

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

CARACTERIZACIÓN MICROCLIMÁTICA Y DESEMPEÑO FORRAJERO DE
Lolium multiflorum EN UN SISTEMA SILVOPASTORIL DE *Eucalyptus*
dunnii

por

Fabricio Damián PAEZ ALTESOR
Juan Ignacio SALVO VERA
María Florencia ZABALLA LOTITO

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2021

Tesis aprobada por:

Director:

.....

Zootecnista (MSc., PhD.) Jean Kássio Fedrigo

.....

Ing. Agr. (PhD). Jaime González

Fecha:

Autores:

.....

Fabricio Paez

.....

Juan Salvo

.....

Florencia Zaballa

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia queremos agradecer a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República por todos los conocimientos brindados en los años de la carrera.

A nuestro tutor Jean Fedrigo por su dedicación y permanente disposición frente a consultas.

A Jaime González por sus constantes aportes al trabajo.

A Martín Pérez del Castillo por habernos brindado la oportunidad de realizar este trabajo en el predio “Lomas Bien”.

A Rodrigo Santa Cruz, Patricia Bertoncelli y Fabián del Giorgio por colaborar con la realización de nuestro trabajo.

Por último, muy especialmente a nuestras familias, amigos y todas las personas que nos apoyaron durante toda la carrera.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 SISTEMAS AGROFORESTALES.....	3
2.1.1 <u>Definición de sistemas agroforestales</u>	3
2.1.2 <u>Clasificación de los sistemas agroforestales</u>	3
2.1.3 <u>Ventajas y desventajas de los sistemas agrosilviculturales</u>	4
2.1.4 <u>Definición de sistemas silvopastoriles</u>	5
2.1.5 <u>Sistemas silvopastoriles en Uruguay</u>	6
2.1.6 <u>Microclima en sistemas silvopastoriles</u>	9
2.1.6.1 Temperatura del suelo.....	9
2.1.6.2 Temperatura del aire.....	10
2.1.6.3 Amplitud térmica.....	11
2.1.6.4 Humedad del aire y del suelo.....	11
2.1.6.5 Índice de temperatura y humedad (ITH).....	12
2.1.6.6 Viento.....	13
2.2 COMPONENTE ARBÓREO.....	13
2.2.1 <u>Eucalyptus</u>	13
2.2.2 <u>Eucalyptus dunnii</u>	14
2.3 COMPONENTE FORRAJERO.....	16
2.3.1 <u>Lolium multiflorum</u>	16
2.4 EVALUACIÓN DEL COMPONENTE FORRAJERO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES.....	16
2.4.1 <u>Producción de forraje</u>	16
2.4.2 <u>Interceptación de la radiación fotosintética</u>	18
2.4.3 <u>Fluorescencia de la clorofila</u>	20
2.4.3.1 Curvas rápidas de respuesta de la ETR a la luz.....	21
2.4.4 <u>Efecto del sombreado sobre gramíneas</u>	22
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	24
3.1 LOCALIZACIÓN Y PERIODO EXPERIMENTAL.....	24
3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS.....	24
3.3 VARIABLES MICROCLIMÁTICAS.....	27
3.4 DISEÑO Y MATERIAL EXPERIMENTAL.....	28
3.5 DETERMINACIONES DEL COMPONENTE FORRAJERO.....	30

3.5.1	<u>Masa de forraje y altura del pasto</u>	30
3.5.2	<u>Eficiencia fotosintética de la pastura</u>	30
3.6	<u>DETERMINACIONES DEL COMPONENTE ARBÓREO</u>	31
3.6.1	<u>Altura total</u>	31
3.6.2	<u>Altura de copa verde</u>	31
3.6.3	<u>Proyección de copa</u>	31
3.6.4	<u>Diámetro de altura de pecho</u>	31
3.6.5	<u>Medidas dasométricas promedio del componente arbóreo</u>	32
3.7	<u>PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS</u>	32
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	35
4.1	<u>CARACTERIZACIÓN MICROCLIMÁTICA</u>	35
4.1.1	<u>Precipitaciones</u>	35
4.1.2	<u>Radiación</u>	36
4.1.2.1	<u>Porcentaje de sombra</u>	41
4.1.3	<u>Temperatura del aire</u>	42
4.1.4	<u>Temperatura del suelo</u>	45
4.1.5	<u>Humedad del aire</u>	47
4.1.6	<u>Humedad del suelo</u>	49
4.2	<u>INDICADORES DE ESTRÉS CALÓRICO ANIMAL</u>	50
4.2.1	<u>Índice de temperatura y humedad (ITH)</u>	50
4.2.2	<u>Índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA)</u>	53
4.3	<u>PRODUCCIÓN DE BIOMASA DE FORRAJE</u>	57
4.4	<u>FLUORESCENCIA DE LA CLOROFILA</u>	58
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	61
6.	<u>RESUMEN</u>	62
7.	<u>SUMMARY</u>	64
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	66

