétricas medias y superiores desempeñan un papel fundamental en lo que es la captura de carbono en los sistemas silvopastoriles. Sin embargo, no se encontraron parámetros específicos que vinculen el diámetro de los árboles con la captura de carbono. La CD central que abarca un rango de 10,4 – 18,0 cm de DAP fue la que acumuló más carbono en el estudio porque la mayoría de los árboles en las parcelas se encontraban dentro de la misma, y, por ende, es la CD con mayor volumen acumulado.

Al analizar los resultados económicos obtenidos en nuestro estudio en comparación con los antecedentes bibliográficos, se observa que el rendimiento más esperado del sistema silvopastoril bajo estudio (TIR 6,2%) queda considerablemente por debajo de las proyecciones planteadas por otros autores. Por ejemplo, Lacorte et al. (2016) reportaron una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 34,5%, mientras que estudios previos de autores como Cubbage et al. (2014), Boscana et al. (2023), y Balestíe González et al. (2022) evidencian rentabilidades en el rango del 7% al 14%, que, si bien se ajustan más a nuestros resultados, aun se sitúan por encima de ellos.

Estas disparidades pueden atribuirse a varios factores, siendo los más significativos la utilización de especies diferentes en los estudios comparativos y el destino principal de la madera. A lo largo de nuestro informe, hemos encontrado escasa información sobre la especie *Eucalyptus dunnii*, lo cual limita la precisión de nuestras comparaciones. Además, es importante considerar que los estudios de referencia emplean especies como *Eucalyptus grandis*, con destinos específicos de madera estructural y, por lo tanto, con ciclos de crecimiento más prolongados, lo que naturalmente conlleva a una mayor rentabilidad en la venta final de la madera.

Esta investigación ha tenido ciertas limitaciones en cuanto al cálculo del CO<sub>2e</sub> fijado por el sistema silvopastoril utilizado en el balance de carbono. Esto se debe a que se empleó un valor estimado por las proyecciones del SAG (INIA, 2015), ya que solo fue posible obtener los datos necesarios en el laboratorio para el año 2022. Haber tenido acceso a datos reales de CO<sub>2e</sub> habría enriquecido considerablemente la investigación, permitiendo un análisis más completo y preciso. Además, habría contribuido a una comprensión más profunda a nivel global sobre el comportamiento de esta especie en los sistemas silvopastoriles.

Los hallazgos y la redacción de este informe se consideran altamente relevante tanto a nivel nacional como global. Se han explorado numerosos aspectos que aún no han sido estudiados a fondo en relación con el *Eucalyptus dunnii* en sistemas silvopastoriles. Este trabajo aborda temas de gran importancia para investigadores, productores, empresarios y autoridades gubernamentales, incluyendo el comportamiento ambiental y económico-financiero de dichos sistemas. Es decir, como pueden impactar tanto en la económica como en la sostenibilidad de los ecosistemas.

## 9. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la viabilidad económica y financiera, así como la sustentabilidad de una plantación de *Eucalyptus dunnii* en baja densidad en un sistema silvopastoril con destino final para producción de pulpa de celulosa. Tras finalizar la investigación, se ha llegado a la conclusión de que, aunque las rentabilidades obtenidas se sitúan por debajo de las cifras reportadas en otros estudios, el sistema analizado genera una rentabilidad apropiada, la cual podría resultar atractiva para los productores que se quieran volcar a este sistema. Por un lado, el sistema se muestra económicamente y financieramente viable; por otro lado, los resultados indican que el sistema resulta en un balance anual de carbono positivo de fijación respecto a las emisiones ganaderas y, por ende, el contenido de carbono secuestrado en la biomasa aérea de *E. dunnii* mostró el potencial como sumidero de carbono de la especie. Por consiguiente, se desestiman las hipótesis planteadas inicialmente en el trabajo.

En base a una especie poco utilizada y estudiada a nivel global, este estudio deriva en información de interés sobre el potencial de los sistemas silvopastoriles para ser incluidos en la producción ganadera y servir para la provisión de servicios productivos y ecosistémicos. Estos resultados ofrecen información valiosa a los efectos de diseñar manejos silvícolas que busquen optimizar la obtención de productos forestales y el beneficio ambiental que la forestación aporta a la ganadería.

