

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**SUPERVIVENCIA ESTIVAL DE MACOLLOS DE GRAMÍNEAS C3 EN  
SOTOBOSQUE FORESTAL**

**por**

**Luciano Nicolás MANEIRO MURRÚ**

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

**MONTEVIDEO**

**URUGUAY**

**2026**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia

“Creative Commons **Reconocimiento – No comercial – Compartir igual**”.



**PÁGINA DE APROBACIÓN**

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

---

Zoot. (Dr.) Jean Kássio Fedrigo

Tribunal:

---

Zoot. (Dr.) Jean Kássio Fedrigo

---

Zoot. (Dr.) Patricia Bertoncelli

---

Ing Agr. (Dr.) Gerónimo Cardoso

Fecha:

9 de abril de 2026

Estudiante:

---

Luciano Nicolás Maneiro Murrú

## AGRADECIMIENTOS

A familiares y amigos por el apoyo de todos estos años de estudio.

A la Facultad de Agronomía por dejarme formar parte de esta carrera.

Al tutor Especialista en manejo de Pasturas, Zootecnista, MSc., PhD., Jean Kássio Fedrigo por la orientación en el trabajo y siempre estar dispuesto a ayudar en todo lo necesario.

Al Ing. Agrónomo Claudio Hernández por la constante colaboración en el trabajo de campo, así como también en el trabajo de gabinete.

A todo el personal de la Estación Experimental Bernardo Rosengurtt (EEBR), por su amabilidad y hospitalidad.

Al Polo Agroforestal por permitirme formar parte de este proyecto.

A la empresa LUMIN por cedernos el espacio experimental sin ningún tipo de restricción.

A todos ellos, muchas gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS .....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS .....	7
RESUMEN.....	9
SUMMARY .....	10
1. INTRODUCCIÓN .....	11
1.1 Objetivo General .....	12
1.2 Objetivos específicos .....	12
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Sistemas agroforestales .....	14
2.2. Sistemas silvopastoriles .....	14
2.2.1. Sistemas silvopastoriles en Uruguay .....	15
2.3. Componente forestal en sistemas silvopastoriles .....	16
2.3.1. Eucaliptus.....	16
2.4. Componente forrajero en sistemas silvopastoriles .....	17
2.4.1. Dactylis glomerata.....	18
2.4.2. Lolium arundinaceum .....	19
2.4.3. Holcus lanatus .....	19
2.5. Microclima en condiciones de sotobosque .....	19
2.5.1. Temperatura del aire y del suelo .....	20
2.5.2. Humedad del aire y del suelo .....	21
2.5.3. Viento y precipitaciones .....	22
2.5.4. Disponibilidad de nutrientes .....	23
2.5.5. Radiación .....	24
2.6 Orientación del componente forestal.....	25
2.7 Persistencia y mortalidad en sistemas silvopastoriles .....	26

3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1. Localización y tipo de suelo.....	29
3.2. Diseño experimental.....	31
3.3. Manejo del experimento .....	32
3.4. Variables evaluadas .....	33
3.4.1. Evaluación de las variables microclimáticas.....	33
3.4.2. Evaluación de la dinámica poblacional de macollos.....	33
3.5. Análisis estadístico .....	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
4.1. Condiciones microclimáticas del ensayo .....	35
4.1.1. Radiación fotosintéticamente activa (PAR).....	35
4.1.2. Temperatura del suelo.....	37
4.1.3. Temperatura del aire .....	38
4.1.4. Precipitaciones del período .....	40
4.1.5. Humedad del suelo .....	40
4.1.6. Humedad relativa del aire .....	41
4.2. Densidad de población de macollos .....	42
4.2.1. Tasas de aparición y mortalidad.....	44
5. CONCLUSIONES .....	50
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

### Tabla n.

Tabla 1 <i>Temperatura mínima, temperatura máxima y amplitud térmica (rango), según mes y tratamiento</i> .....	39
Tabla 2 <i>Densidad poblacional de macollos promedio según mes de evaluación, según especie y tratamiento</i> .....	43
Tabla 3 <i>Tasa de mortalidad de macollos de <i>Dactylis glomerata</i>, <i>Lolium arundinaceum</i> y <i>Holcus lanatus</i> según tratamiento</i> .....	44
Tabla 4 <i>Tasa de aparición de macollos de <i>Dactylis glomerata</i>, <i>Lolium arundinaceum</i> y <i>Holcus lanatus</i> según tratamiento</i> .....	46

### Figura n.

Figura 1 <i>Ubicación del ensayo</i> .....	29
Figura 2 <i>Grupos CONEAT comprendidos en el predio del ensayo</i> .....	30
Figura 3 <i>Diseño experimental</i> .....	32
Figura 4 <i>Radiación fotosintéticamente activa (<math>\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}</math>) según mes (setiembre 2019 hasta junio 2020) y tratamiento</i> .....	36
Figura 5 <i>Temperatura del suelo (<math>^{\circ}\text{C}</math>) según mes (desde setiembre 2019 hasta junio 2020) y tratamiento</i> .....	37
Figura 6 <i>Temperatura del aire (<math>^{\circ}\text{C}</math>) según mes (desde setiembre 2019 hasta junio 2020) y tratamiento</i> .....	38
Figura 7 <i>Precipitaciones (mm) según mes (desde setiembre 2019 hasta junio 2020) en el tratamiento control</i> .....	40
Figura 8 <i>Humedad del suelo (<math>\text{m}^3 \text{m}^{-3}</math>) según mes (desde setiembre 2019 hasta junio 2020) y tratamiento</i> .....	41
Figura 9 <i>Humedad relativa del aire (%) según mes (desde setiembre 2019 hasta junio 2020) y tratamiento</i> .....	42

Figura 10 *Dinámica de aparición y mortalidad de macollos (diciembre-abril) D. glomerata, L. arundinaceum y H. lanatus.....* 48

## RESUMEN

Frente a la presencia de veranos cada vez más intensos, calurosos y secos en regiones subtropicales como la de Uruguay, donde se puede ver comprometida la persistencia de ciertas especies de gramíneas invernales, resulta esencial elaborar estrategias eficaces para favorecer su persistencia en sistemas de producción ganaderos con énfasis en pasturas. Se plantea la hipótesis de que las condiciones determinadas por un sistema silvopastoril (SSP) contribuyen a la disminución en la mortalidad de macollos en gramíneas perennes C3 mejor adaptadas a condiciones de sombra. En el presente estudio se evaluó la dinámica de los macollos de dos gramíneas perennes C3 de diferente tolerancia a la sombra (*Dactylis glomerata*: tolerante, *Lolium arundinaceum*: moderadamente tolerante) y una gramínea C3 bianual típica de ambientes húmedos (*Holcus lanatus*), bajo pleno sol y SSP con filas de árboles orientadas norte-sur (N-S) y este-oeste (E-O). Los ejemplares de *Eucalyptus grandis* modificaron de manera significativa el microclima del sotobosque, reduciendo la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y atenuando las temperaturas del aire y suelo. La orientación N-S permitió mayor entrada de radiación al sotobosque que la E-O. Los sistemas con árboles redujeron la temperatura del suelo en verano aproximadamente 3°C menos que el tratamiento bajo pleno sol. La humedad del suelo fue mayor en E-O respecto a los otros dos tratamientos durante los meses cálidos. *D. glomerata* se destacó como la especie con mayor densidad de macollos en el sotobosque al concluir el primer verano, especialmente bajo la orientación N-S, gracias a una mayor supervivencia y a un establecimiento continuo en comparación con *L. arundinaceum* y *H. lanatus*. En contraste, *L. arundinaceum* presentó menor supervivencia y surgimiento de macollos bajo los árboles, sin embargo, pudo mantener alta densidad en condiciones de pleno sol. La especie mostró una relación marcada entre la densidad y la supervivencia de macollos con la PAR y la temperatura del suelo, mientras que la humedad tuvo escasa influencia. *H. lanatus*, por su parte, experimentó elevada mortalidad en todos los tratamientos, con desaparición total de macollos en el sotobosque al finalizar el verano. Los hallazgos sugieren que, en climas subtropicales, los sistemas silvopastoriles pueden favorecer la persistencia de *D. glomerata* durante la estación cálida, asegurando su supervivencia y estabilidad poblacional.

*Palabras clave:* sistemas silvopastoriles, *Lolium arundinaceum*, *Dactylis glomerata*, *Holcus lanatus*, macollos, *Eucalyptus grandis*

## SUMMARY

Given the increasingly intense, hot, and dry summers in subtropical regions such as Uruguay, where the persistence of certain winter grasses may be jeopardized, it is crucial to design effective strategies that enhance their survival within livestock production systems, particularly those based on pastures. We hypothesize that the conditions created by a silvopastoral system (SPS) reduce tiller mortality in perennial C3 grasses that are better adapted to shaded environments. This study assessed the tiller dynamics of two perennial C3 grasses with contrasting shade tolerance (*Dactylis glomerata*: tolerant; *Lolium arundinaceum*: moderately tolerant) and one biennial C3 grass typical of humid environments (*Holcus lanatus*), under full sun and SPS with tree rows-oriented north–south (N–S) and east–west (E–W). *Eucalyptus grandis* significantly altered the understory microclimate, reducing photosynthetically active radiation (PAR) and moderating both air and soil temperatures. The N–S orientation allowed greater penetration of radiation into the understory compared to E–W. Tree-based systems lowered summer soil temperatures by approximately 3°C relative to the control treatment. Soil moisture was higher under E–W orientation during the warm months. *D. glomerata* emerged as the species with the highest tiller density in the understory at the end of the first summer, particularly under N–S orientation, due to greater survival and continuous establishment compared with *L. arundinaceum* and *H. lanatus*. In contrast, *L. arundinaceum* exhibited reduced survival and tiller emergence under trees, despite maintaining high density under full sun. Its tiller density and survival were strongly associated with PAR and soil temperature, while soil moisture exerted little influence. *H. lanatus*, meanwhile, suffered high mortality across all treatments, with complete tiller disappearance in the understory by the end of summer. Overall, the findings suggest that in subtropical climates, silvopastoral systems can enhance the persistence of *D. glomerata* during the warm season, ensuring its survival and population stability.

*Keywords:* silvopastoral systems, *Lolium arundinaceum*, *Dactylis glomerata*, *Holcus lanatus*, tillers, *Eucalyptus grandis*

## 1. INTRODUCCIÓN

Uruguay es un país que se destaca por el papel protagónico de su sector agropecuario en la economía nacional. La presencia del campo natural, un ecosistema de gran relevancia económica y ambiental, ocupa un territorio de 11.382.534 hectáreas. Esto ha llevado al país a consolidarse como uno de los principales productores mundiales de carne, con una población significativa de vacunos y ovinos, alimentados principalmente con forraje proveniente de estas extensas áreas de campo natural. Por otro lado, el sector forestal en Uruguay abarca 1.065.000 hectáreas de plantaciones comerciales, además de 847.000 hectáreas de bosque nativo (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2022).

Dentro de este contexto, los sectores ganadero y forestal han encontrado una relación beneficiosa: se han establecido contratos que permiten a los productores ganaderos pastorear sus animales en campos forestados. Esta práctica ha generado ventajas mutuas, ya que las empresas forestales reducen los riesgos de incendios en sus plantaciones al remover la biomasa forrajera que consumen los animales, mientras que los productores ganaderos obtienen rentabilidad por la producción de carne en el 30-40% del campo que permanece sin plantar (Cubbage et al., 2012).

Esta integración, entre los distintos rubros (ganadero y forestal) componen los Sistemas Silvopastoriles. Estos sistemas productivos representan una forma de uso de la tierra donde los componentes arbóreos, forrajeros y ganaderos ocupan la misma parcela de tierra, por lo que combinan el manejo forestal, el manejo de forraje y la cría de ganado. Cabe destacar, que los sistemas silvopastoriles, mejoran el microclima tanto para el ganado como para las pasturas, ya que los protege contra las heladas y el sol, a su vez genera menor aparición de malezas, plagas y patógenos (Frey, 2009).

Respecto al componente forrajero de los sistemas silvopastoriles, uno de los factores importantes a considerar es su variación espacial y temporal que estará determinada por el marco de plantación del componente forestal, es decir, el diseño de plantación, la especie forestal, las intervenciones forestales y la edad de los árboles, que afectarán la acumulación de forraje dentro del sistema. Esta variación espacial y temporal definirá en gran medida la competencia que va a existir entre los árboles y las pasturas (Varella, 2012).

Las especies forrajeras utilizadas en el sotobosque también deben adaptarse al microclima generado en el sotobosque forestal. Algunas especies C3, que pueden tolerar una sombra moderada, mantienen su productividad ya que poseen características fisiológicas que les permiten sostener altas tasas fotosintéticas en condiciones de sombra (Karki & Goodman, 2010). *Dactylis glomerata* y *Lolium arundinaceum* son dos de las principales especies perennes cultivadas en sistemas agroforestales (Mercier et al., 2020), con *Dactylis* reportada como más tolerante a la sombra que otras gramíneas. Estudios realizados en Nueva Zelanda y Uruguay también han demostrado las respuestas positivas de tolerancia a la sombra de la gramínea bianual *Holcus lanatus* al sombreado (Devkota et al., 1997).

La comprensión de las respuestas adaptativas del componente pastoril en estos sistemas silvopastoriles es esencial para optimizar la gestión agropecuaria y forestal en Uruguay, asegurando el bienestar animal, la sustentabilidad productiva y económica, y el aumento de la productividad del suelo a través de enfoques integrados y sostenibles.

De acuerdo con lo anterior, el presente trabajo buscó entender la variabilidad espacial y temporal de las condiciones microclimáticas en los sotobosques silvopastoriles, con especial enfoque en la radiación fotosintéticamente activa, temperatura y humedad del aire, y temperatura y humedad del suelo, considerando la presencia de árboles del género *Eucalyptus sp.* en diferentes orientaciones de plantación. Además, se busca analizar la dinámica poblacional de macollos, su aparición, supervivencia y mortalidad en las especies *Dactylis glomerata*, *Lolium arundinaceum* y *Holcus lanatus* en estos sistemas.

### **1.1. Objetivo General**

Analizar la supervivencia estival de las especies de gramíneas C3 en sistemas silvopastoriles por medio del estudio de las tasas de aparición y mortalidad de macollos en clima subtropical, en respuesta a las condiciones microclimáticas presentes.

### **1.2. Objetivos específicos**

1. Evaluar la densidad poblacional de macollos (DPM) de *Dactylis glomerata*, *Lolium arundinaceum* y *Holcus lanatus* en diferentes condiciones: pleno sol (control) y con filas de árboles en dos orientaciones diferentes (Norte-Sur y Este-Oeste) durante el verano.

2. Determinar la tasa de supervivencia de macollos (SUP) de las especies de gramíneas C3 bajo las distintas condiciones microclimáticas del sotobosque.
3. Analizar la tasa de mortalidad de macollos (TMM) de *Dactylis glomerata*, *Lolium arundinaceum* y *Holcus lanatus* en función de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), la temperatura del suelo y la humedad del suelo durante el verano.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Sistemas agroforestales

La agroforestación optimiza los efectos benéficos de la interacción entre especies madereras y/o cultivos y animales, usando el ecosistema natural como modelo y aplicando características ecológicas del sistema agroforestal (Altieri, 2018). La agroforestería requiere tres condiciones básicas: al menos dos especies que interactúan biológicamente, al menos una de las cuales debe ser un árbol perenne, y al menos dos de los componentes deben ser manejados para cumplir los objetivos del uso de la tierra (Somarriba, 2012).