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Análisis químico del suelo realizado en dos condiciones bajo influencia del componente arbóreo.....	26
2. Medidas dasométricas promedio de los árboles del experimento.....	32
3. Promedio de los valores acumulados diarios de RFA (mol.m ⁻²) registrados en los diferentes sensores del experimento.....	37
4. Valores de los parámetros α , ETR max e Ik calculados a partir de los datos proporcionados por el fluorómetro, para el centro, Noroeste y control del experimento.....	59
Figura No.	
1. Diferencia entre la temperatura media del suelo del cultivo en distintas posiciones del callejón en relación al cultivo en campo abierto.....	10
2. Diferentes combinaciones de temperatura y humedad relativa y su ITH correspondiente.....	12
3. Mapa con la distribución natural de <i>Eucalyptus dunnii</i>	14
4. Características morfológicas de <i>Eucalyptus dunnii</i>	16
5. Absorción de luz en sus diferentes longitudes de onda por parte de las plantas.....	19
6. Rendimiento de grano de trigo de invierno según la distancia entre filas de árboles en Paulownia, China.....	20
7. Imagen satelital con la ubicación de la unidad experimental.....	24
8. Imagen satelital del predio.....	25
9. Representación de las unidades experimentales del presente experimento, con detalle de la ubicación de los sensores para evaluación microclimática.....	27
10. Imagen satelital con la ubicación del control y el sistema silvopastoril dentro de la unidad experimental.....	29
11. Diseño esquemático de las posiciones de evaluación en relación a las hileras (Sureste, centro y Noroeste) que constituyen los tratamientos en la condición bajo influencia del componente arbóreo, y sus respectivas medidas.....	29
12. Sumatoria total de precipitaciones acumuladas evaluadas en períodos de diez días.....	35

13. Registro mensual de la precipitación acumulada durante el período experimental y comparación con la serie histórica 1986-2018.....	36
14. Promedios diarios de radiación fotosintéticamente activa (RFA) para los diferentes meses del experimento.....	39
15. Diagrama de la trayectoria aparente del sol en relación al sensor de RFA ubicado en la posición central del sotobosque silvopastoril durante el día del solsticio de invierno y de verano.....	40
16. Representación esquemática de la posición aparente del sol hacia el Norte y sus efectos en la interceptación de la radiación por la canopia de los árboles del presente estudio, generando variabilidad espacial en el régimen de sombreado del sotobosque.....	41
17. Porcentaje de sombra en el sistema silvopastoril para cada mes del período evaluado.....	42
18. Comportamiento de la temperatura del aire en el periodo evaluado.....	44
19. Comportamiento de la temperatura del suelo en el periodo evaluado....	47
20. Promedio mensual de la humedad del aire en el período evaluado.....	47
21. Promedio mensual de la humedad del suelo en el período evaluado.....	49
22. Promedio mensual del índice de temperatura y humedad (ITH) en el período evaluado.....	51
23. Promedio diario mensual de horas en que el índice de temperatura y humedad (ITH) fue mayor a 72.....	52
24. Promedio diario mensual de horas en que el índice de temperatura y humedad (ITH) fue mayor a 80.....	53
25. Promedio mensual del índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA) en el período evaluado.....	54
26. Promedio diario mensual de horas en que el índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA) fue mayor a 72.....	55
27. Promedio diario mensual de horas en que el índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA) fue mayor a 80.....	56
28. Cantidad de masa de forraje de los distintos tratamientos expresado en kg MS ha ⁻¹ para el mes de noviembre.....	57
29. Relación entre la radiación fotosintéticamente activa (RFA) y la tasa de transferencia relativa de e ⁻ (ETR) para tres posiciones del experimento.....	59

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la forestación en Uruguay ha experimentado un fuerte incremento en el área destinada a este rubro, a partir de creaciones de leyes forestales que impulsaron su desarrollo, promovido con excepciones de impuestos. La segunda Ley Forestal No. 15.939 del 28/12/1987 tuvo un éxito diferencial debido a créditos, financiación para proyectos y subsidios, lo cual permitió inversiones de capital extranjero y nacional en el sector. Además del marco político estable, se destacan las buenas condiciones productivas del país dadas por las condiciones del suelo y clima lo que favorecen el rápido crecimiento de las especies comerciables de pino y eucalyptus obtenido en las últimas décadas.