Además de proporcionar datos sobre los beneficios económicos y financieros, el estudio resalta la importancia de los valores obtenidos sobre el CO<sub>2</sub>e. Estos valores no solo pueden ser empleados en proyectos de venta de carbono, sino que también abren la puerta para reconocer estos sistemas como productores de carne con bajas emisiones o carbono neutro. Este reconocimiento promueve prácticas más sostenibles en la ganadería y a su vez, contribuye a la mitigación del cambio climático a nivel global.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2024, 5 de marzo). *Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero: Cálculos y referencias*.  
<https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos>
- Álvarez, J., & Falcao, O. (Eds.). (2009). *Manual de gestión de empresas agropecuarias* (2ª ed.). Universidad de la República.
- Balestíe González, M. B., Rachetti Ximenez, A. I., & Reggiardo Di Lascio, C. (2022). *Evaluación económica productiva de un sistema de Eucalyptus grandis en dos intensidades de raleo en la zona centro sur de Uruguay* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.  
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/42223/5/Balesti%203%20Mar%203%20adaBel%203%20a9n.pdf>
- Balmelli, G., & Resquin, F. (2006). 30 años de investigación en suelos de areniscas INIA Tacuarembó. En M. Bemhaja & O. Pittaluga (Eds.), *Productividad de diferentes especies de Eucalyptus sobre areniscas de Tacuarembó-Rivera* (pp. 305-312). INIA.
- Barnes, B. V., Zak, R. D., Denton, R. S., & Spurr, H. S. (1998). *Forest ecology* (4<sup>th</sup> ed.). Wiley.
- Barreiro, M., Arizmendi, F., & Trinchin, R. (2019). *Variabilidad observada del clima en Uruguay*. Universidad de la República; MVOTMA; AECID.
- Barros, S. (2012). El género Eucalyptus. *Ciencia e Investigación Forestal*, 18(3), 75-100.  
<https://doi.org/10.52904/0718-4646.2012.395>
- Boland, D. J., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnston, R. D., Kleinig, D. A., & Turner, J. D. (2006). *Forest trees of australia* (5<sup>th</sup> ed.). CSIRO.
- Boscana, M., & Arriaga, M. E. (2021). *Tercer encuesta de servicios forestales*. MGAP.  
[https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Informe%20final\\_3era\\_encuesta\\_2021.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Informe%20final_3era_encuesta_2021.pdf)

- Boscana, M., Bussoni, A., & Bentancur, O. (2023). Wood production and financial return in two silvopastoral systems. *Agrociencia (Uruguay)*, 27, Artículo e793.  
<https://doi.org/10.31285/AGRO.27.793>
- Brussa, C. A. (1994). *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Hemisferio Sur.
- Busby, G., Binkley, C., & Chudy, R. (2020). Constructing optimal global timberland investment portfolios. *Forest Policy and Economics*, 111, Artículo e102083.  
<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.102083>
- Calle, Z., Murgueitio, E., & Chará, J. (2012). Integrating forestry, sustainable cattle-ranching and landscape restoration. *Unasylva*, 63(239), 31-40.
- Chizmar, S., Castillo, M., Pizarro, D., Vasquez, H., Bernal, W., Rivera, R., Sills, E., Abt, R., Parajuli, R., & Cubbage, F. (2020). A discounted cash flow and capital budgeting analysis of silvopastoral systems in the Amazonas region of Peru. *Land*, 9(10), Artículo e353. <https://doi.org/10.3390/land9100353>
- Cubbage, F., Mac Donagh, P., Balmelli, G., Morales Olmos, V., Bussoni, A., Rubilar, R., & Carrero, O. (2014). Global timber investments and trends. *Proceedings of the Third International Congress on Planted Forests*, 44(S1), Artículo eS7.  
<https://doi.org/10.1186/1179-5395-44-S1-S7>
- Decreto n° 452/988: *Forestación. Reglamentación de la Ley Forestal n° 15.939*. (1988). IMPO. <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/452-1988>
- Dirección General de Recursos Naturales. (2023, 8 de agosto). *CONEAT*.  
<https://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/coneat/>
- Dirección General Forestal. (2021). *Cartografía Nacional Forestal 2021*. MGAP.  
[https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Publicacion\\_dgf.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Publicacion_dgf.pdf)
- Dirección General Forestal. (2022). *Superficie forestal del Uruguay (bosques plantados): Período 1975-2021*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2023-06/Superficie%20Plantado%20Informe%202022.pdf>
- Ford, M. M., Zamora, D. S., Current, D., Magner, J., Wyatt, G., Walter, W. D., & Vaughan, S. (2019). Impact of managed woodland grazing on forage quantity, quality and