La agroforestería presenta varias ventajas como mejorar el aprovechamiento de recursos naturales como luz, agua, nutrientes y por ende la productividad, aumentar la estabilidad de la producción y reducir riesgos, moderar el microclima y proteger a cultivos y animales, promover la biodiversidad, reducir gastos para insumos y productos externos, reducir escorrentía superficial y erosión del suelo, mantener la materia orgánica y la fertilidad del suelo, mantener o mejorar las propiedades físicas del suelo, capturar y reciclar nutrientes de capas profundas del suelo reduciendo pérdidas por lavado y lixiviación (Fike et al., 2004; Jiménez & Muschler, 2001).

Una de las clasificaciones de los sistemas agroforestales se basa en la naturaleza y la presencia de sus tres componentes principales, que se dividen en tres categorías diferentes: los agrosilvícolas, los agrosilvopastoriles y los sistemas silvopastoriles. Los sistemas agrosilvícolas integran el componente arbóreo con cultivos tanto anuales como perennes. Los sistemas agrosilvopastoriles combinan árboles, cultivos y pastizales para la producción animal. Por último, los sistemas silvopastoriles alternan árboles y pastizales como forraje para la producción animal (Sharry, 2022).

### 2.2. Sistemas silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles son una práctica que se ha practicado durante siglos y es una modalidad de sistemas agroforestales. Estos sistemas están diseñados y manejados específicamente para la producción de árboles, productos arbóreos, forraje y ganado (Klopfenstein et al., 1997; Sánchez, 1999). Los árboles pueden ser de vegetación natural o plantados con fines madereros (ej. *Eucalyptus*) o industriales (ej. caucho, palma de aceite). También se pueden utilizar en este sistema árboles frutales o árboles

multipropósito. Por lo tanto, existen varios tipos de sistemas silvopastoriles: pastoreo en bosques naturales, pastoreo en plantaciones forestales para madera, pastoreo en plantaciones de árboles con fines industriales, praderas con árboles o arbustos forrajeros, sistemas mixtos con árboles forrajeros o multipropósito para corte, sistemas agroforestales especializados para la ganadería intensiva (Sánchez, 1999).

### 2.2.1. Sistemas silvopastoriles en Uruguay

Entre los años 2005 y 2010 en el Uruguay, el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), dio apoyo técnico y financiero a productores, como por ejemplo subsidios, pago de rentas o exoneraciones impositivas con la finalidad de incentivar los sistemas silvopastoriles en Uruguay, ya que este sistema permitiría facilitar la adopción de estrategias de producción ganadera, minimizando las pérdidas de producción por estrés térmico, a la vez de generar una diversificación de la fuente de ingresos por la venta de madera (Tamosiunas, 2015). A pesar de estos incentivos propuestos por el programa del MGAP, la adopción de los sistemas silvopastoriles en Uruguay es baja debido a limitantes culturales, falta de tecnología multi-rubro validada, falta de predios piloto para la difusión de resultados, interpretación diversa del concepto de forestación y dificultades para lograr ámbitos de trabajo plurales, multiinstitucionales y multi-actor (Pastorini & Acosta, 2011). Los productores que tienen experiencia silvopastoril previa forestan por los beneficios que este sistema tiene para el ganado, mientras que los que no lo hacen, perciben la forestación como un aumento de costos y horas de trabajo sin beneficios en el corto plazo (Tamosiunas, 2015).

La implementación de los sistemas agrosilvopastoriles en Uruguay sucedió bajo cuatro modelos principales. El primero por la introducción de plantaciones forestales en áreas marginales del predio para la recuperación de suelos degradados; la segunda forestación como cortinas para abrigo y sombra; el tercero, forestación como sistemas agrosilvopastoriles propiamente dichos y el último como registro y manejo de monte nativo para ejecución de silvopastoreo. Los modelos de integración ganadería-forestación mayormente adoptados en Uruguay se caracterizan por plantaciones de alta densidad, es decir, 1200 a 1600 árboles/ha para producción de pulpa o madera para aserrío, donde solamente el 30-40% del área se destina a la producción de forraje (Cubbage et al., 2012). A su vez, como explica (Fedrigo et al., 2017) las empresas forestales realizan contratos

de pastoreo de sus plantaciones con productores locales, que manejan el ganado a una dotación de 0.4-0.5 UG/ha.

Según Sancho et al. (2021), los sistemas silvopastoriles en Uruguay, los podemos encontrar en tres diferentes zonas, la zona sur sureste donde estos sistemas abarcan un total de 5066,25 ha, la zona centro-sur que ocupa 976,34 ha y por último la zona norte donde existen 394,98 ha, abarcando en total 6393,57 hectáreas en todo el país.

Dentro de este contexto, Uruguay ha evolucionado en el conocimiento y adopción de los sistemas silvopastoriles. En la actualidad existen claras caracterizaciones y cuantificaciones de los SSP en Uruguay, se han conformado redes productivas, así como investigaciones que generan conocimiento en aspectos como microclima, selección de especies forrajeras tolerantes al sombreado, respuesta animal y diseños de plantación (Viñoles Gil et al., 2022).

En resumen, el país cuenta actualmente con espacios de investigación y colaboración entre instituciones públicas y productores que contribuyen a la optimización del manejo de los SPS.

### **2.3. Componente forestal en sistemas silvopastoriles**

#### **2.3.1. Eucaliptus**

Los eucaliptos (familia Myrtaceae) cuentan con alrededor de 950 especies nativas y endémicas de Australia. Debido a su amplia variedad de características morfológicas y de tamaño, actualmente se los clasifica en los géneros *Eucalyptus*, *Angophora* y *Corymbia* (Barros, 2012). Las especies del género *Eucalyptus* tienen un buen desarrollo radicular y vegetativo, prosperando en suelos bien drenados. Son especialmente conocidas por su rápido crecimiento, resistencia y adaptabilidad a diversas condiciones ambientales. Debido a estas características, los *Eucalyptus* han sido introducidos en muchas partes del mundo con fines comerciales y de reforestación (Brussa, 1994).

A nivel mundial, dentro del género *Eucalyptus*, las especies de mayor importancia corresponden a *E. camaldulensis*, *E. urophylla* y *E. pellita* en climas tropicales, y para climas templados son *E. grandis*, *E. globulus*, *E. dunnii*, *E. nitens*, *E. tereticornis* y *E. smithii* (Barros, 2012). A nivel nacional, según la nueva cartografía forestal, *Eucalyptus grandis*, incluidos híbridos, es una de las especies que abarca mayor superficie forestal ocupando 250.964 hectáreas (Bervejillo, 2021).

La especie *Eucalyptus grandis* crece de forma silvestre en zonas costeras de Nueva Gales del Sur y Queensland, adentrándose unos 100 km en el continente australiano (Australian Biological Resources Study [ABRS], 1989). Requiere precipitaciones de 1,000 a 1,800 mm de lluvia anuales y se desarrolla en temperaturas máximas de hasta 30 °C y los suelos deben ser profundos y bien drenados. *Eucalyptus grandis* es una especie que crece rápidamente, adaptada a un amplio rango de suelos. Es una especie sensible a las malezas y a suelos compactados por sobrepastoreo. Los espaciamientos más usados son de 2.5 x 2.5 m. (1,600 plántula/ ha) a 3 x 3 m. (1,111 plántulas/ha; (Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales [MARENA] & Instituto Nacional Forestal [INAFOR], 2002).

Por otro lado, el *Eucalyptus camaldulensis* es la especie de eucalipto de más amplia distribución (ABRS, 1989). En su distribución natural en Australia la precipitación está en el rango de 200-1,250 mm. Esta especie se adapta a una gama amplia de suelos, sin embargo, en suelos compactados por sobrepastoreo, con poca humedad disponible y falta de preparación, el crecimiento se ve afectado (MARENA & INAFOR, 2002). El *Eucalyptus camaldulensis* se caracteriza por su rápido crecimiento, alta capacidad de prosperar y producir cosechas aceptables en suelos relativamente pobres y sitios con estación seca prolongada; alta capacidad de rebrote por tocón; copa pequeña que no suprime drásticamente el crecimiento de hierbas. En esta especie, la densidad de la plantación va a depender del objetivo de la misma, por ejemplo, si el objetivo es para leña, se recomienda de 1600 a 2500 plantas por hectárea. Para otros objetivos, por ejemplo, madera, se puede establecer la plantación con el mismo espaciamiento y realizar posteriormente raleos intermedios con diferentes intensidades (MARENA & INAFOR, 2002).

#### **2.4. Componente forrajero en sistemas silvopastoriles**

El componente forrajero ha sido el más estudiado en los sistemas silvopastoriles, ya que el mismo presenta modificaciones estructurales, taxonómicas y químicas debido a la presencia del componente arbóreo. Las ventajas del sistema silvopastoril debido a la interacción árbol, pastura y animal, pueden verse afectadas si la elección de las especies tanto forrajeras como silvícolas y sus densidades, no son las adecuadas (Silveira Martínez, 2015).

Algunas especies C3 capaces de tolerar sombra moderada mantienen su productividad gracias a características fisiológicas que les permiten mantener altas tasas fotosintéticas

bajo condiciones de sombra (Sage & McKown, 2006). Esto es debido a que debajo del sotobosque ocurren cambios en el microclima, a los cuales las especies forrajeras deben estar adaptadas. Dentro de las especies que son reconocidas por tener buena tolerancia al sombreado están *Dactylis glomerata*, *Lolium arundinaceum* y *Holcus lanatus* (Sage & McKown, 2006); por lo tanto, estas pasturas fueron las evaluadas en el presente ensayo y se pasarán a describir a continuación.

#### 2.4.1. *Dactylis glomerata*

*Dactylis glomerata* es una gramínea perenne, invernal y cespitosa. Presenta requerimientos de suelos medianos a pesados, fértiles y permeables; poca sensibilidad a la acidez de suelos y a problemas de toxicidad mineral. Cuenta también con buena adaptación a suelos más limitantes, de fertilidad moderada y baja humedad, siendo intolerante a excesos de humedad. Su sistema radicular es superficial, pero tolera períodos cortos de sequía. Es una especie tolerante al frío y a temperaturas elevadas cuando el agua no es limitante. Al contar con un sistema radicular superficial, se debe promover la buena producción de raíces antes y después del verano, para asegurar la persistencia de la especie en dicha estación (Carámbula, 2002).

Presenta baja persistencia reproductiva y acepta defoliaciones no muy intensas, ya que las sustancias de reserva se encuentran en la base de los macollos y en las vainas de las hojas. En cuanto a su manejo, se recomienda su siembra en conjunto con leguminosas como trébol rojo o blanco al contar con buena producción otoño-inverno-primaveral (Carámbula, 2002).

Devkota et al. (1997) realizaron una evaluación de la morfología y la tolerancia a la sombra de diferentes especies (*Dactylis glomerata*, *Lolium arundinaceum*, *Holcus lanatus*, entre otras) exponiéndolas a diferentes niveles de radiación fotosintéticamente activa (RFA). Según este estudio, *Dactylis glomerata* fue la segunda especie con el mayor peso seco de brote por planta de todas las especies estudiadas por los autores. A su vez, *D. glomerata* tuvo un mayor índice de área foliar (IAF) y fue una de las especies que tuvo mayor cantidad de macollos en condiciones de baja RFA respecto a las demás especies estudiadas por los autores.

#### 2.4.2. *Lolium arundinaceum*

*L. arundinaceum* es una de las gramíneas perennes más importantes y de mayor utilización. Se define como perenne invernada, cespitosa a rizomatosa con rizomas muy cortos. Las mejores condiciones para su desarrollo son suelos medios a pesados, tolerando suelos ácidos y alcalinos (Carámbula, 2002). Se adapta a suelos húmedos, es resistente a la sequía y admite pastoreos intensos y frecuentes. No es necesario un reposo estival, pero sí un correcto manejo en verano (Carámbula, 2002). Presenta muy buena persistencia y es muy buena productora de semilla bajo buena fertilidad. Su establecimiento es lento y en el estado de plántula es muy vulnerable a la competencia tanto de malezas como de otras especies (Carámbula, 2002). Según Devkota et al. (1997) y Shan et al. (2011), esta especie es tolerante al pisoteo y a la sombra.

#### 2.4.3. *Holcus lanatus*

Es una gramínea invernada, bianual o perenne de vida corta, también conocida como pasto lanudo. Se ha adaptado a un amplio rango de suelos, mostrando tolerancia al déficit hídrico y mal drenaje natural (Carámbula, 2002), sin embargo, se ha demostrado que donde se encuentra más favorecido es en suelos húmedos (Boigné et al., 2017). Esta especie cuenta con un sistema radicular amplio que le permite explorar grandes volúmenes de suelo. Su establecimiento es bueno, aunque su crecimiento inicial es lento, mostrando un potencial significativo de producción de forraje en otoño, invierno y primavera, pero no durante el verano. Sin embargo, en términos de palatabilidad, *Holcus lanatus* no es una especie muy apetecible para los animales (Carámbula, 2002).

En el contexto de sistemas agroforestales, *Holcus lanatus* es una de las especies que mejor prospera en sistemas agroforestales (Percival et al., 1984, como se cita en Coore Viñas et al., 2021), ya que fue demostrada su tolerancia frente a condiciones de sombra densa, mostrando mayor IAF y cantidad de macollos que otras especies en estas condiciones (Devkota et al., 1997).

### **2.5. Microclima en condiciones de sotobosque**

La estructura y características del componente arbóreo o de cualquier superficie vegetal tienden a establecer un equilibrio con el ambiente que lo rodea, determinando condiciones físicas bajo la cubierta vegetal y en zonas vecinas, es decir el microclima (Munka, 2017).

Parte de la complejidad del sistema agroforestal se debe a las diferencias en la disponibilidad y asignación de los recursos asociados con las condiciones del micrositio (Belesky, 2005), ya que la incorporación del componente forestal en los sistemas silvopastoriles modifica las condiciones ambientales bajo dosel y en áreas adyacentes, que, a su vez, inciden en los componentes del sistema mediante procesos bioquímicos, fisiológicos y ecológicos (Munka, 2017).

Los principales aspectos microclimáticos afectados por la incorporación del componente forestal en un sistema silvopastoril, son la temperatura del aire y del suelo (Fedrigo et al., 2017), la humedad del aire y del suelo (Silveira et al., 2006), la velocidad del viento (Sotomayor Garretón & Teuber Winkler, 2011), la precipitación (Silveira et al., 2006), propiedades físicas del suelo (Fedrigo et al., 2017; Gallo, 2006), disponibilidad de nutrientes (Cruz et al., 1999) y la radiación solar incidente o balance de energía en el sotobosque (Viñoles et al., 2017).

#### 2.5.1. Temperatura del aire y del suelo

La presencia del componente arbóreo en los sistemas silvopastoriles tiene un impacto significativo en la temperatura del aire y del suelo (Munka, 2017). En áreas arboladas, las temperaturas máximas diarias son menores y las temperaturas mínimas diarias son mayores en comparación con áreas sin árboles (Fedrigo et al., 2017).

En un estudio realizado en un sotobosque con *Pinus* de alta densidad en Uruguay, se determinó que la amplitud térmica es menor en comparación con áreas fuera del bosque. Durante el verano, se registraron aproximadamente 3°C menos de diferencia en las temperaturas, mientras que, en el invierno, se observaron aumentos en las temperaturas nocturnas dentro del bosque (Fedrigo et al., 2017). En la misma línea, Alonso (2011), observó una menor amplitud en los registros térmicos del aire bajo el bosque. Esta autora registró bajo dosel, en promedio, valores de temperatura máxima del orden de 3°C menos y de temperatura mínima de 0,7°C superior respecto a lo observado fuera del monte. Los cambios en la temperatura tienen un impacto significativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas, la actividad de los microorganismos y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Gallo, 2006).