Por otra parte, también se debe mencionar que en muchos casos existe una superposición de áreas de especialización productiva que evidencian una combinación de actividades. Con este nuevo escenario, cada sector productivo busca optimizar las técnicas de producción y de esa forma utilizar de manera más eficiente el recurso suelo. Por ende, la integración de los rubros agrícola, ganadero y forestal en el tiempo y en el espacio, viene cobrando una importancia creciente.

Los sistemas que combinan pasturas con animales y árboles en plantaciones forestales, conocidos como sistemas silvopastoriles, apuntan a una mayor sustentabilidad a largo plazo, ya que se utilizan con el objetivo de aumentar la productividad del recurso suelo y el beneficio neto del sistema, reducir el riesgo a través de la diversificación de rubros, así como también reducir los efectos negativos del estrés climático sobre plantas y animales. Otro de los motivos de la adopción de sistemas silvopastoriles es el menor riesgo asociado a incendios en comparación con sistemas netamente forestales, lo que se debe a la reducción de materia seca por acción del pastoreo, disminuyendo la cantidad material combustible. A su vez, genera ingresos a corto plazo que atenúan el costo financiero de la inmovilización de capital que implica una plantación forestal.

Los sistemas silvopastoriles, son sistemas planeados que buscan y promueven la sinergia de sus componentes, maximizando las interacciones positivas y atenuando las negativas, haciendo una adecuada selección de la especie arbórea y su marco de plantación, de las forrajeras que crecerán en el sotobosque y de los animales (momento de ingreso, edad, categoría). Sin embargo, existe una falta de predios piloto para la difusión de resultados, por lo que la adopción de estos sistemas en Uruguay no ha tenido mucho éxito hasta el momento. Los productores que cuentan con experiencia silvopastoril previa,

forestan porque están convencidos de los beneficios para el ganado, mientras tanto los que no, miran a la forestación como un aumento de costos y trabajo sin beneficios inmediatos.

Otra particularidad para tener en cuenta al momento de adoptar este tipo de sistemas es que los mismos afectan aspectos del microclima dentro del sotobosque, como ser la radiación incidente, humedad del aire y suelo, velocidad del viento, entre otros aspectos que provocan modificaciones en la producción de forraje. Dentro de este marco, donde los sistemas silvopastoriles han ido cobrando mayor importancia, pero con algunas limitaciones, el presente trabajo busca generar y aportar datos microclimáticos y forrajeros que puedan ser de utilidad al momento de diseñar este tipo de sistemas productivos.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las variaciones microclimáticas dentro de un sistema silvopastoril y el desempeño forrajero de *Lolium multiflorum* en entrefilas de 15 metros de una plantación de *Eucalyptus dunnii*.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar y determinar las variables dasométricas del *Eucalyptus dunnii* en un marco de plantación silvopastoril;
- Evaluar las características microclimáticas del sotobosque de *Eucalyptus dunnii* de 9 años de edad con diseño silvopastoril en comparación a un campo abierto (sin interferencia del componente arbóreo);
- Determinar la producción de forraje y altura del raigrás anual en un sistema silvopastoril de *Eucalyptus dunnii* ;
- Evaluar indicadores de estrés calórico animal en un sistema silvopastoril;
- Determinar la variación en el comportamiento fotosintético del raigrás anual en las condiciones impuestas por un sistema silvopastoril.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. SISTEMAS AGROFORESTALES

2.1.1. Definición de sistemas agroforestales

Según Fassbender (1993), los sistemas agroforestales se definen como un conjunto de formas de uso de la tierra en los cuales se combinan árboles con cultivos agrícolas y/o pastos, en función del tiempo y espacio para incrementar y optimizar la producción en forma sostenida. La agroforestación también puede ser definida como las formas de uso de la tierra que utilizan árboles permanentes deliberadamente en las mismas unidades de explotación agrícola con cultivos agrícolas y/o animales, ya sea en un arreglo espacial o secuencia temporal (ICRAF, 1985). El uso de especies leñosas integrada a los sistemas agrícolas ha sido una antigua tradición en todo el mundo y ha constituido una práctica predeterminada de uso de la tierra. Durante los últimos siglos la agricultura y los cultivos se disociaron a medida que el monocultivo se hizo más común, en un esfuerzo para intensificar la producción de alimentos (FAO, 2006).