- livestock performance: The potential for silvopasture in Central Minnesota, USA. *Agroforestry Systems*, 93, 67-79.
- Google. (2023). Google Earth pro (versión 7.3.6.9796) [Software].  
<https://www.google.es/intl/es/earth/versions/#download-pro>
- Hirigoyen, A., Resquin, F., Navarro-Cerrillo, R., Franco, J., & Rachid-Casnati, C. (2021). Stand biomass estimation methods for *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii* in Uruguay. *Bosque*, 42(1), 53-66. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002021000100053>
- Instituto Nacional de Carnes. (2022). *Sector Cárnico Uruguayo: Síntesis 4M - 2022: Faena, precio de hacienda, exportación, mercado interno*.  
<https://www.inac.uy/innovaportal/file/21471/1/sector-carnico---primer-cuatrimestre-2022-3.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística. (2021). *Indicadores de la distribución del ingreso*.  
<https://www5.ine.gub.uy/documents/Demograf%C3%ADayEESS/HTML/ECH/Pobreza/Indicadores%20de%20la%20distribuci%C3%B3n%20del%20ingreso.html>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2015). Sistema de Apoyo a la Gestión Forestal (SAG dunnii 2015) [Software].  
<http://www.iniaforestaluy.com/sag2020/xmenu.aspx?145683>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. WMO; UNEP. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/meeting/pdfiles/Washington\\_Report.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/meeting/pdfiles/Washington_Report.pdf)
- Lacorte, S. M., Barth, S. R., Colcombet, L., Crechi, E. H., Esquivel, J. I., Fassola, H. E., & Winck, R. Á. (2016). Silvopastoral systems developed in Misiones and Corrientes, Argentina. En P. Peri, F. Dube, & A. Varella (Eds.), *Silvopastoral Systems in southern south America* (pp. 9-39). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8_2)
- La producción forestal en Uruguay: Un sector líder y sostenible*. (2023). CERES.  
[https://ceres.uy/index.php/estudios/ficha\\_estudio/95](https://ceres.uy/index.php/estudios/ficha_estudio/95)
- Léaniz, E. (2021). *Observatorio económico de Florida*. Cámara Empresarial de Florida.  
<https://www.cnscs.com.uy/files/Informe%20OEF%202021%20-%20Octava%20edición.pdf>

- Ley n° 15.939. *Ley forestal – fondo forestal – recursos naturales*. (1988). IMPO.  
<https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987>
- Marques Severo, C., & Matte, A. (2020). Comunalización de la gestión del sistema socioecológico del bioma Pampa: Análisis de un colectivo de ganaderos tradicionales de Uruguay. *Polis*, 19(57), 100-123.
- Mazolla, M. (2022). Apuntes sobre Wagyú en Uruguay. *Revista del Plan Agropecuario*, (183), 16-18.  
[https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/199\\_3109.pdf](https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/199_3109.pdf)
- Ministerio de Ambiente. (2020, 13 de agosto). *Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (INGEI)*. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/inventarios-nacionales-gases-efecto-invernadero-ingei>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2021, 10 de septiembre). *Resultados Cartografía Forestal 2021*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/datos/resultados-cartografia-forestal-2021>
- Mohan Kumar, B., & Nair, P. K. R. (Eds.). (2011). *Carbon sequestration potential of agroforestry systems: Opportunities and challenges*. Springer.
- Muneri, A., Daido, T., Henson, M., & Johnson, I. (2007). Variation in pulpwood quality of superior *Eucalyptus dunnii* families grown in NSW. *Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment*, 60(1), 74-77.
- Naciones Unidas. (s.f.). *El acuerdo de París*. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, & M. A. Tabatabai (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods* (pp. 961-1010). SSSA; ASA.
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2020). *Serie “Precio de la Tierra”*: *Arrendamientos Primer Semestre de 2020*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-09/COMUNICADO\\_PRENSA\\_Arrendamientos\\_1erSem2020\\_0.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-09/COMUNICADO_PRENSA_Arrendamientos_1erSem2020_0.pdf)

- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2021a). *Anuario estadístico agropecuario 2021*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2021/LIBRO%20ANUARIO%202021%20Web.pdf>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2021b). *Serie "Precio de la Tierra": Compraventas Primer Semestre de 2021*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-10/Compraventas\\_1erSem2021%28Definitivo%29.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-10/Compraventas_1erSem2021%28Definitivo%29.pdf)
- Panario, D., & Gutiérrez, O. (2007, 16 de noviembre). *La política forestal industrial del estado uruguayo* [Contribución]. Seminario: Política y Pasteras en el Río Uruguay: Medio Ambiente, Modelos Productivos y Movimiento Social, Buenos Aires. [https://www.researchgate.net/publication/264840541\\_La\\_politica\\_forestal\\_industrial\\_del\\_Estado\\_uruguayo](https://www.researchgate.net/publication/264840541_La_politica_forestal_industrial_del_Estado_uruguayo)
- Pastorini, V., & Acosta, P. (2011). Aportes del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca para la integración de la forestación en predios ganaderos. En *Anuario OPYPA 2011* (pp. 283-297). MGAP.
- ¿Qué son los bonos de carbono y que tipos existen? (2022, 6 de octubre). Carbon Neutral. <https://carbonneutralplus.com/proyectos-de-bonos-de-carbono-cuales-son-que-tipos-hay/>
- Ramírez López, J. L., & Chagna Avila, E. J. (2019). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7(1), 86-97.
- Sancho, L., Arocena, I., & Ordeig, L. (2021). *Definición, caracterización y cuantificación del área bajo sistemas silvopastoriles, para el seguimiento de las contribuciones establecidas en la Contribución Determinada a nivel Nacional de Uruguay*. MGAP; MA. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-04/informe\\_final.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-04/informe_final.pdf)
- Schlatter, J. E., & Gerding, V. (2014). Sitio forestal. En C. Donoso, M. E. González, & A. Lara (Eds.), *Ecología forestal: Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile* (pp. 309-319). Ediciones UACH. [https://www.researchgate.net/publication/277141706\\_Sitio\\_forestal](https://www.researchgate.net/publication/277141706_Sitio_forestal)

- Severo, E. T. D., & Tomaselli, I. (2000). Vaporization on the release of growth stresses in logs of *Eucalyptus dunnii* from two origin. *Scientia Agraria*, 1(1-2), 29-32.
- Sorrentino Fattoruso, A. (1997). *Manual para diseño y ejecución de inventarios forestales*. Hemisferio Sur.
- Tamosiunas, M. (2015). La integración productiva de árboles y ganado en predios familiares: La visión del productor. *Agrociencia (Uruguay)*, 19(1), 150-157.
- Thomas, D., Henson, M., Joe, B., Boyton, S., & Dickson, R. (2009). Review of growth and wood quality of plantation grown *Eucalyptus dunnii* Maiden. *Australian Forestry*, 72(1), 3-11. <http://svc043.wic023v.server-web.com/pdf/pdf-members/afj/AFJ%202009%20v72/1/02Thomas.pdf>
- Uruguay XXI (2021). *Sector forestal en Uruguay*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/a29771e03cc49e42fe516c01b0d271dc0fcf4cbe.pdf>
- Viñoles Gil, C., Fedrigo, J. K., Benítez, V., Santa Cruz, R., & Báez, F. (2022). Sistemas silvopastoriles en Uruguay. En M. Minteguiaga & R. Delpiazzo (Eds.), *XLIX Jornadas Uruguayas Buiatría* (pp. 51-59). CMVP. <https://buiatriapaysandu.uy/img/publicaciones/buiatria2022.pdf>
- What is the Kyoto Protocol?* (s.f.). United Nations. [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol#:~:text=En%20concreto%2C%20el%20Protocolo%20de,con%20las%20metas%20individuales%20acordadas](https://unfccc.int/kyoto_protocol#:~:text=En%20concreto%2C%20el%20Protocolo%20de,con%20las%20metas%20individuales%20acordadas)