La temperatura media del suelo va a depender del arreglo, densidad y altura de los árboles (Bahamonde et al., 2009; Ribaski et al., 2005). Como menciona Ribaski et al. (2005), en los sistemas silvopastoriles por lo general la temperatura del suelo es menor en el interior

del bosque. Estos cambios son positivos para el crecimiento de las especies forrajeras, ya que altas temperaturas del suelo pueden inhibir la fotosíntesis y la síntesis de citocinina, que es la hormona responsable de la producción de nuevas hojas y macollos y del retraso en la senescencia (Wang et al., 2003).

Además, las pasturas bajo árboles se enfrentan a una menor amplitud térmica diaria y estacional, así como una menor evapotranspiración, lo que implica un mejor estatus hídrico para la pastura. Esto hace que las pasturas puedan permanecer más verdes durante períodos críticos de alta demanda atmosférica, representando un recurso clave para la alimentación del ganado en dicha época (Varela, 2012).

### 2.5.2. Humedad del aire y del suelo

Otro aspecto microclimático que es afectado por la presencia de árboles es la humedad del aire y del suelo. Bajo el dosel arbóreo, la humedad del aire tiende a ser mayor debido a la baja renovación de aire y a la menor resistencia aerodinámica. Los árboles contribuyen a la reducción de la temperatura y la pérdida de vapor de agua en el ambiente (Munka, 2017).

La humedad del suelo también es afectada por la presencia de árboles. Las raíces mejoran la estructura del suelo promoviendo la formación de agregados y rompiendo las capas endurecidas. Cuando las raíces mueren, dejan canales que facilitan la aireación y la infiltración de agua (Gallo, 2006). Además, estudios realizados por Fedrigo et al. (2018) han demostrado que la presencia de árboles afecta el balance hídrico del suelo, aumentando la humedad disponible para las pasturas que crecen bajo las copas de estos. Este mismo autor menciona que la vegetación arbórea puede tener un efecto positivo en el control de la erosión hídrica y eólica, reduciendo la pérdida de humedad en el suelo debido a la disminución de los vientos y la intensidad de las gotas de lluvia que llegan al suelo.

Alternativamente, en sistemas silvopastoriles puede haber competencia entre las raíces de los árboles y las pasturas por el agua del suelo (Gallo, 2006). Esta competencia puede afectar la disponibilidad de agua para las plantas herbáceas y la dinámica del agua en el suelo. La competencia por agua tal vez sea uno de los aspectos más controvertidos. Los árboles le permiten una mayor infiltración y retención de agua al mejorar algunas propiedades físicas del suelo y reducen la evapotranspiración de las plantas del estrato

bajo, como resultado del sombreado, pero ellos mismos consumen agua y a veces en grandes cantidades (Gallo, 2006).

Algunos estudios han mostrado una reducción en el contenido de agua disponible en el suelo cuando existen árboles, especialmente en sistemas con árboles maduros que tienen una mayor demanda de agua debido a su extenso sistema radicular y mayor evapotranspiración (Karki & Goodman, 2015).

### 2.5.3. Viento y precipitaciones

Otro beneficio que los árboles aportan a los sistemas silvopastoriles es la disminución de la velocidad del viento y la circulación de aire debajo del dosel. Este efecto, junto con la sombra proporcionada por los árboles, se puede considerar como un servicio para los animales, ya que crea condiciones de confort en situaciones adversas de frío o calor (Munka, 2017).

La presencia de cubiertas forestales tiene un impacto significativo en el ciclo hidrológico debido a los efectos del dosel y los sistemas radiculares en la interceptación de la precipitación, la infiltración, percolación, la rugosidad superficial, la transpiración y la escorrentía. Cuando se produce una precipitación sobre un bosque, una fracción del agua es interceptada y temporalmente retenida en el follaje y las ramas, pudiendo ser evaporada o precipitada desde el dosel hacia el suelo o escurrida hacia el suelo por las ramas y troncos configurando el proceso conocido como redistribución de la precipitación. Esta redistribución puede variar según la estructura del dosel, la cantidad e intensidad del evento de lluvia y la velocidad del viento (Alonso, 2011; Munka, 2017). La fracción de la precipitación que alcanza el suelo también es controlada por la vegetación que en función de su mayor rugosidad superficial reduce la velocidad de escurrimiento superficial y por lo tanto los procesos erosivos del suelo (Alonso, 2011; Von Stackelberg et al., 2007).

En un estudio de la Comisión Nacional de Fomento Rural y Universidad de la República (CNFR & Udelar, 2016) en Uruguay, donde se evaluaron los registros pluviométricos, sobre montes de *Eucalyptus* sp. de 6 y 7 años con diferentes arreglos y densidades de plantación, se observó que las mediciones de lluvia en la situación de mayor densidad de árboles fueron superiores fuera de monte y totalizaron unos 300 mm más de precipitación. Mientras que, en los casos de montes con menor densidad de árboles, 979 arb./ha y 626

arb./ha, la lluvia acumulada dentro del monte fue del orden de 300 mm y 400 mm superior que la registrada fuera del monte, respectivamente.

#### 2.5.4. Disponibilidad de nutrientes

La introducción de los árboles en los pastizales contribuye a incrementar la densidad de individuos por área, así como la diversidad de estos, lo cual parece influir de forma positiva en los nutrientes del suelo y especialmente, en el nitrógeno disponible (Sánchez et al., 2003). Diversos estudios que analizan la dinámica de los nutrientes en el sotobosque indican mejoras en la fertilidad del suelo y un eficiente reciclaje de los nutrientes por el retorno al suelo de hojas, frutas, ramas, heces y orines (Crespo, 2008).

La presencia de árboles en los sistemas puede aumentar la disponibilidad de nitrógeno para las plantas, lo que puede favorecer su crecimiento y desarrollo ya que la presencia de árboles influye en la creación de un ambiente propicio para una mayor actividad microbiana, encargada de la descomposición de la materia orgánica, lo que implica una mayor liberación de nitrógeno mineralizado (Cruz et al., 1999).

Respecto a los procesos de reciclaje que se observa en los sistemas silvopastoriles, es que el componente arbóreo es capaz de translocar los nutrientes de las capas más profundas del suelo a las capas superficiales y estos quedan disponibles a las pasturas que presentan raíces superficiales, reduciendo las pérdidas por lixiviación (Beer et al., 2003; Fernández Mayer, 2017).

En los sistemas silvopastoriles, las diferentes especies de pastos, árboles y arbustos acumulan durante su ciclo vegetativo la materia sintetizada, que parte de ésta será de nuevo retornada al suelo mediante exudados radiculares y restos como las hojas, ramas, cortezas, flores y frutos, los cuales componen el mantillo. Los compuestos que se acumulan en la superficie del suelo y se descomponen, incrementando los niveles de materia orgánica del suelo (Fedrigo et al., 2017; González Hernández & Gallardo, 1982). Esta acumulación de materia orgánica tiene un impacto significativo en la calidad y fertilidad del suelo, ya que mejora su estructura y capacidad para retener nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas (Fedrigo et al., 2017). Como menciona Pentón-Fernández (2000), en los sistemas silvopastoriles, la hojarasca de los árboles puede representar una importante proporción de los nutrientes depositados en el suelo por el estrato herbáceo, lo que puede contribuir a mantener la productividad del pastizal.

En este sentido, Sharrow e Ismail (2004) destacan que un importante aporte de la forestación a los sistemas ganaderos es el incremento de la captación de carbono orgánico en el suelo, que fomenta las estrategias ambientales referidas a gases de efecto invernadero y huella de carbono. La presencia de árboles en los sistemas silvopastoriles contribuye a la captura de carbono atmosférico y su almacenamiento en forma de materia orgánica en el suelo. La captación de carbono de los sistemas silvopastoriles ocurre por dos vías: el suelo y el árbol (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2007).

La introducción de árboles al sistema provoca cambios en las propiedades químicas del suelo. Se han reportado trabajos que revelan una disminución del pH del suelo, aumento de la acidez intercambiable y disminución del contenido de Ca, Mg y K de los suelos debido al cambio de uso de la tierra de pastoril a forestal (Fedrigo et al., 2017). Estos cambios en la acidez del suelo y en el aluminio intercambiable podrían tener un efecto negativo en las especies forrajeras, sin embargo, se desconocen las magnitudes de estos cambios (Fedrigo et al., 2017).

Por último, los sistemas silvopastoriles son también una opción para revertir los procesos de degradación de los pastizales (Ramachandran Nair et al., 2009), al aumentar la protección física del suelo y contribuir a la recuperación de la fertilidad con la intervención de leguminosas que fijan nitrógeno al suelo y de árboles de raíces pivotantes que aprovechan las capas profundas y reciclan los nutrientes.

#### 2.5.5. Radiación

Entre los principales aspectos microclimáticos afectados por los árboles, la radiación solar incidente en el sotobosque juega un papel destacado, junto con la humedad y la temperatura del aire y del suelo (Viñoles et al., 2017). La introducción de árboles tiene un efecto significativo en las condiciones microclimáticas, tanto en el área donde son incorporados como en áreas contiguas. Estos efectos son especialmente notorios en el balance neto de radiación y en los procesos de masa y energía (Munka, 2017).

Las características del dosel forestal del sistema silvopastoril determinan la cantidad y calidad de radiación que atraviesa el mismo. La radiación se reduce y transforma en radiación difusa, al atravesar las copas de los árboles, y esto resulta en una menor cantidad y proporción de radiación fotosintéticamente activa que llega a los estratos inferiores. Además, la radiación directa al suelo se ve reducida debido a la cobertura forestal, así

como el flujo saliente de energía emitido por el suelo también se ve afectado (Munka, 2017). Esta modificación de la radiación influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas forrajeras, induciendo cambios morfológicos como el alargamiento de hojas, la reducción del peso específico foliar y una menor producción de macollos (Belesky, 2005; Monaco & Briske, 2000).

Como se mencionó anteriormente, el sombreado generado por los árboles, no solo reduce la cantidad de radiación de onda corta que llega al suelo, sino que también altera el balance neto de energía en el microclima del sotobosque. Esto crea ambientes más frescos, con menores amplitudes térmicas y mayor humedad relativa. Estos cambios dependen de las características de la cubierta forestal, como la densidad, el arreglo de los árboles y la altura del dosel (Munka, 2017). Es importante destacar que el efecto del sombreado incluye la disminución en la relación rojo / rojo lejano y una reducción en la irradiancia azul, lo que afecta los procesos metabólicos y productivos de las plantas forrajeras (Fedrigo et al., 2018).

Para lograr un equilibrio productivo entre el componente arbóreo y pastoril, es esencial manejar adecuadamente la luminosidad, lo cual puede lograrse a través del diseño espacial de las plantaciones, así como mediante podas y raleos (Gallo, 2006). Los sistemas silvopastoriles bien diseñados, permiten una mayor captación e integración de la radiación solar, optimizando su uso a través de los distintos estratos del sistema (Viñoles et al., 2017). Un manejo eficiente puede mejorar las interacciones ecológicas beneficiosas, aumentando la productividad por unidad de área y la eficiencia en el uso de recursos, al tiempo que mejora aspectos ambientales (Peri, 2005).

## **2.6 Orientación del componente forestal**

La planificación del diseño de plantación de árboles en sistemas silvopastoriles es clave para lograr un equilibrio productivo entre los diversos componentes del sistema. La utilización de modelos de simulación de sombras facilita la toma de decisiones en la planificación y el manejo del componente forestal en sistemas silvopastoriles (Benítez et al., 2019). Los resultados de Benítez et al. (2019) muestran que para la latitud del departamento de Cerro Largo (Uruguay), en parcelas de Eucaliptus híbrido, la parcela N-S presentó un rango anual de superficie de sombreado entre 29 % y 34 %, y la parcela E-O de 29 % y 92 % respectivamente, para los solsticios de verano y de invierno. El promedio anual de superficie sombreada a las 12 p.m fue de 33% para N-S y de 63% para

la orientación E-O. Los resultados indican que la orientación N-S presenta menor variabilidad anual y mayor radiación acumulada en el sotobosque. Esto concuerda con estudios previos que señalan que la orientación N-S favorece una mayor incidencia de radiación en latitudes medias. Sin embargo, es esencial profundizar en el entendimiento de las variaciones espaciales y temporales de la radiación solar para optimizar la planificación del manejo silvícola, asegurando niveles de radiación apropiados para el desarrollo de las especies que habitan el sotobosque.

Por otro lado, Silveira et al. (2018) realizaron un experimento el cual tuvo como objetivo caracterizar la composición, riqueza, y diversidad de comunidades de sotobosque para marcos de plantación N-S y E-O. Los autores destacan que los mayores valores en el número de familias, géneros y especies se asocian a ambientes donde llega más radiación. Dupraz et al. (2018) demostraron que en latitud baja ( $25^\circ$ ), la irradiancia solar disponible para los cultivos del sotobosque fue mayor con líneas de árboles E-O. Estos autores recomiendan líneas de árboles de N-S en latitudes altas y líneas de árboles E-O en latitudes bajas. En latitudes bajas, la irradiancia es mayor con líneas de árboles orientadas de este a oeste debido a la trayectoria del sol, que sigue este eje la mayor parte del año. Con esta orientación, las sombras largas de la mañana y la tarde caen sobre otros árboles, y al mediodía, cuando el sol está cerca del cenit, las sombras son cortas. Esto genera alto sombreado entre los árboles y poco sombreado sobre la entre-fila. En cambio, con orientación norte-sur, el callejón recibe más sombra (Dupraz et al., 2018). Para latitudes medias, como en el caso de Uruguay, los autores recomiendan líneas de árboles de N-S para lograr una homogeneidad de irradiancia incidente al cultivo, debido al movimiento aparente del sol en todas las épocas del año.

## **2.7 Persistencia y mortalidad en sistemas silvopastoriles**

Las plantas que crecen en el sotobosque se encuentran en un ambiente luminoso modificado, donde el mismo cambia bruscamente a lo largo del día, alterando no solo la cantidad, sino también la calidad y la frecuencia de la radiación disponible para las plantas forrajeras establecidas en el sotobosque (Varella, 2012). Esto limita la capacidad de las forrajeras para acumular carbono a tasas comparables con aquellas que crecen a pleno sol, afectando así su capacidad de almacenar reservas (Varella, 2012). Esta limitación puede acentuarse debido a la estrategia de estas plantas, que movilizan el carbono almacenado en sus raíces para favorecer el crecimiento de sus partes aéreas. A su vez, el

crecimiento de las especies forrajeras está determinado por su actividad fotosintética neta diaria acumulada frente a los recursos ambientales disponibles, entre ellos la luz, cuando están expuestas al sombreado, la tasa de crecimiento diaria de estas especies se restringe rápidamente debido a la limitación de energía necesaria para los procesos fotosintéticos (Varella, 2012). Uno de los factores que es mayormente afectado por el ambiente lumínico modificado del sotobosque es el macollaje, es por ello que, tanto la dinámica poblacional de las pasturas, es decir la persistencia y la mortalidad de los macollos, son un factor importante para considerar en los sistemas silvopastoriles.

La persistencia de las praderas se puede analizar en términos de la contribución del nacimiento y la muerte en el tiempo, en la densidad poblacional de macollos (Matthew et al., 2013). La proporción de una población que sobrevive a un determinado periodo de tiempo y la tasa de natalidad de la población deberían sumar 1 para una población estable, pero si se asume que los juveniles no generan nacimientos, la tasa de natalidad requerida para una población estable aumenta bruscamente con una menor supervivencia.

La natalidad y la supervivencia también pueden cambiar estacionalmente, en cuyo caso la estabilidad de la población debe evaluarse a lo largo de todo el ciclo anual (Matthew & Hamilton, 2011). La fluctuación de la densidad poblacional de macollos es el mecanismo por el que las praderas optimizan la interceptación de la luz cuando cambia la altura de la pradera, pero cabe destacar que una densidad poblacional de macollos más baja no es necesariamente una prueba de degradación de la pradera (Matthew et al., 1995).