2.1.2. Clasificación de los sistemas agroforestales

Nair (1982) se refiere a los sistemas agroforestales como un tipo de uso de la tierra que se da en determinada localidad, y los clasifica según su estructura, función, escala socioeconómica y nivel de manejo y su amplitud ecológica.

Según su estructura, el autor menciona que los mismos pueden clasificarse en tres categorías:

- Sistemas agrosilviculturales: asociación de cultivos incluyendo cultivos arbóreos/arbustivos y árboles.
- Sistemas silvopastoriles: combinación de pastos, animales y árboles.
- Sistemas agrosilvopastoril: conjunto de cultivos, pastos/animales y árboles.

En cuanto a la base funcional, ésta se refiere al rendimiento y papel principal de los componentes, especialmente los maderables. En base a este criterio, Nair (1982) los clasifica en:

- Funciones productivas: producir para las “necesidades básicas” como por ejemplo forrajes, alimento, leña, etc.

- Roles de producción: conservación del suelo, mejoramiento de la fertilidad del suelo, protección de los rompe vientos.

En base a la ecología, los sistemas se pueden agrupar para cada zona agroecológica definida, tal como trópicos húmedos de bajura, trópicos áridos y semiáridos, tierras altas tropicales y así sucesivamente.

Desde el punto de vista socioeconómico de producción y el manejo estos sistemas se pueden clasificar de acuerdo al propósito al cual son destinado en:

- Sistema agroforestal comercial.
- Sistema agroforestal de subsistencia.
- Sistema agroforestal intermedio.

2.1.3. Ventajas y desventajas de los sistemas agrosilviculturales

Beer et al. (1994) citan ciertas ventajas y desventajas que puede tener un sistema agrosilvicultural frente a la forestación tradicional, éstas son:

Ventajas

- El manejo y/o ganancias agrícolas reducen o pagan los costos de establecimiento de los maderables.
- No hay que esperar hasta el fin del turno para recibir ingresos de la parcela forestada.
- Mejora la disponibilidad de nitrógeno para los árboles, cuando está asociado a un cultivo leguminoso.
- Reducción del riesgo de incendios debido a la presencia de cultivos y limpieza del terreno.
- Detección y tratamiento más temprano de plagas o enfermedades forestales durante la etapa de establecimiento, debido a una mayor atención al cultivo agrícola.
- Mayor aprovechamiento de los nutrientes disponibles en el suelo y menores pérdidas por lixiviación.

Desventajas

- Mayor riesgo de incendios si se usa el fuego para limpiar terrenos agrícolas contiguos.
- Puede haber una menor tasa de crecimiento y sobrevivencia de los árboles debido a la competencia con cultivos o a la presencia del animal.
- Mayor propensión al daño en árboles debido a las actividades de manejo y cosecha de los cultivos agrícolas y al pastoreo.
- Efectos alelopáticos en los árboles debido a la liberación de sustancias químicas de los cultivos.
- Deterioro del sitio y agotamiento de nutrientes debido a la erosión y al manejo agrícola inadecuado.
- Las actividades silvícolas pueden provocar daños físicos en cultivos perennes.
- La asociación puede ser perjudicial e inestable si los cultivos y árboles son susceptibles a las mismas plagas.

2.1.4. Definición de sistemas silvopastoriles

Como fue mencionado anteriormente, los sistemas silvopastoriles son un tipo de sistema agroforestal. Según Pezo e Ibrahim (1998), los sistemas silvopastoriles son un tipo de producción pecuaria en la que las leñosas perennes (árboles y arbustos) interactúan con los componentes tradicionales de la producción pecuaria (forrajeras herbáceas y animales), todos ellos bajo un sistema de manejo integral.