11. ANEXO**Figura A1***Mapa político de Australia*

**Tabla A1***Peso seco, volumen y densidad de las muestras*

<b>Muestra</b>	<b>Peso seco (g)</b>	<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	13,205	28,709	0,46
<b>2</b>	17,112	37,457	0,46
<b>3</b>	0,8184	17,889	0,46
<b>4</b>	0,9601	18,773	0,51
<b>5</b>	15,696	38,925	0,40
<b>6</b>	14,829	34,142	0,43
<b>7</b>	46,053	31,831	0,50
<b>8</b>	10,776	22,427	0,48
<b>9</b>	22,683	47,182	0,48
<b>10</b>	0,7647	15,903	0,48
<b>11</b>	16,800	36,262	0,46
<b>12</b>	16,347	37,769	0,43
<b>13</b>	15,943	33,692	0,47
<b>14</b>	0,8462	19,354	0,44
<b>15</b>	0,7980	15,007	0,53
<b>16</b>	14,232	37,377	0,38
<b>17</b>	21,498	38,329	0,56
<b>18</b>	16,775	37,982	0,44
<b>19</b>	17,274	33,789	0,51
<b>20</b>	0,7206	15,190	0,47
<b>21</b>	16,334	38,942	0,42
<b>22</b>	14,449	31,797	0,45
<b>23</b>	0,7600	16,879	0,45
<b>24</b>	14,477	31,104	0,47

**Tabla A2***Porcentaje de carbono para cada una de las muestras estudiadas en laboratorio*

<b>Muestra</b>	<b>Peso</b>	<b>Abs.</b>	<b>mgC</b>	<b>% C</b>
<b>1</b>	0,0294	0,793	13,63	<b>46,37</b>
<b>2</b>	0,0306	0,762	13,08	<b>42,75</b>
<b>3</b>	0,0297	0,821	14,13	<b>47,59</b>
<b>4</b>	0,0300	0,857	14,77	<b>49,25</b>
<b>5</b>	0,0296	0,816	14,04	<b>47,45</b>
<b>6</b>	0,0308	0,865	14,92	<b>48,43</b>
<b>7</b>	0,0300	0,805	13,85	<b>46,16</b>
<b>8</b>	0,0295	0,828	14,26	<b>48,33</b>
<b>9</b>	0,0296	0,808	13,90	<b>46,96</b>
<b>10</b>	0,0305	0,783	13,46	<b>44,12</b>
<b>11</b>	0,0305	0,744	12,76	<b>41,84</b>
<b>12</b>	0,0302	0,843	14,53	<b>48,10</b>
<b>13</b>	0,0298	0,759	13,03	<b>43,72</b>
<b>14</b>	0,0310	0,801	13,78	<b>44,44</b>
<b>15</b>	0,0299	0,741	12,71	<b>42,50</b>
<b>16</b>	0,0302	0,746	12,80	<b>42,37</b>
<b>17</b>	0,0294	0,846	14,58	<b>49,59</b>
<b>18</b>	0,0308	0,869	14,99	<b>48,66</b>
<b>19</b>	0,0307	0,796	13,69	<b>44,58</b>
<b>20</b>	0,0295	0,823	14,17	<b>48,03</b>
<b>21</b>	0,0301	0,720	12,33	<b>40,97</b>
<b>22</b>	0,0296	0,712	12,19	<b>41,18</b>
<b>23</b>	0,0293	0,693	11,85	<b>40,45</b>
<b>24</b>	0,0302	0,776	13,33	<b>44,14</b>

## Figura A2

Proyección del sistema desde el año de la primera medición hasta año de cosecha

AÑO	PROYECCION PARA: <i>Eucalyptus dunnii</i>											
	AMD (m)	Población (árbs/ha)	AB (m2)	DAP (cm)	Altura comercial promedio (m)	Vol. comercial (m3/ha)	IMA (m3/ha/año)	ICA (m3/ha/año)	DAP Máx (cm)	Desvío (cm)	Biomasa (t ms/ha)	CO2 eq. (t/ha)
4	9.6	450	4.6	11.5	5.6	12.4	3.2	0	16.7	3.1	11.6	20.8
5	11.9	449	6.7	13.8	7.1	24.1	5	12	19.7	3.5	19.4	34.9
6	14	448	8.8	15.8	8.9	39.6	6.7	15	22.2	3.8	30.4	54.6
7	15.5	447	10.8	17.5	10.4	56.5	8.2	16.9	24.5	4.1	42.7	76.8
8	17.2	446	12.6	19	12.3	74.9	9.5	18	26.3	4.3	56.9	102.2
9	18.6	445	14.4	20.3	13.4	92.7	10.5	18.4	28	4.5	70.7	127.1
10	19.9	444	16	21.4	15.2	112.8	11.3	18.5	29.3	4.7	87.8	157.8
11	21	443	17.4	22.4	16.7	131.7	11.9	18.2	30.5	4.8	103.8	186.5
12	22	442	18.8	23.3	17.6	150.2	12.4	17.7	31.5	4.9	120.2	216

Nota. Tomado de Software SAG (INIA, 2015).