Para enfrentar el efecto de la sombra, las plantas también desarrollan dos estrategias de competencia por la luz como el escape o evasión y la tolerancia. La evasión de la sombra se caracteriza por la inducción de rasgos para alcanzar la luz, como la elongación del tallo y el pecíolo, dominancia apical, movimiento de hojas hacia arriba (hiponastia), macollaje y ramificación reducidos en plantas de altura similar (Gommers et al., 2013). Por otro lado, la tolerancia a la sombra refiere a la capacidad de ciertas plantas para sobrevivir en ambientes sombreados ya que las forrajeras no pueden competir en altura con los árboles (Gommers et al., 2013).

Una especie de pasto tolerante a la sombra necesita tener una buena producción anual y estacional de materia seca bajo defoliación y poder regenerarse. En el experimento de Devkota et al. (1997), las especies más tolerantes a la sombra fueron aquellas que mantuvieron un rendimiento absoluto y relativo de brotes comparativamente alto en PAR

bajo, debido a que mantuvieron una mayor área foliar y un mayor número relativo de macollos o ramas.

Las teorías sobre cómo responden las plantas a la sombra difieren. Según Belesky (2005), las plantas responden al suministro de recursos favoreciendo estructuras y funciones que mejoren la captura de estos. En un trabajo de Belesky et al. (2011), los autores mencionan que las plantas en el sitio arbolado extendieron las hojas rápidamente, pero tenían menor cantidad de carbohidratos no estructurales y menos macollos. Estos autores destacan que *Dactylis glomerata*, mantuvo producción de hojas y tallos en los lugares sombreados, lo que sugiere que la especie es adecuada para su uso en silvopastoreo. Sin embargo, este comportamiento no se observó para *Lolium arundinaceum* (Belesky et al., 2011). Por otro lado, los autores mencionan que la producción de tallos de *Lolium arundinaceum* y *Dactylis glomerata* fue mayor en los lugares sin sombra y menor en los sombreados.

La recuperación de la población después de la muerte de los macollos es un tema clave y está influenciada por el régimen de pastoreo. En todos los casos, cualquier periodo de supervivencia reducida de los macollos indica una intolerancia al estrés que puede amenazar la persistencia (Matthew et al., 2013).

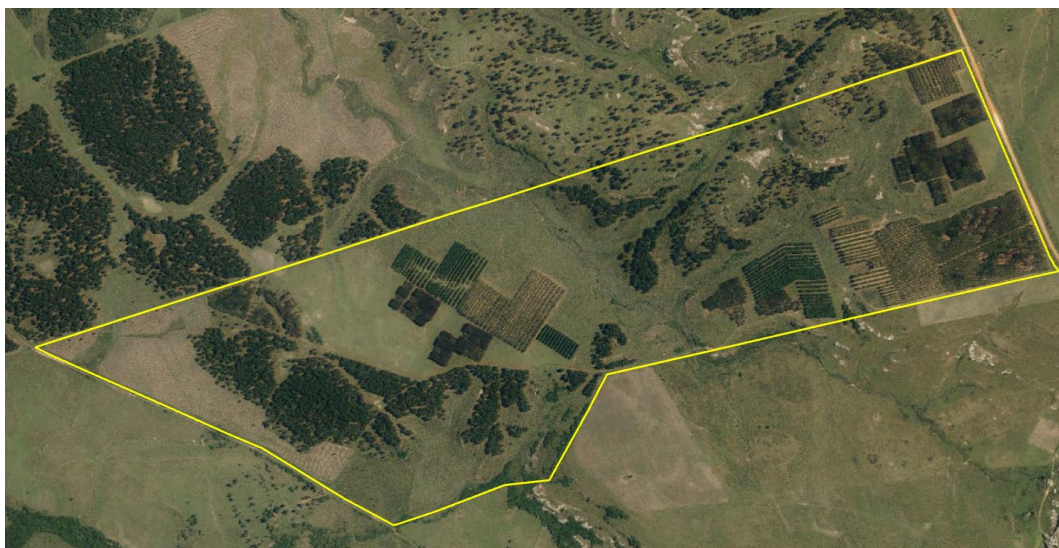
### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización y tipo de suelo

El presente estudio fue realizado en la localidad de Fraile Muerto, Cerro Largo, Uruguay. Las coordenadas del sitio son latitud  $32^{\circ}37'10.59''\text{S}$  y longitud  $54^{\circ}28' 2.27''\text{W}$ , en un predio correspondiente al padrón 11249 (Figura 1).

#### Figura 1

*Ubicación del ensayo*

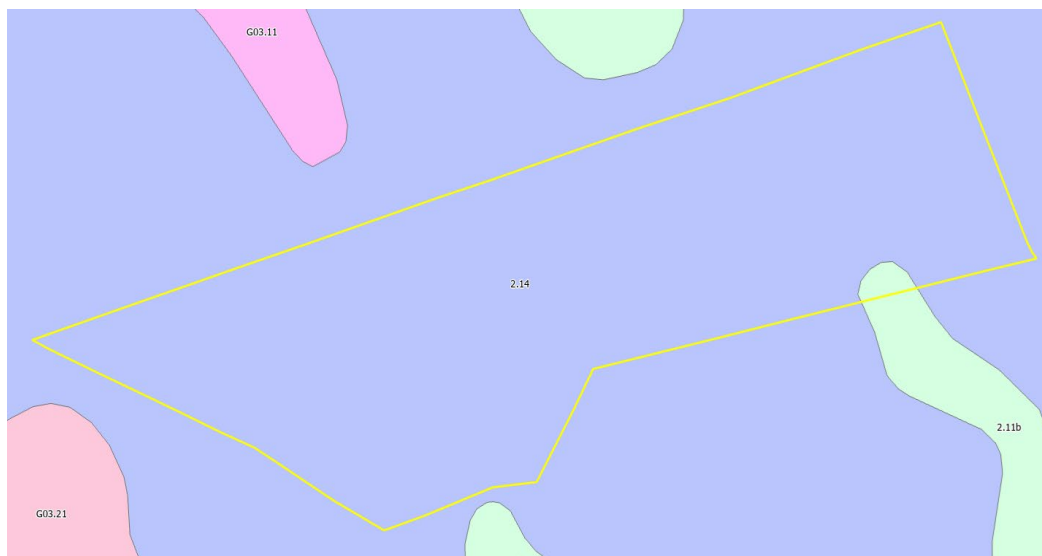


*Nota.* Adaptado de Google (2026).

Según la carta de reconocimiento de suelos de Uruguay (Altamirano et al., 1976), el predio se encuentra en el límite de las Unidades Fraile Muerto y Tres Islas. Sin embargo, debido a sus características, corresponde a la Unidad Tres Islas. El material generador se compone de sedimentos arenosos, mientras que la vegetación natural es campo natural con predominancia de especies estivales, que generan una fisionomía heterogénea por la coexistencia de gramíneas postradas y erectas (formadoras de matas). Aunque en el predio se encuentran otros tipos de suelo, para el presente estudio las unidades experimentales (parcelas) se localizaron exclusivamente en suelos del grupo 2.14, según la clasificación CONEAT (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca [MGAP], 2020) (Figura 2).

## Figura 2

### Grupos CONEAT comprendidos en el predio del ensayo



*Nota.* Color violeta: grupo CONEAT 2.14, color verde: grupo CONEAT 2.11b, color rosa: grupo CONEAT G03.21, color fucsia: grupo CONEAT 03.11. Para obtener esta figura se ingresó al visualizador online de RENARE. Se ingresó el departamento y el padrón correspondiente. Luego, una vez realizada la búsqueda, se abrió el archivo PDF que se genera y se obtuvo la imagen junto con la información detallada de cada tipo de suelo. Adaptado de la Dirección General de Recursos Naturales (DGRN, s.f.).

En el caso del grupo de suelos 2.14, el índice de productividad es de 61. Según la descripción CONEAT (MGAP, 2020), estos suelos corresponden a

sierras no rocosas, de relieve ondulado fuerte a quebrado o escarpado, con afloramientos rocosos y pendientes entre 3 y 12%. El material generador está compuesto por areniscas, a veces silicificadas, y tillitas de la formación San Gregorio - Tres Islas, o bien por mantos de alteración profundos de rocas cristalinas. Los suelos pertenecen a las clases luvisoles ócricos úmbricos (ocasionalmente melánicos) típicos (a veces abrupáticos), arenosos a franco arenosos ródicos (praderas arenosas rojas); asociados con brunosoles dístricos lúvicos, arenoso francos y arenosos, moderadamente profundos, ródicos (praderas arenosas), y litosoles dístricos/subéutricos ócricos/úmbricos, arenoso francos y francos, además de inceptisoles úmbricos franco arenosos gravillosos. Esta región presenta una amplia extensión de sedimentos gruesos de la formación Tres Islas, que se extiende desde Arévalo, pasando por Tres Islas y Cerro de las Cuestas,

hasta el paso de la Cruz sobre el Río Tacuarí. También se observan áreas discontinuas de materiales de alteración de rocas cristalinas en diversos puntos: Isla Patrulla, Zapicán, Tupambaé y la región serrana ubicada entre la ruta 26 y Paso Centurión en el departamento de Cerro Largo. La vegetación corresponde a pradera estival y su uso actual es pastoril. Los suelos de este grupo integran las unidades Tres Islas y parte de la Sierra de Polanco, según la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.). Índice de productividad 61 (MGAP, 2020, párr. 2.14).

De acuerdo con el análisis de suelo realizado inmediatamente antes de la implantación del experimento (marzo de 2019), el suelo presentó las siguientes características: textura franco-arcillosa (43% de arena, 29% de limo y 28% de arcilla), fósforo (ppm) = 7, pH (H<sub>2</sub>O) = 4,9, % de carbono orgánico = 2,76 y % de materia orgánica = 4,77.

### 3.2. Diseño experimental

Los árboles de *Eucalyptus grandis* fueron plantados en 2009 con orientaciones N-S y E-O. En 2018, se logró una densidad final de 147 árboles ha<sup>-1</sup> (3,4 m entre árboles y 20 m entre hileras) y los mismos habían alcanzado una altura de 30 m. El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con tres repeticiones, siendo los factores evaluados: 1) Marco de plantación silvopastoril y 2) la especie forrajera.

Los tratamientos basados en el marco de plantación silvopastoril (parcela principal) fueron:

- Control: condición de pleno sol sin la interferencia del componente arbóreo.
- Norte-Sur: cultivos arbóreos con hileras simples orientadas en sentido norte-sur.
- Este-Oeste: cultivos arbóreos con hileras simples orientadas en sentido Este-Oeste.

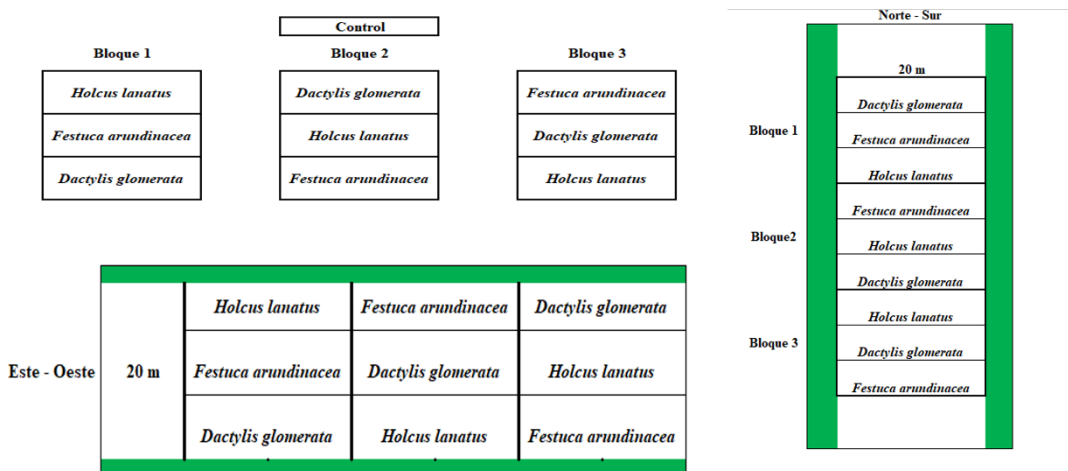
En las distintas condiciones mencionadas anteriormente, fueron cultivadas las siguientes especies forrajeras:

- *Lolium arundinaceum* Rizar IGP12
- *Dactylis glomerata* INIA LE Oberón
- *Holcus lanatus* INIA Virtus.

Las dimensiones de las parcelas fueron 20 m × 3,4 m (68 m<sup>2</sup>) en los experimentos ubicados a sombra, mientras que las parcelas bajo condiciones de sol fueron 5 m × 3 m (15 m<sup>2</sup>, Figura 3).

**Figura 3**

*Diseño experimental*



### 3.3. Manejo del experimento

Para el adecuado establecimiento de los monocultivos forrajeros del presente experimento, fue realizado un corte de la vegetación existente a 5 cm en el día 15 de enero de 2019. Posteriormente, el día 23 de enero fue realizada la pulverización del área con el herbicida glifosato (Roundup®) a una dosis de 4 l há<sup>-1</sup>. Por tratarse de un herbicida de amplio espectro que permite la eliminación de hierbas perennes, el control posibilitó la eliminación total de las especies presentes, incluso de *Cynodon dactylon* que presentaba proporciones elevadas.

Las especies forrajeras fueron sembradas por medio de simulación de siembra directa en marzo de 2019. La dosis de siembra fue de 14, 12 y 7 kg/ha de semillas para *Lolium*, *Dactylis* y *Holcus* respectivamente. La siembra fue realizada por medio de la preparación del área con una sembradora directa, pero sin semillas, que permitió marcar líneas como guía para la posterior siembra manual.

Todos los tratamientos se fertilizaron con nitrógeno y fósforo de acuerdo con las recomendaciones del análisis de suelo. Específicamente, al momento de la siembra se aplicaron 50 kg de N ha<sup>-1</sup> y 120 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ha<sup>-1</sup>. Adicionalmente, se reaplicaron 150 kg de N ha<sup>-1</sup> en tres dosis divididas de 50 kg N ha<sup>-1</sup> cada una en octubre, noviembre y

diciembre de 2019. A modo de simular el pastoreo de animales, la masa de forraje en todas las unidades experimentales se cosechó mecánicamente mediante una cortadora de césped, cada 30 días de octubre a diciembre, dejando consistentemente una altura residual de 10 cm.

### **3.4. Variables evaluadas**

#### 3.4.1. Evaluación de las variables microclimáticas

Durante el período de setiembre de 2019 hasta mayo de 2020, se realizaron las evaluaciones de variables microclimáticas. La radiación fotosintéticamente activa (PAR) acumulada, el déficit de presión de vapor (VPD), la temperatura del suelo y del aire, las precipitaciones, el contenido de humedad del suelo y humedad relativa, fueron monitoreados con sensores (QSOS-PAR, Apogee Instruments) en cada tratamiento. Los sensores fueron instalados en el tratamiento control, y en distintas posiciones en cada condición de sotobosque (uno en el medio del callejón de árboles y otro en contra de la fila de árboles). Los sensores utilizados fueron acoplados a un datalogger (Em50, Decagon®) programado para realizar mediciones a una frecuencia de 5 minutos.