Carvalho y Xavier (2005), definen a los sistemas silvopastoriles como una modalidad de agroforestación que se caracteriza por integrar componentes leñosos, herbáceos y animales herbívoros. Algunos de ellos ocurren de forma natural, en diversos ecosistemas, mientras que otros son establecidos según el modelo planeado.

De la introducción de árboles y arbustos, en pasturas de gramíneas, se pueden obtener varios beneficios, en algunos casos ocurriendo externalidades positivas que sobrepasan los límites de la pastura o de la propiedad. Entre esos efectos se destacan:

- Confort para los animales

- Control de la erosión y mejoramiento de la fertilidad del suelo
- Mejor aprovechamiento del agua de las lluvias.
- Aumento de la disponibilidad de forraje en ciertas épocas del año y mayores porcentajes de proteína bruta en el forraje sembrado.
- Incremento en la rentabilidad de la propiedad rural, con reducción en los gastos de insumos y algunas veces, con la obtención de por lo menos dos productos comercializables (leche, carne, madera, frutas, etc)
- Aumento y conservación de la biodiversidad.
- Protección de los manantiales de agua.

Para Polla (1998), los sistemas silvopastoriles juegan un rol fundamental en el medio rural; ya que permiten mantener y optimizar la capacidad productiva global de cada ecosistema agroforestal, equilibrando las múltiples funciones de los bosques apuntando al manejo sustentable del recurso forestal, de los recursos naturales renovables y demás recursos involucrados, a conservar la diversidad biológica y a proteger y preservar el ambiente.

Como complemento a este concepto, Veiga y Serrão (1990) mencionan que el éxito de la integración de la actividad silvícola con la pecuaria está consolidada en el equilibrio de la explotación de los recursos naturales por los tres principales componentes bióticos de este sistema: el árbol, la pastura y el rumiante. Cuando las interacciones son equilibradas, desde su establecimiento hasta la cosecha final de los productos, posibilitando la producción simultánea de los componentes arbóreo, forrajero y animal, entonces tenemos un sistema silvopastoril verdadero.

2.1.5. Sistemas silvopastoriles en Uruguay

El sector forestal en Uruguay ha tenido en la última década un gran crecimiento, a partir de la existencia de condiciones edafoclimáticas adecuadas y de políticas que buscaron impulsarlo. Dichas políticas generaron fuertes inversiones nacionales y extranjeras, llegando actualmente a ocupar un millón de hectáreas bajo montes comerciales, las que a su vez se asocian con producciones ganaderas en las superficies no forestadas (Acevedo e Ibarburu, 2011). Estas medidas de promoción e incentivos que se establecieron, estimularon las actividades forestales tanto como las agroforestales, incluido los sistemas silvopastoriles, agrosilvopastoriles y silvoagrícolas (Polla, 1998). La primera ley de promoción forestal (No. 13.723), establecida en el año de 1968,

pretendió abastecer al mercado interno, impulsando la forestación con especies exóticas de rápido crecimiento (Riella y Ramírez, 2008). El mercado interno se basó principalmente en la utilización de madera como materia prima para su uso como combustible, a su vez entre otros objetivos tuvo la función protectora de los bosques hacia los cultivos, los suelos y agua. Además de la utilización de monte como recreación y turismo (Riella y Ramírez, 2008).

Esta ley no tuvo el alcance que pretendían sus impulsores por lo que se realizó la segunda ley de promoción forestal No. 15.939, en el año 1987 (Riella y Ramírez, 2008). A partir de esta ley se implementó un programa de desarrollo forestal, que implicó entre otras cosas un conjunto de incentivos a la forestación y a la protección del monte nativo, financiados con recursos Estatales. Cuando se habla de incentivos precisamente se hace referencia a subsidios a la plantación, exoneraciones fiscales a la superficie bajo plantación forestal, creación de líneas y sistemas de créditos blandos específicos para estas inversiones y a su vez la exoneración de aranceles de importación a los bienes de capital e insumos (Carámbula y Piñeiro, 2006). En esta ley se definen suelos de prioridad forestal y dividen al país en 3 regiones: Sur-Este, centro-Norte y litoral-Oeste.