### Bibliografía Figura A2

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2015). *Sistema de Apoyo a la Gestión Forestal* (SAG dunnii 2015) [Software].

<http://www.iniaforestaluy.com/sag2020/xmenu.aspx?145683>

### Figura A3

Proyección del sistema desde el año 2018 hasta el año de cosecha

AÑO	PROYECCION PARA: <i>Eucalyptus dunnii</i>											
	AMD (m)	Población (árbs/ha)	AB (m <sup>2</sup> )	DAP (cm)	Altura comercial romedio (tr)	Vol. comercial (m <sup>3</sup> /ha)	IMA (m <sup>3</sup> /ha/año)	ICA (m <sup>3</sup> /ha/año)	DAP Máx (cm)	Desvío (cm)	Biomasa (t ms/ha)	CO2 eq. (t /ha)
2	5.8	455	0.6	5.5	3	0.7	0.3	0	8.1	1.8	1.7	3
3	8.7	451	2.2	7.9	5.1	4.3	1.4	3.6	10.9	2.5	4	7.1
4	11.1	449	4.1	10.8	7.8	12.7	2.6	6.7	11.2	1	8.3	14.9
5	13.4	446	6.3	13.3	9.6	24.2	4.1	10.3	13.2	1.2	12.2	22
6	14.5	444	8.1	15.2	11.8	40.1	5.7	13	14.8	1.3	21.2	38
7	16.4	441	10.2	16.4	13.9	57.7	7	15	16.8	1.5	30.4	54.5
8	18.1	438	11.9	18.1	16.3	77.5	8.2	16.2	18.8	1.7	44.1	79.3
9	19.6	435	13.8	19.6	18.2	99.4	9.1	16.8	20.6	1.8	63.1	113.4
10	21	432	15.2	20.8	19.8	116.4	9.9	17	22.1	2	69	123.9
11	22.1	429	16.6	21.6	21.5	140.9	10.6	16.9	23.4	2.1	94.7	170.2
12	23.2	426	18	22.4	22.5	159.9	11.1	16.7	24.7	2.3	108.2	194.5

Nota. Tomado de Software SAG (INIA, 2015).

Bibliografía Figura A3

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2015). *Sistema de Apoyo a la Gestión Forestal* (SAG dunnii 2015) [Software].

<http://www.iniaforestaluy.com/sag2020/xmenu.aspx?145683>

**Tabla A3***Inversión total para el sistema silvopastoril expresado en U\$\$ totales*

Año	0
Tierra	105.426
Instalación del monte	14.523
Total inversión	119.950

**Tabla A4***Egresos del sistema silvopastoril expresado en U\$S totales*

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Impuestos - Administración</b>		368	368	368	368	368	368
<b>Cosecha</b>							
<b>Flete</b>							
<b>Egresos totales</b>		368	368	368	368	368	368
<b>Año</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
<b>Impuestos – Administración</b>	368	368	368	368	368	368	
<b>Cosecha</b>							63.698
<b>Flete</b>							46.881
<b>Egresos totales</b>	368	368	368	368	368		110.947

**Tabla A5***Ingresos del sistema silvopastoril expresado en U\$S totales*

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Renta ganadera</b>				2.378	2.378	2.378	2.378
<b>Bonos de carbono</b>							
<b>Venta madera pulpa</b>							
<b>Valor salvamento tierra</b>							
<b>Ingresos totales</b>	0	0	0	2.378	2.378	2.378	2.378
<b>Año</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
<b>Renta Ganadera</b>	2.378	2.378	2.378	2.378	2.378	2.378	
<b>Bonos de carbono</b>							12.740
<b>Venta madera pulpa</b>							252.242
<b>Valor salvamento tierra</b>							105.426
<b>Ingresos totales</b>	2.378	2.378	2.378	2.378	2.378		370.408