#### 3.4.2. Evaluación de la dinámica poblacional de macollos

Durante el período de diciembre de 2019 hasta abril de 2020, se realizó mensualmente la evaluación de la dinámica poblacional de macollos en todas las unidades experimentales, totalizando 5 fechas de muestreo. En cada parcela, se colocaron estratégicamente tres marcos fijos de  $0,1 \times 0,1$  m: uno cerca del callejón, otro en el centro de la parcela y otro cerca de la hilera de árboles. Todos los macollos dentro del marco se contaron e identificaron con hilos del mismo color (Hernández-Garay et al., 1993). En cada evaluación, se utilizó un nuevo color para identificar la nueva generación de los macollos, y también se contabilizaron los macollos vivos de las generaciones anteriores.

La variable densidad de población de macollos (DPM), se estimó contando la cantidad total de macollos en cada marco para cada fecha, expresada en metros cuadrados. La supervivencia de los macollos se estimó como el porcentaje de macollos vivos en relación con el primer conjunto de datos (primera generación de macollos) y la tasa de mortalidad y la tasa de aparición de macollos se estimaron como el porcentaje de macollos que

murieron y aparecieron, respectivamente, para cada fecha en relación con la evaluación anterior.

### **3.5. Análisis estadístico**

Las variables de DPM, el porcentaje de supervivencia de la primera generación (PSM), la tasa de muerte de macollos (TMM) y la tasa de aparición de macollos (TAM), fueron analizadas utilizando un modelo general combinado (Moore & Dixon, 2015) mediante el software SAS University Edition (SAS/STAT®, SAS Institute Inc., Carolina del Norte, EE. UU.). Las medias de los tratamientos fueron comparadas mediante el Test de Tukey ( $P < 0.05$ ), tanto para las especies como para las fechas dentro de cada condición microclimática, así como para las fechas y las condiciones dentro de cada especie. Los datos meteorológicos diarios, tanto a plena luz del sol como en ambas condiciones del sotobosque, se analizaron mensualmente.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Condiciones microclimáticas del ensayo

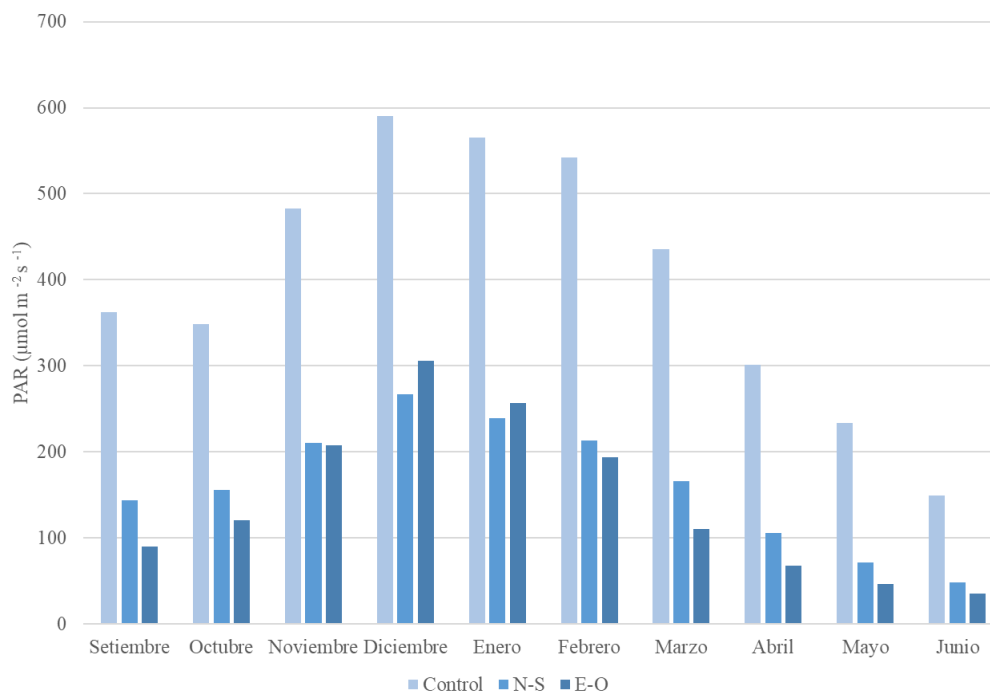
A continuación, se presentarán los resultados de las condiciones microclimáticas del periodo experimental, que incluirán la radiación fotosintéticamente activa (PAR), el déficit de presión de vapor (VPD), la temperatura del suelo y del aire, las precipitaciones, contenido de humedad del suelo y humedad relativa. Luego se analizará su influencia en los resultados obtenidos respecto a población en la densidad poblacional de macollos.

#### 4.1.1. Radiación fotosintéticamente activa (PAR)

En la Figura 4 se puede observar que la PAR medida que llegó a la pastura varió según el mes y el tratamiento. El tratamiento control tuvo mayor PAR a lo largo de todo el año respecto a los tratamientos N-S y E-O, ya que el control no contaba con la presencia de árboles. Si se comparan los tratamientos N-S y E-O, se puede observar que la orientación N-S permitió que llegara mayor PAR al sotobosque a lo largo de todo el año, con excepción de los meses de diciembre y enero. La orientación de los árboles E-O mostró valores de PAR más bajos durante la mayor parte del año, con alrededor del 30 % de los niveles de radiación en el sotobosque respecto al control. Esto contrasta con la orientación de los árboles N-S, donde el sotobosque recibió aproximadamente el 40 % de PAR respecto al control (Figura 4).

#### Figura 4

*Radiación fotosintéticamente activa ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) según mes (setiembre 2019 hasta junio 2020) y tratamiento*



Estos resultados evidencian que en el caso de la orientación E-O, la radiación solar era interceptada por el componente arbóreo, motivo por el cual se presentaba la condición de sombreado la mayor parte del tiempo. Sin embargo, en diciembre y enero, el sol se encuentra a mayor altura y debido a que este sigue el recorrido de la entre fila, se observan mayores valores de PAR en esos meses. Los resultados obtenidos confirman que la orientación cardinal en sistemas silvopastoriles determina modificaciones espaciales y temporales en el microclima del sotobosque, generando un gradiente de respuesta productiva del componente forrajero (Belesky, 2005). Estos resultados coinciden con Dupraz et al. (2018), autores que calcularon la radiación disponible para los cultivos en un sistema de cultivo en callejones en cinco latitudes ( $25^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $65^\circ$ ), dos distancias entre hileras de árboles (17 m vs. 35 m) y dos orientaciones de las hileras de árboles (N-S y E-O), para el hemisferio Norte (por lo que la estacionalidad se interpreta invertida). Estos autores observan para latitudes cercanas al Uruguay (entre  $30^\circ$  y  $35^\circ$ ), en los meses de diciembre y marzo, la orientación N-S tenía mayores niveles de PAR que orientaciones E-O y, por el contrario, en los meses de junio y setiembre, los autores observaban que la orientación E-O tuvo mayores niveles de PAR (Dupraz et al., 2018).

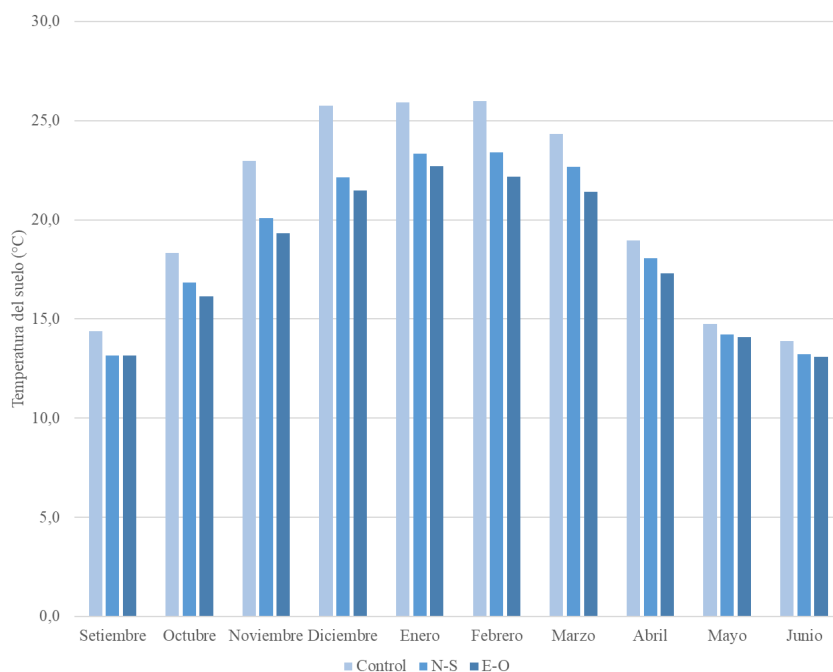
Esta diferencia entre Dupraz et al. (2018) y el presente ensayo podría deberse a la diferente distancia entre hileras de los cultivos.

#### 4.1.2. Temperatura del suelo

En la Figura 5 se puede observar que hubo un incremento progresivo de la temperatura del suelo para todos los tratamientos a lo largo del ensayo, observándose en los meses de verano los mayores valores (por encima de 25°C) y en los meses de invierno los menores (en torno a 15°C). A su vez, se puede observar que la temperatura del suelo siempre fue mayor en el tratamiento control que en los tratamientos N-S y E-O. Por otra parte, se observa que la temperatura del suelo presentó valores mayores en la orientación N-S respecto a E-O.

#### **Figura 5**

*Temperatura del suelo (°C) según mes (desde setiembre 2019 hasta junio 2020) y tratamiento*



Se puede observar que, en verano, los sistemas silvopastoriles presentan 3°C menos aproximadamente que el tratamiento sin componente arbóreo, es decir, que la presencia del mismo amortigua los cambios en la temperatura del suelo. Estos datos coinciden con Bahamonde et al. (2009), ya que los autores afirman que se han registrado reducciones de 3,8°C en verano en sistemas con componente arbóreo de una altura promedio de 6 a 8

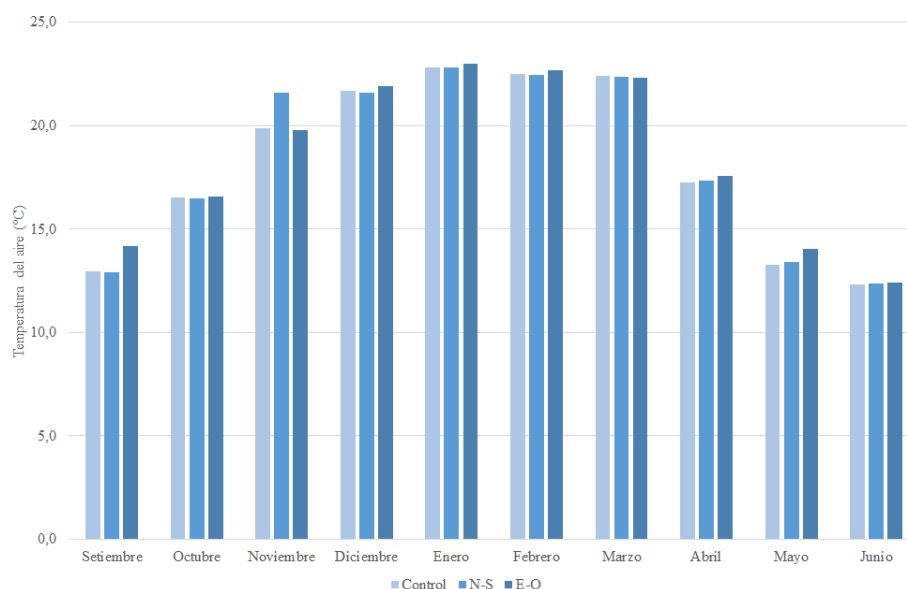
metros y de 2,1°C en árboles menores a 6 metros. Esta menor amplitud térmica en los sistemas silvopastoriles es positiva para el crecimiento de las especies forrajeras, ya que a altas temperaturas del suelo se podría inhibir la fotosíntesis de estas y la producción de nuevas hojas y macollos (Wang et al., 2003).

#### 4.1.3. Temperatura del aire

En la Figura 6 se puede observar que hubo un incremento progresivo de la temperatura para todos los tratamientos a lo largo del ensayo, observándose un promedio de 22°C aproximadamente en los meses de verano y de 12°C aproximadamente en los meses de invierno. A diferencia de la temperatura del suelo, la temperatura del aire promedio fue similar para los tres tratamientos a lo largo de todo el ensayo (Figura 6). Esto puede deberse a que los sensores de temperatura del aire estuvieron siempre a la sombra (tanto en los tratamientos de sotobosque como en el control) y a la proximidad física entre los distintos tratamientos.

#### Figura 6

*Temperatura del aire (°C) según mes (desde setiembre 2019 hasta junio 2020) y tratamiento*



Si bien la temperatura del aire promedio fue similar para los tres tratamientos, se pudo observar que, en verano, la amplitud térmica fue mayor en el tratamiento control, seguido por el tratamiento N-S y, por otro lado, el tratamiento E-O fue el que presentó menor amplitud (Tabla 1). A su vez, en verano, el tratamiento control tuvo mayores temperaturas

máximas. Por su parte, en otoño, la mayor amplitud térmica se observó en el tratamiento control y en el tratamiento E-O, al igual que en primavera. Estos datos coinciden con Fedrigo et al. (2017), quienes destacan que la amplitud térmica es menor en áreas de sotobosque. Estos autores mencionan que en Uruguay hay disminuciones de entre 2-3 °C en los meses de mayor temperatura y que en los meses más fríos, las temperaturas nocturnas son mayores en áreas de sotobosque. A su vez, los datos del presente trabajo coinciden con lo mencionado por Munka (2017), quien afirma que las temperaturas máximas son menores y las temperaturas mínimas son mayores en áreas de sotobosque respecto a áreas sin árboles.

**Tabla 1**

*Temperatura mínima, temperatura máxima y amplitud térmica (rango), según mes y tratamiento*

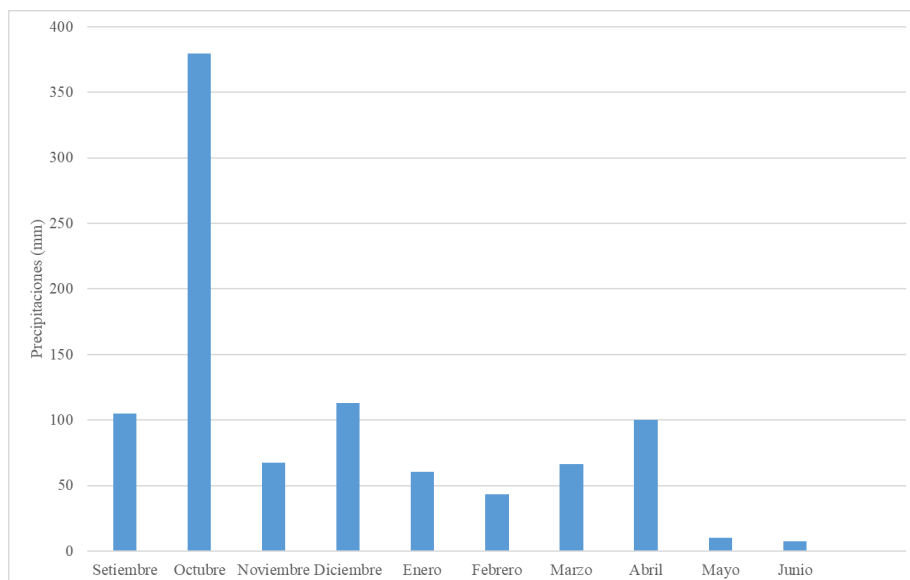
Tratamiento	Mes	Temp. min. (°C)	Temp. max. (°C)	Amplitud térmica (°C)
Control	Setiembre	-2,5	32,2	34,7
	Octubre	5,5	30,2	24,7
	Noviembre	8,5	32,7	24,2
	Diciembre	5,3	36,6	31,3
	Enero	7,7	35,5	27,8
	Febrero	6,6	36,3	29,7
	Marzo	9,9	36,8	26,9
	Abril	3,2	31,3	28,1
	Mayo	-1,5	28,5	30,0
	Junio	-2,6	25,3	27,9
N-S	Setiembre	-1,8	31,9	33,7
	Octubre	6,2	29,4	23,2
	Noviembre	9,2	31,2	22,0
	Diciembre	5,6	36,2	30,6
	Enero	8,5	34,6	26,1
	Febrero	6,9	35,6	28,7
	Marzo	10,6	36,9	26,3
	Abril	3,6	30,4	26,8
	Mayo	-0,5	27,8	28,3
	Junio	-1,7	25,0	26,7
E-O	Setiembre	1,0	31,6	30,6
	Octubre	3,7	32,2	28,5
	Noviembre	7,1	35,7	28,6
	Diciembre	7,0	36,9	29,9
	Enero	10,0	35,9	25,9
	Febrero	8,1	35,6	27,5
	Marzo	7,9	35,9	28,0
	Abril	5,6	30,1	24,5
	Mayo	-0,2	28,3	28,5
	Junio	-0,8	24,7	25,5

#### 4.1.4. Precipitaciones del período

Si bien no se pudo evaluar las precipitaciones en los sistemas silvopastoriles, se presentan las mediciones obtenidas para el tratamiento control (Figura 7).