Esta definición de suelos de prioridad forestal y los beneficios de la producción sobre ellos buscó mejorar la productividad de estos suelos menos aptos para otras actividades agropecuarias y sí aptos para la forestación (Fedrigo et al., 2017). Este ordenamiento en suelos de prioridad forestal determinó un crecimiento del rubro a distintos ritmos en las diferentes zonas del país. En el Norte se concentra las plantaciones de pino y la mayoría de las industrias instaladas para la producción de madera de calidad con predominancia en los departamentos de Tacuarembó y Rivera, seguido por el Litoral en los departamentos de Paysandú y Río Negro donde se da mayor concentración de eucaliptos para la producción de pulpa de celulosa (Fedrigo et al., 2017). Las plantaciones comenzaron a extenderse a los departamentos de Cerro Largo y Treinta y Tres donde hay gran cantidad de suelos de prioridad forestal disponible, en estas superficies la mayor parte de las plantaciones tienen como objetivo la producción de madera para pulpa de celulosa (Fedrigo et al., 2017).

La realidad del sector forestal fue cambiando a lo largo del tiempo y en el año 2005 se realizan ajustes a la política y legislación, tales como eliminación de subsidios a plantaciones, cambios en el tipo de suelo en el cual se promueve la actividad (suelos de prioridad forestal), derogación de algunas exoneraciones impositivas. Estas exoneraciones se limitan a aquellos bosques cuyo manejo esté orientado a la producción de madera de calidad para aserradero y plantas de tableros fundamentalmente, que se caracterizan por ser árboles de mayor

diámetro y un manejo de podas que permita que la madera esté libre de nudos (FAO, 2006).

A su vez, se comenzó a fomentar la implantación de bosques protectores a la ganadería y/o agricultura en tanto la superficie total ocupada por los mismos no exceda el 8% de la superficie total del predio, y la implementación de sistemas agroforestales, en particular en algunos suelos con presencia de procesos erosivos (Soust, 2012). Dichos instrumentos generaron en productores ganaderos tradicionales un incentivo a diversificar su producción e incorporar el rubro forestal, además de incentivar a inversores externos y empresas internacionales que arribaron con el fin de comprar tierra para forestar (FAO, 2006).

Los sistemas agroforestales, de los cuales se tiene pocos estudios e información en Uruguay, resultan atractivos desde el punto de vista económico. Esto se basa en la idea que, a diferencia de una plantación forestal, al incorporar un cultivo o ganado en pie, permite ingresos a corto plazo. Mientras que las plantaciones forestales tienen un tiempo considerado para la obtención de ganancia económica a través de su madera (Soust, 2012). Esto permite repartir gastos, diversificar la producción, disminuir riesgos además de poder acceder a economías tributarias y al subsidio forestal, en caso de quedar amparados por la ley forestal No. 15.939 (Polla, 1998).

La forma más usual en Uruguay de pastoreo de ganado en plantaciones forestales es a través de contratos entre empresas forestales que manejan gran cantidad de superficie y productores locales que manejan su ganado en estas superficies (Cubbage et al., 2012). Teniendo un beneficio mutuo, tanto como para la empresa forestal, al tener ganado disminuye el riesgo de incendio y percibe ingreso por renta, tanto como para el productor local, que utiliza el forraje de la superficie no forestada y engorda el ganado para una futura venta e ingresos capitales por la misma (Cubbage et al., 2012). Recientemente, las empresas forestales a su vez comenzaron a hacer negocios con productores dueños de la tierra. Pueden haber distintos tipos de arreglo, por ejemplo la empresa forestal proveer de plantas, la preparación del suelo, la plantación y cosecha. Dentro del arreglo económico estas empresas pueden generar una renta anual al productor, o división de ganancias al momento de la cosecha de madera comercial (Cubbage et al., 2012). A pesar de que los sistemas silvopastoriles han sido promovidos a través de exoneraciones impositivas y créditos blandos por el MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca), su adopción en Uruguay todavía es escasa (Tamosiunas, 2015).

Una encuesta realizada a productores ganaderos dio como resultados que los que tienen experiencia silvopastoril previa forestan por estar

convencidos de los beneficios de obtener el monte de abrigo y sombra hacia el aumento de peso del ganado, mientras que aquellos que no tienen experiencia previa perciben a la forestación como un costo agregado y más trabajo cuyos beneficios se dan a largo plazo, es decir, una vez los árboles consten de un diámetro significativo y se puedan cosechar para la utilización en industrias, sea pulpables o para madera de calidad (Tamosiunas, 2015).