#### **Figura 7**

*Precipitaciones (mm) según mes (desde setiembre 2019 hasta junio 2020) en el tratamiento control*



Se pudo observar que en octubre se registraron las mayores precipitaciones acumuladas de todo el ensayo. Por otro lado, en los meses de mayo y junio se registraron las menores precipitaciones acumuladas de todo el periodo. Los datos no permiten hacer una comparación entre los distintos tratamientos, pero como menciona Munka (2017), se esperaría que en los tratamientos N-S y E-O, la precipitación sea menor que la registrada en áreas sin árboles debido a que la lluvia es interceptada por la cubierta forestal pudiendo ser evaporada o precipitada desde el dosel al suelo. A su vez, los árboles pueden reducir escurrimiento superficial, modificar la dinámica del agua disponible en el suelo produciendo disminución de su disponibilidad subterránea (Munka Moreno, 2010).

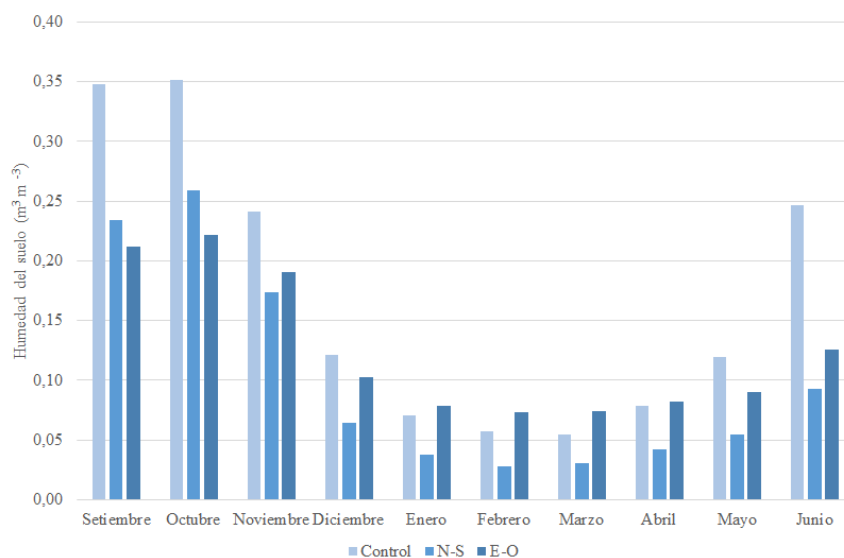
#### 4.1.5. Humedad del suelo

En la Figura 8 se puede observar que el tratamiento control tuvo mayor humedad del suelo desde setiembre 2019 a enero 2020. Dichos resultados coinciden con Munka Moreno (2010) y Munka (2017), donde los autores reconocen que, en sistemas silvopastoriles,

parte de la precipitación puede ser interceptada por el componente arbóreo, disminuyendo la cantidad de agua que alcanza el suelo. Por otro lado, a partir de enero y hasta abril, es decir a partir de los meses más calurosos, el tratamiento que mantuvo mayor humedad del suelo fue el tratamiento E-O. Esto coincide con que, en estos meses, la temperatura del suelo fue menor para este tratamiento.

### Figura 8

*Humedad del suelo ( $m^3 m^{-3}$ ) según mes (desde setiembre 2019 hasta junio 2020) y tratamiento*

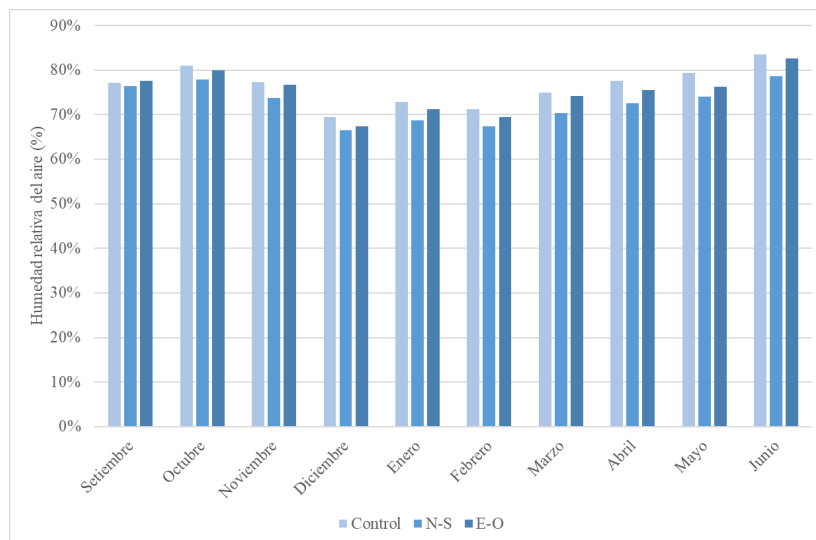


#### 4.1.6. Humedad relativa del aire

En la Figura 9, se puede observar la humedad relativa del aire a lo largo de los meses del ensayo. Esta variable fue bastante constante a lo largo de todo el periodo y se puede observar que siempre fue levemente mayor en el tratamiento control y menor en el tratamiento N-S. Estos resultados no coinciden con Bahamonde et al. (2009) y Munka (2017), quienes mencionan que la humedad relativa del aire generalmente es mayor en las áreas con cobertura de bosque, aunque la magnitud del cambio depende de su altura.

**Figura 9**

*Humedad relativa del aire (%) según mes (desde setiembre 2019 hasta junio 2020) y tratamiento*



#### **4.2. Densidad de población de macollos**

A continuación, en la Tabla 2, se puede observar la densidad poblacional de macollos promedio según mes de evaluación, especie y tratamiento.

**Tabla 2**

Densidad poblacional de macollos promedio (macollos/m<sup>2</sup>) según mes de evaluación, según especie y tratamiento

Trat.	Esp.	Mes de evaluación				
		Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
C	<i>Dactylis</i>	3017 <sup>ABC</sup>	2317 <sup>BC</sup>	2600 <sup>BC</sup>	2333 <sup>B</sup>	1750 <sup>BC</sup>
	<i>Lolium</i>	4500 <sup>AB</sup>	4167 <sup>A</sup>	4517 <sup>A</sup>	3967 <sup>A</sup>	3317 <sup>A</sup>
	<i>Holcus</i>	4667 <sup>A</sup>	2500 <sup>BC</sup>	1400 <sup>CD</sup>	800 <sup>CD</sup>	533 <sup>CD</sup>
E-O	<i>Dactylis</i>	2289 <sup>C</sup>	1833 <sup>BCD</sup>	2422 <sup>BC</sup>	2467 <sup>B</sup>	2056 <sup>ABC</sup>
	<i>Lolium</i>	3044 <sup>ABC</sup>	2811 <sup>B</sup>	2900 <sup>B</sup>	2356 <sup>B</sup>	944 <sup>CD</sup>
	<i>Holcus</i>	2567 <sup>C</sup>	1322 <sup>CD</sup>	511 <sup>D</sup>	22 <sup>D</sup>	0 <sup>D</sup>
N-S	<i>Dactylis</i>	1933 <sup>C</sup>	1689 <sup>BCD</sup>	2622 <sup>BC</sup>	2944 <sup>AB</sup>	2633 <sup>AB</sup>
	<i>Lolium</i>	2867 <sup>BC</sup>	2489 <sup>BC</sup>	2411 <sup>BC</sup>	1844 <sup>BC</sup>	1644 <sup>BC</sup>
	<i>Holcus</i>	2156 <sup>C</sup>	933 <sup>D</sup>	422 <sup>D</sup>	22 <sup>D</sup>	22 <sup>D</sup>

Nota. Letras mayúsculas distintas presentan diferencias estadísticas significativas dentro del mismo mes (p\_valor <0,05).

En la Tabla 2 se puede observar que *D. glomerata* mantuvo la densidad poblacional de macollos independientemente del tratamiento. Por su parte, *L. arundinaceum* tuvo mayor densidad poblacional de macollos en ambientes sin sombra en los meses de enero en adelante respecto a ambientes silvopastoriles. Sin embargo, no se encontraron diferencias entre los tratamientos de sotobosque. En *H. lanatus*, el tratamiento control tuvo mayor densidad de macollos de forma significativa respecto a los tratamientos N-S y E-O en el mes de diciembre. Sin embargo, en los otros meses, no hubo diferencias significativas. A su vez, no hubo diferencia significativa entre los tratamientos silvopastoriles.

Independientemente de sus características para tolerar condiciones de sombra, las tres especies de gramíneas estudiadas mostraron una menor densidad poblacional de macollos al final de la primavera en el sotobosque, en comparación con aquellas en pleno sol. Está

bien documentado que, en ambientes sombreados, donde los fotosintatos son limitados, la aparición de macollos se reduce debido a la asignación preferencial de estos fotosintatos a los macollos existentes, en lugar del desarrollo de nuevas yemas de macollos (Belesky et al., 2006).

#### 4.2.1. Tasas de aparición y mortalidad

Las tasas de aparición y mortalidad de los macollos presentaron diferentes comportamientos según la condición y la especie durante la duración del experimento (Tablas 3 y 4).

**Tabla 3**

*Tasa de mortalidad de macollos de Dactylis glomerata, Lolium arundinaceum y Holcus lanatus según tratamiento*

Especies	Tasa de mortalidad (macollos 1000 macollos <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )				
	Dic.-Ene.	Ene.-Feb.	Feb.-Mar.	Mar.-Abr.	Media
<b>Control</b>					
<i>Dactylis glomerata</i>	6.8 <sup>DEF</sup>	17.4 <sup>BC</sup>	8.7 <sup>DEF</sup>	12.8 <sup>CDE</sup>	11.4
<i>Lolium arundinaceum</i>	2.3 <sup>F</sup>	3.4 <sup>F</sup>	5.9 <sup>EF</sup>	7.6 <sup>DEF</sup>	4.8
<i>Holcus lanatus</i>	13.3 <sup>CD</sup>	33.2 <sup>A</sup>	22.2 <sup>B</sup>	16.1 <sup>BC</sup>	21.2
<b>Media</b>	7.7	12.2	13.1	15.7	
<b>E - O</b>					
<i>Dactylis glomerata</i>	6.1 <sup>CD</sup>	6.1 <sup>CD</sup>	4.8 <sup>CD</sup>	7.2 <sup>CD</sup>	6.1
<i>Lolium arundinaceum</i>	2.3 <sup>D</sup>	2.7 <sup>D</sup>	8.7 <sup>CD</sup>	17.1 <sup>B</sup>	7.7
<i>Holcus lanatus</i>	14.8 <sup>B</sup>	33.9 <sup>A</sup>	30.1 <sup>A</sup>	30.1 <sup>A</sup>	27.2
<b>Media</b>	7.9	9.6	14.1	11.9	
<b>N - S</b>					
<i>Dactylis glomerata</i>	3.7 <sup>DE</sup>	1.6 <sup>DE</sup>	3.5 <sup>DE</sup>	5.0 <sup>CDE</sup>	3.5
<i>Lolium arundinaceum</i>	3.8 <sup>CD</sup>	8.3 <sup>BCD</sup>	11.3 <sup>AB</sup>	4.8 <sup>CD</sup>	7.1
<i>Holcus lanatus</i>	16.4 <sup>ABC</sup>	39.6 <sup>A</sup>	34.4 <sup>AB</sup>	1.6 <sup>A</sup>	23.0
<b>Media</b>	8.2	11.2	11.6	4.3	

*Nota.* Los promedios que comparten las mismas letras dentro de cada tratamiento (control, E-O, o N-S) no muestran diferencias significativas para la interacción especie y mes de evaluación, ajustadas por la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ ).

*Holcus lanatus* fue la especie con mayor mortalidad en el experimento, y los valores máximos de la misma fueron en enero y febrero en condiciones de sotobosque (Tabla 3). Por otro lado, *L. arundinaceum* mostró una alta tasa de mortalidad bajo condiciones de sotobosque, especialmente en la orientación E-O en el periodo de marzo a abril. En cambio, *D. glomerata* tuvo la mayor tasa de mortalidad en el tratamiento control, siendo el mayor valor en el periodo de enero a febrero.

Respecto a la tasa de aparición (Tabla 4), *D. glomerata* mostró la mayor tasa de aparición respecto a las otras especies. Para esta especie, que es considerada una especie con una estrategia de aprovechamiento intensivo de recursos (Gross et al., 2007), la persistencia depende tanto de la supervivencia de los macollos como de la emergencia continua de nuevas generaciones (Duchini et al., 2018). Como especie tolerante a la sombra, el *D. glomerata* tiene la capacidad adaptativa de modificar sus procesos fotosintéticos, asegurando un funcionamiento óptimo bajo condiciones de baja luz (Mercier et al., 2020), lo que le ofrece una ventaja frente a las otras especies.

**Tabla 4**

Tasa de aparición de macollos de *Dactylis glomerata*, *Lolium arundinaceum* y *Holcus lanatus* según tratamiento

Especies	Tasa de aparición macollos (1000 macollos <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )			
	Dic.-Feb.	Feb.-Mar.	Mar.-Abr.	Media
<b>Control</b>				
<i>Dactylis glomerata</i>	8.0	7.6	6.2	7.3
<i>Lolium arundinaceum</i>	3.3	2.7	2.9	3.0
<i>Holcus lanatus</i>	2.9	5.7	1.8	3.4
<b>Media</b>	4.7	5.3	3.6	
<b>E - O</b>				
<i>Dactylis glomerata</i>	8.0 <sup>A</sup>	4.5 <sup>AB</sup>	1.4 <sup>AB</sup>	4.6
<i>Lolium arundinaceum</i>	2.0 <sup>AB</sup>	3.4 <sup>AB</sup>	0.6 <sup>AB</sup>	2.0
<i>Holcus lanatus</i>	1.0 <sup>AB</sup>	0.0 <sup>B</sup>	0.33 <sup>AB</sup>	0.4
<b>Media</b>	3.6	2.6	0.8	
<b>N - S</b>				
<i>Dactylis glomerata</i>	10.8 <sup>A</sup>	8.1 <sup>AB</sup>	2.4 <sup>C</sup>	7.1
<i>Lolium arundinaceum</i>	3.0 <sup>C</sup>	4.4 <sup>BC</sup>	2.9 <sup>C</sup>	3.4
<i>Holcus lanatus</i>	1.5 <sup>C</sup>	2.5 <sup>C</sup>	0.0 <sup>C</sup>	1.3
<b>Media</b>	5.1	5.0	1.8	

Nota. Los promedios que comparten las mismas letras dentro de cada tratamiento (control, E-O o N-S) no muestran diferencias significativas para la interacción especie y mes de evaluación, ajustadas mediante la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ ).

*Dactylis glomerata*, evidenció un mayor grado de adaptación a las condiciones silvopastoriles que las otras especies. Esta especie tuvo el valor más alto de tasa de aparición, se detectó durante los meses de diciembre a febrero, bajo condiciones de sotobosque en la orientación N-S, pero disminuyó hacia el final del período, mientras que los valores del tratamiento control se mantuvieron estables durante todo el experimento. En la orientación E-O, la aparición de macollos fue siempre inferior a las otras condiciones (Tabla 4). Los resultados coinciden con los conceptos mencionados por Peri (2005) y Belesky et al. (2011), donde estos autores también posicionan al *D. glomerata* como una especie con buen comportamiento bajo sombreado moderado.

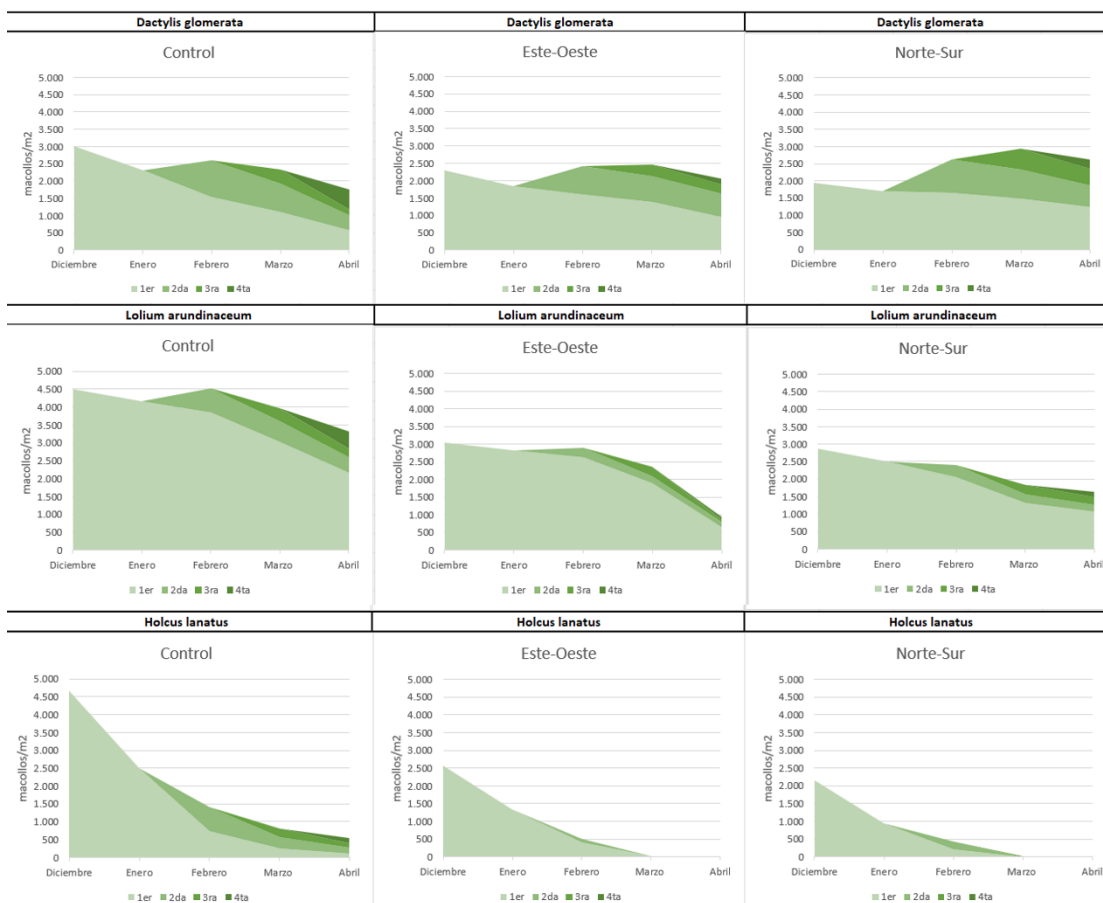
Las especies con estrategia de aprovechamiento intensivo de recursos como *D. glomerata*, se caracterizan por una emergencia continua de macollos durante todo el año, pero son

más susceptibles a condiciones adversas, como altas temperaturas y radiación, lo que puede ser particularmente desafiante para gramíneas de estación fría (Gross et al., 2007). Este rasgo probablemente contribuyó a la mayor tasa de muerte de macollos y menor supervivencia del *D. glomerata* en pleno sol en comparación con la *L. arundinaceum*. En esta condición, donde se registraron mayores temperaturas del suelo y radiación solar, el aumento en la aparición de macollos en *D. glomerata* fue insuficiente para compensar la mayor mortalidad, resultando en una menor densidad poblacional total. Por su parte, *H. lanatus* mostró la mayor tasa de aparición en el tratamiento control y la máxima ocurrió en el periodo de febrero y marzo. Por otro lado, *L. arundinaceum* presentó en general la mayor aparición en el tratamiento N-S. Un estudio previo de Yeh et al. (1976) reportó que las altas temperaturas pueden suprimir el macollaje en *L. arundinaceum* al aumentar la concentración de auxinas endógenas en la base de los tallos; eso podría explicar que en el tratamiento control la tasa de aparición de *L. arundinaceum* haya sido menor que en el sotobosque.

A pleno sol, *L. arundinaceum* mostró la mayor densidad de macollos tanto al inicio como al final del verano (Figura 10). Tanto para *L. arundinaceum* como para *H. lanatus*, la densidad poblacional de macollos final fue consecuencia de la sobrevivencia de la primera generación de macollos más que de la aparición de nuevos macollos (Figura 10). Jáuregui et al. (2017) coincide con estos resultados, indicando que en *L. arundinaceum* el número de macollos presentes en primavera (primera generación) fue esencial para la persistencia estival.

**Figura 10**

*Dinámica de aparición y mortalidad de macollos (diciembre-abril) D. glomerata, L. arundinaceum y H. lanatus*



En el caso de *D. glomerata*, la densidad poblacional de macollos final estuvo relacionada con ambas cosas, por un lado, a la sobrevivencia de la primera generación de macollos y por otro, a la aparición de nuevos macollos. Esta especie fue la especie con mejor persistencia del sotobosque en el verano. Mercier et al. (2020) demostraron que sembrar *D. glomerata* en la zona de transición entre el norte templado y el sur subtropical de Estados Unidos es una estrategia prometedor ya que los autores demuestran que hay un aumento de rendimiento bajo sombra que sugiere que el silvopastoreo podría integrar eficazmente forrajes de estación fría de alta calidad.

*Holcus lanatus* tuvo una alta sensibilidad a las condiciones de verano, independientemente de las condiciones de luz, experimentando una mortalidad completa de los macollos bajo sotobosque, pero no a pleno sol. Esto coincide con Boigné et al. (2017), donde muestran que *H. lanatus* enfrentó desafíos significativos bajo severa restricción hídrica en el sotobosque durante el verano. Sin embargo, algunos macollos lograron sobrevivir en pleno sol, donde los niveles de humedad del suelo fueron más altos.

Por su parte, *L. arundinaceum*, como se mencionó anteriormente, demostró una mayor densidad final de macollos a pleno sol; sin embargo, bajo condiciones de sotobosque, aumentó la muerte de los macollos, comprometiendo su persistencia general, lo cual concuerda con trabajos previos desarrollados en condiciones climáticas similares (Jáuregui et al., 2017).

## 5. CONCLUSIONES

El microclima producido por la presencia de árboles ejerció una influencia significativa en la dinámica poblacional de las tres especies forrajeras analizadas. *Dactylis glomerata* demostró mantener la densidad de macollos, tanto en el tratamiento control como en condiciones de sotobosque, lo que sugiere una adaptación a condiciones de menor radiación y humedad del suelo. Los resultados resaltaron la capacidad de *D. glomerata* para mantener su viabilidad durante los meses más cálidos en sistemas silvopastoriles, lo que podría tener implicaciones importantes para la sostenibilidad y la productividad de estos sistemas. Para esta especie, la densidad final fue resultado de una buena sobrevivencia de la primera generación, sumada a una tasa de aparición favorable a pesar de las condiciones. *Lolium arundinaceum* tuvo mayor densidad de macollos en el tratamiento control, una mayor tasa de aparición en el tratamiento N-S y mayor tasa de mortalidad en condiciones de sotobosque respecto al control. Su densidad final en todos los tratamientos dependió en mayor medida de la supervivencia de la primera generación, más que de la aparición de nuevas generaciones. *Holcus lanatus*, por su parte, demostró ser una especie poco adaptada a condiciones de sombra, demostrando una mayor mortalidad en sotobosque y tuvo mayor tasa de aparición en el control. En esta especie, la densidad poblacional de macollos final fue resultado de la sobrevivencia de la primera generación más que de nuevas generaciones.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, J. (2011). *Modelación de procesos hidrológicos asociados a la forestación con Eucalyptus en Uruguay* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/52369>
- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echevarría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol. 1. Clasificación de suelos*. MAP. [https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/carta\\_de\\_reconocimiento\\_de\\_suelos\\_Tomo\\_I.pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/carta_de_reconocimiento_de_suelos_Tomo_I.pdf)
- Altieri, M. A. (2018). *Agroecology: The science of sustainable agriculture* (2<sup>nd</sup> ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429495465>
- Australian Biological Resources Study. (1989). *Australian biological resources study: Annual report 1988-89*. AGPS. <https://nla.gov.au/nla.obj-1616174626/view?sectionId=nla.obj-1770707635&partId=nla.obj-1622589042#page/n9/mode/1up>
- Bahamonde, H. A., Peri, P. L., Martínez Pastur, G., & Lencinas, M. V. (2009). Variaciones microclimáticas en bosques primarios y bajo uso silvopastoril de *Nothofagus antarctica* en dos clases de sitio en Patagonia Sur. En P. L. Peri (Comp.), *1er Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles: Actas* (pp. 289-296). INTA.
- Barros, S. (2012). El género *Eucalyptus*. *Ciencia e Investigación Forestal INFOR Chile*, 18(3), 75-100. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/20681/31214.pdf?sequence=1>
- Beer, J., Harvey, C. A., Ibrahim, M., Harmand, J. M., Somarriba, E., & Jiménez, F. (2003, 21-28 de setiembre). *Funciones de servicio de los sistemas de agroforestería* [Contribución]. XII World Forestry Congress, Québec City, Canadá. <https://www.fao.org/4/xii/ms20-s.htm>
- Belesky, D. P. (2005). Growth of *Dactylis glomerata* along a light gradient in the central Appalachian region of the eastern USA: II. Mechanisms of leaf dry matter production. *Agroforestry Systems*, 65, 91-98. <https://doi.org/10.1007/s10457-004-5726-x>

- Belesky, D. P., Burner, D. M., & Ruckle, J. M. (2011). Tiller production in cocksfoot (*Dactylis glomerata*) and tall fescue (*Festuca arundinacea*) growing along a light gradient. *Grass and Forage Science*, 66(3), 370-380.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2011.00796.x>
- Belesky, D. P., Chatterton, N. J., & Neel, J. P. S. (2006). *Dactylis glomerata* growing along a light gradient in the central Appalachian region of the eastern USA: III. Nonstructural carbohydrates and nutritive value. *Agroforestry Systems*, 67, 51-61.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-005-1112-6>
- Benítez, V., Santa Cruz, R., Viñoles Gil, C., Posse, J. P., & Fedrigo, J. K. (2019). Simulación de sombra para una plantación silvopastoril de eucalipto híbrido según orientación de plantación: N-S o E-O. En J. Rivera, P. Peri, J. Chará, M. Díaz, L. Colcombet & E. Murgueitio (Eds.), *X Congreso Internacional de Sistemas Silvopastoriles: Por una producción sostenible: Libro de actas* (pp. 477-478). CIPAV. [https://cipav.org.co/wp-content/uploads/2021/09/X\\_Congreso\\_Internacional\\_Silvopastoril.pdf](https://cipav.org.co/wp-content/uploads/2021/09/X_Congreso_Internacional_Silvopastoril.pdf)
- Bervejillo, J. (2021). Comportamiento del sector de la carne vacuna. En *Anuario OPYPa 2021* (pp. 31-51). MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2021/anuario-opypa-2021>
- Boigné, A., Bureau, F., Husté, A., Levesque, S., Delorme, A., Quillet, L., & Langlois, E. (2017). Effects of waterlogging levels on *Holcus lanatus* response traits in different created topsoils. *Flora*, 234, 106-118.  
<https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.07.006>
- Brussa, C. A. (1994). *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Hemisferio Sur.
- Carámbula, M. (2002). *Pasturas y forrajes: Vol. 1. Potenciales y alternativas para producir forrajes*. Hemisferio Sur.
- Comisión Nacional de Fomento Rural & Universidad de la República. (2016). *La integración de forestaciones en predios familiares: Resultado de un estudio participativo*. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/15316/1/Integracion-de-forestaciones-en-predios-familiares-CNFR-2016.pdf>

- Coore Viñas, N., Soares de Lima Sancristobal, G., & Sotelo Suárez, F. (2021). *Evaluación de gramíneas forrajeras en sotobosque de Eucalyptus sp en distintos marcos de plantación* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/40661>
- Crespo, G. (2008). Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 42(4), 329-335. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193015490001.pdf>
- Cruz, P., Sierra, J., Wilson, J. R., Dulormne, M., & Tournebize, R. (1999). Effects of shade on the growth and mineral nutrition of tropical grasses in silvopastoral systems. *Annals of Arid Zone*, 38(3-4), 335-361. [https://hal.inrae.fr/hal-02696431v1/file/ACL\\_1999\\_Cruz\\_AnnAridZone\\_1.pdf](https://hal.inrae.fr/hal-02696431v1/file/ACL_1999_Cruz_AnnAridZone_1.pdf)
- Cubbage, F., Balmelli, G., Bussoni, A., Noellemeyer, E., Pachas, A. N., Fassola, H., Colcombet, L., Rossner, B., Frey, G., Dube, F., De Silva, M. L., Stevenson, H., Hamilton, J., & Hubbard, W. (2012). Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems*, 86, 303-314. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9482-z>
- Devkota, N. R., Kemp, P. D., & Hodgson, J. (1997). Screening pasture species for shade tolerance. *Proceedings of the Agronomy Society of New Zealand*, 27, 119-128. [https://www.agronomysociety.org.nz/files/1997\\_23\\_Screening\\_past\\_spp\\_for\\_shade\\_tolerance.pdf](https://www.agronomysociety.org.nz/files/1997_23_Screening_past_spp_for_shade_tolerance.pdf)
- Dirección General de Recursos Naturales. (s.f.). *Coneat, carta de suelos y cartografía de campo natural*. MGAP. <https://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/dgrn/#>
- Duchini, P. G., Guzatti, G. C., Echeverria, J. R., Américo, L. F., & Sbrissia, A. F. (2018). Experimental evidence that the perennial grass persistence pathway is linked to plant growth strategy. *PLoS ONE*, 13(11), Artículo e0207360. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207360>
- Dupraz, C., Blitz-Frayret, C., Lecomte, I., Molto, Q., Reyes, F., & Gosme, M. (2018). Influence of latitude on the light availability for intercrops in an agroforestry alley-cropping system. *Agroforestry Systems*, 92, 1019-1033. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0214-x>

- Fedriego, J. K., Benítez, V., Santa Cruz, R., Posse, J. P., Barro, R. S., Hernández, J., Mantero, C., Morales Olmos, V., Silveira, E. D., & Viñoles, C. (2018). Oportunidades y desafíos para los sistemas silvopastoriles en Uruguay. *Veterinaria (Montevideo)*, 54(209), 20-30.  
<http://www.scielo.edu.uy/pdf/vet/v54n209/1688-4809-vet-54-209-26.pdf>
- Fedriego, J. K., Santa Cruz, R., Benítez, V., Courdin, V., Ferreira, G., Posse, J. P., Viñoles, C. (2017). Forraje, temperatura y producción animal en un sistema silvopastoril en Uruguay. En J. Chará, P. Peri, J. E. Rivera, E. Murgueitio, & K. Castaño (Eds.), *Sistemas silvopastoriles: Aportes a los objetivos de desarrollo sostenible* (pp. 130-135). CIPAV.
- Fernández Mayer, A. (2017). *Producción de carne y leche bovina en sistemas silvopastoriles*. Sitio Argentino de Producción Animal. [https://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/manejo%20silvopastoril/186-transformacion\\_de\\_subproductos.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/manejo%20silvopastoril/186-transformacion_de_subproductos.pdf)
- Fike, J. H., Buergler, A. L., Burger, J. A., & Kallenbach, R. L. (2004). Considerations for establishing and managing silvopastures. *Forage & Grazinglands*, 2(1), 1-12.  
<https://doi.org/10.1094/FG-2004-1209-01-RV>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2007). *The state of food and agriculture: Paying farmers for environmental services*.  
<https://doi.org/10.18356/ce58efdc-en>
- Frey, G. E. (2009). *Economic analyses of agroforestry systems on private lands in Argentina and the USA* [Disertación doctoral, North Carolina State University]. NC State Repository. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/3444>
- Gallo, L. (2006). Sistemas silvopastoriles. *Revista del Plan Agropecuario*, (119), 30-35.  
[https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R119/R119\\_30.pdf](https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R119/R119_30.pdf)
- Gommers, C. M., Visser, E. J., St Onge, K. R., Voesenek, L. A., & Pierik, R. (2013). Shade tolerance: When growing tall is not an option. *Trends in Plant Science*, 18(2), 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.09.008>
- González Hernández, M. I., & Gallardo, J. F. (1982). El efecto hojarasca: Una revisión. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 41(5-6), 1129-1157.  
<http://hdl.handle.net/10261/57227>

- Google. (2026). [Predio de la localidad de Fraile Muerto, Cerro Largo, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 26 de febrero de 2026, de [https://earth.google.com/web/search/32%c2%b037%2710.59%22S++54%c2%b028%27+2.27%22W/@-32.62094902,-54.45771715,184.48702405a,6919.60739158d,35y,-0h,0t,0r/data=CmYaOBIyGUJqJFNPT0DAIZXBB2XQO0vAKh4zMsKwMzcnMTAuNTkiUyAgNTTCsDI4JyAyLjI3IlcYAiABIiYKJAKoHpRH5JFAwBHAwIOCu3pBwBkZXGwP0jNLwCEIZ1nt7\\_tMwEICCAE6AwoBMEICCABKDQj\\_\\_\\_\\_\\_8BEAA?hl=es-419&authuser=0](https://earth.google.com/web/search/32%c2%b037%2710.59%22S++54%c2%b028%27+2.27%22W/@-32.62094902,-54.45771715,184.48702405a,6919.60739158d,35y,-0h,0t,0r/data=CmYaOBIyGUJqJFNPT0DAIZXBB2XQO0vAKh4zMsKwMzcnMTAuNTkiUyAgNTTCsDI4JyAyLjI3IlcYAiABIiYKJAKoHpRH5JFAwBHAwIOCu3pBwBkZXGwP0jNLwCEIZ1nt7_tMwEICCAE6AwoBMEICCABKDQj_____8BEAA?hl=es-419&authuser=0)
- Gross, N., Suding, K. N., & Lavorel, S. (2007). Leaf dry matter content and lateral spread predict response to land use change for six subalpine grassland species. *Journal of Vegetation Science*, 18(2), 289-300. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02540.x>
- Hernández-Garay, A., Hodgson, J., & Matthew, C. (1993). Spring grazing management and tiller dynamics in a ryegrass/white clover pasture. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 55, 133-136. <https://doi.org/10.33584/jnzc.1993.55.2064>
- Jáuregui, J. M., Michelini, D. F., Agnusdei, M. G., Baudracco, J., Sevilla, G. H., Chilibroste, P., & Lattanzi, F. A. (2017). Persistence of tall fescue in a subtropical environment: Tiller survival over summer in response to flowering control and nitrogen supply. *Grass and Forage Science*, 72(3), 454-466. <https://doi.org/10.1111/gfs.12252>
- Jiménez, F., & Muschler, R. (2001). Introducción a la agroforestería. En F. Jiménez, R. Muschler & E. Köpsell (Eds.), *Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales* (pp. 1-24). CATIE.
- Karki, U., & Goodman, M. S. (2010). Cattle distribution and behavior in southern-pine silvopasture versus open-pasture. *Agroforestry Systems*, 78, 159-168. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9250-x>
- Karki, U., & Goodman, M. S. (2015). Microclimatic differences between mature loblolly-pine silvopasture and open-pasture. *Agroforestry Systems*, 89, 319-325. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9768-4>

- Klopfenstein, N. B., Rietveld, W. J., Carman, R. C., Clason, T. R., Sharrow, S. H., Garrett, G., & Anderson, B. (1997). *Silvopasture: An agroforestry practice*. USDA. [https://www.researchgate.net/publication/228594759\\_Silvopasture\\_An\\_Agroforestry\\_Practice](https://www.researchgate.net/publication/228594759_Silvopasture_An_Agroforestry_Practice)
- Matthew, C., & Hamilton, S. (2011). Analysing persistence of grass swards in terms of tiller birth and death. *NZGA: Research and Practice Series, 15*, 63-68. <https://doi.org/10.33584/rps.15.2011.3225>
- Matthew, C., Agnusdei, M. G., Assuero, S. G., Sbrissia, A. F., Scheneiter, O., & Da Silva, S. C. (2013). State of knowledge in tiller dynamics. En D. L. Michalk, G. D. Millar, W. B. Badgery, & K. M. Broadfoot (Eds.), *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Grassland Congress: The ecology of grassland and forage ecosystems* (pp. 1041-1044). New South Wales Department of Primary Industry. <https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1431&context=igc>
- Matthew, C., Lemaire, G., Sackville Hamilton, N. R., & Hernandez-Garay, A. (1995). A modified self-thinning equation to describe size/density relationships for defoliated swards. *Annals of Botany, 76*(6), 579-587. <https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1135>
- Mercier, K. M., Teutsch, C. D., Fike, J. H., Munsell, J. F., Tracy, B. F., & Strahm, B. D. (2020). Impact of increasing shade levels on the dry-matter yield and botanical composition of multispecies forage stands. *Grass and Forage Science, 75*(3), 291-302. <https://doi.org/10.1111/gfs.12489>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2020). *Descripción de grupos de suelos CONEAT*. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-03/Descripci%C3%B3n%20de%20Grupos%20de%20suelos%20CONEAT\\_0.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-03/Descripci%C3%B3n%20de%20Grupos%20de%20suelos%20CONEAT_0.pdf)
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales & Instituto Nacional Forestal. (2002). *Guía de especies forestales de Nicaragua*. Editora de Arte. <https://es.scribd.com/doc/60969339/Guia-de-Especies-Forestales>

- Monaco, T. A., & Briske, D. D. (2000). Does resource availability modulate shade avoidance responses to the ratio of red to far-red irradiation?: An assessment of radiation quantity and soil volume. *New Phytologist*, 146, 37-46.  
<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1046/j.1469-8137.2000.00613.x>
- Moore, K. J., & Dixon, P. M. (2015). Analysis of combined experiments revisited. *Agronomy Journal*, 107(2), 763-771. <https://doi.org/10.2134/agronj13.0485>
- Munka Moreno, M. C. (2010). *Variación del índice de área foliar y de la evapotranspiración en Pinus taeda debido al manejo silvicultural* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/1799>
- Munka, M. (2017). Microclima en sistemas silvopastoriles. En C. Viñoles, J. K. Fedrigo, V. Benítez & R. Santa Cruz (Eds.), *I Seminario en Sistemas silvopastoriles: Producción integrada para maximizar la rentabilidad* (pp. 63-68). Polo Agroforestal. <https://www.poloagroforestal.edu.uy/wp-content/uploads/2020/02/Revista-I-Integraci%C3%B3n-Ganader%C3%ADa-Forestal%C3%B3n.pdf>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2022). *Anuario estadístico agropecuario 2022*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-agropecuario-2022>
- 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. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/aportes\\_del\\_mgap\\_para\\_la\\_integracion\\_de\\_la\\_forestacion\\_en\\_predios\\_ganaderos.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/aportes_del_mgap_para_la_integracion_de_la_forestacion_en_predios_ganaderos.pdf)
- Pentón-Fernández, G. (2000). *Efecto de la sombra de los árboles sobre el pastizal en un sistema seminatural* [Tesis de maestría, Universidad de Matanzas]. FAO.  
<https://www.fao.org/4/x6345s/x6345s00.HTM>

- Peri, P. L. (2005). *Leaf and canopy photosynthesis models for cocksfoot (Dactylis Glomerata L.) grown in a silvopastoral system* [Disertación doctoral, Lincoln University]. Research@Lincoln. [https://researcharchive.lincoln.ac.nz/bitstream/handle/10182/3150/peri\\_phd.pdf?isAllowed=y&sequence=5](https://researcharchive.lincoln.ac.nz/bitstream/handle/10182/3150/peri_phd.pdf?isAllowed=y&sequence=5)
- Ramachandran Nair, P. K., Mohan Kumar, B., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(1), 10-23. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>
- Ribaski, J., Dedecek, R. A., Mattei, V. L., Flores, C. A., Vargas, A. F. C., & Ribaski, S. A. G. (2005). *Sistemas silvipastoris: Estratégias para o desenvolvimento rural sustentável para a metade sul do Estado do Rio Grande do Sul*. Embrapa. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/312314/1/comtec150.pdf>
- Sage, R. F., & McKown, A. D. (2006). Is C4 photosynthesis less phenotypically plastic than C3 photosynthesis? *Journal of Experimental Botany*, 57(2), 303-317. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj040>
- Sánchez, M. D. (1999). Sistemas agroforestales para intensificar de manera sostenible la producción animal en América Latina tropical. En M. D. Sánchez & M. Rosales Méndez (Eds.), *Agroforestería para la producción animal en América Latina* (pp. 1-13). FAO. <https://www.fao.org/4/x1213s/x1213s01.pdf>
- Sánchez, S., Hernández, M., & Simón, L. (2003). Efecto del sistema silvopastoril en la fertilidad edáfica en unidades lecheras de la empresa Nazareno. *Pastos y Forrajes*, 26(2), 131-136.
- 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*. MA; MGAP; gef; PNUD. [https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/noticias/informe\\_final.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/noticias/informe_final.pdf)
- Shan, Q., Liu, X., Zhang, J., Chen, G., Liu, S., Zhang, P., & Wang, Y. (2011). Analysis on the tolerance of four ecotype plants against copper stress in soil. *Procedia Environmental Sciences*, 10(B), 1802-1810. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.282>

- Sharrow, S. H., & Ismail, S. (2004). Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems*, 60, 123-130. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000013267.87896.41>
- Sharry, S. E. (2022). Clasificación de los SAF. En S. E. Sharry, R. A. Stevani, & S. P. Galarco (Coords.), *Sistemas agroforestales en Argentina* (pp. 27-59). Universidad Nacional de La Plata. [https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/132087/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/132087/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Silveira Martínez, E. D. (2015). *Estudio comparativo de la vegetación y cobertura del suelo bajo plantaciones forestales y campo natural* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/28025>
- Silveira, D., Cadenazzi, M., Zanoniani, R., & Boggiano, P. (2018). Estructura de las comunidades herbáceas en áreas con plantaciones forestales. *Agrociencia (Uruguay)*, 22(1), 1-12. <https://doi.org/10.31285/agro.22.1.1>
- Silveira, L., Alonso, J., & Martínez, L. (2006). Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 10(2), 75-93. <https://doi.org/10.31285/AGRO.10.931>
- Somarriba, E. (2012). Definición de agroforestería. En G. Detlefsen & E. Somarriba (Eds.), *Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica* (pp. 21-26). CATIE. [https://www.researchgate.net/profile/Arlene-Lopez-Sampson/publication/281235377\\_Agroforesteria\\_y\\_la\\_produccion\\_de\\_madera/links/55dc2d5708aec156b9b006b7/Agroforesteria-y-la-produccion-de-madera.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Arlene-Lopez-Sampson/publication/281235377_Agroforesteria_y_la_produccion_de_madera/links/55dc2d5708aec156b9b006b7/Agroforesteria-y-la-produccion-de-madera.pdf)
- Sotomayor Garretón, Á., & Teuber Winkler, O. R. (2011). Evaluación del efecto de los árboles manejados bajo ordenación silvopastoral en los parámetros climáticos del sitio, en relación a un manejo ganadero sin árboles. *Ciencia & Investigación Forestal*, 17(1), 23-40. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2011.357>
- Tamosiunas, M. (2015). La integración productiva de árboles y ganado en predios familiares: La visión del productor. *Agrociencia (Uruguay)*, 19(1), 150-157. [http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2301-15482015000100017](http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482015000100017)

- Varella, A. C. (2012, 24-26 de setiembre). *Características do ambiente luminoso em sistemas silvipastoris e recomendações para o manejo do componente forrageiro nas condições do sul do Brasil* [Contribución]. 11 Congresso Florestal Estadual do Rio Grande do Sul, Nova Prata. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/934925/caracteristicas-do-ambiente-luminoso-em-sistemas-silvipastoris-e-recomendacoes-para-o-manejo-do-componente-forrageiro-nas-condicoes-do-sul-do-brasil>
- Viñoles Gil, C., Fedrigo, J. K., Benítez, V., Santa Cruz, R., & Báez, F. (2022). Sistemas silvopastoriles en Uruguay. En Centro Médico Veterinario de Paysandú & Sociedad Uruguaya de Buiatría (Orgs.), *XLIX Jornadas Uruguayas de Buiatría* (pp. 51-59). <https://bibliotecadigital.fvet.edu.uy/bitstream/handle/123456789/3111/buiatria2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Viñoles, C., Fedrigo, J. K., Benítez, V., Santa Cruz, R., & Posse, J. P. (2017). Estado actual de la investigación en sistemas silvopastoriles en Uruguay. En C. Viñoles, J. K. Fedrigo, V. Benítez & R. Santa Cruz (Eds.), *I Seminario en Sistemas Silvopastoriles: Producción integrada para maximizar la rentabilidad* (pp. 3-23). Polo Agroforestal. <https://www.poloagroforestal.edu.uy/wp-content/uploads/2020/02/Revista-I-Integraci%C3%B3n-Ganader%C3%ADa-Forestci%C3%B3n.pdf>
- Von Stackelberg, N. O., Chescheir, G. M., Skaggs, R. W., & Amatya, D. M. (2007). Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay. *Transactions of the ASABE*, 50(2), 455-468. <https://doi.org/10.13031/2013.22636>
- Wang, Z., Pote, J., & Huang, B. (2003). Responses of cytokinins, antioxidant enzymes, and lipid peroxidation in shoots of creeping bentgrass to high root-zone temperatures. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(5), 648-655. <https://doi.org/10.21273/JASHS.128.5.0648>
- Yeh, R. Y., Matches, A. G., & Larson, R. L. (1976). Endogenous growth regulators and summer tillering of tall fescue. *Crop Science*, 16(3), 409-413. <https://doi.org/10.2135/cropsci1976.0011183X001600030024x>