2.1.6. Microclima en sistemas silvopastoriles

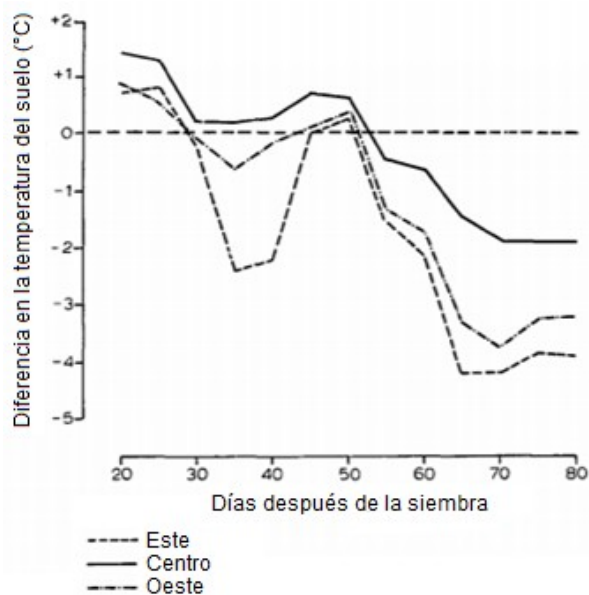
Barnes et al. (1998) definen: *“el microclima es el conjunto de condiciones climáticas propias de un punto geográfico o área reducida y representa una modificación local del clima general de la región debido a la influencia de distintos factores ecológicos.”*

Diferentes estudios han comprobado que los sistemas silvopastoriles generan cambios sobre el microclima y sus distintos componentes ya sea en la temperatura del aire, humedad del aire, temperatura del suelo y sobre la radiación fotosintéticamente activa. Estos cambios por un lado son positivos al controlar los extremos térmicos del aire y del suelo, pero también por otro lado son negativos al reducir la cantidad de la radiación fotosintéticamente activa que llega al componente herbáceo. Esas condiciones pueden afectar de manera positiva tanto como negativa al crecimiento forrajero en este tipo de sistemas (Feldhake y Belesky, 2009).

2.1.6.1. Temperatura del suelo

Según Munka (2017), unos de los principales aspectos modificados a través de los sistemas silvopastoriles es la temperatura del aire y del suelo.

La presencia del componente arbóreo genera un cambio en los extremos de temperatura en el suelo, aumentando su temperatura en invierno y disminuyendo en verano. Éstos son muy positivos para el crecimiento de las especies forrajeras, especialmente las invernales. A su vez resulta positivo la reducción de los extremos de temperatura en el suelo debido a que temperaturas altas inhiben la fotosíntesis y síntesis de citocinina, hormona asociada a la producción de nuevas hojas y retrasar el tiempo de maduración del follaje (Wang et al., 2003).



La línea continua corresponde al centro, línea con guiones al Este y línea con puntos y guiones al Oeste del tratamiento.

Figura No. 1. Diferencia entre la temperatura media del suelo del cultivo en distintas posiciones del callejón en relación al cultivo en campo abierto

Fuente: Monteith et al. (1991).

En un experimento clásico desarrollado por Monteith et al. (1991), se observaron diferencias en la temperatura del suelo. Al final de la temporada del cultivo (estival), dentro del sistema silvopastoril la temperatura del suelo disminuyó de 2 a 4 °C en comparación con el campo abierto. Esto se debió a una menor radiación fotosintética incidente, sumado a una disminución en la velocidad del viento dentro del sistema silvopastoril (Figura No. 1).

2.1.6.2. Temperatura del aire

El componente arbóreo genera menores extremos de temperatura del aire, es decir, no llegando a temperaturas tan frías en invierno, ni tan cálidas en verano, lo que determina una menor amplitud térmica (Fedrigo et al., 2018). Cuanto más denso sea el monte, mayor influencia tendría sobre los cambios de temperatura del aire (Munka, 2017). De esa manera, ocurre una disminución de la amplitud térmica a mayor densidad de árboles por hectárea (Cabrera et al., 2016).

2.1.6.3. Amplitud térmica

Karl et al. (1993) definen la amplitud térmica como el término utilizado para la diferencia entre el rango de las temperaturas máximas y mínimas diarias. En el periodo entre 1951-1990 la amplitud térmica del aire se vio disminuida en más de un 50% del hemisferio norte, consecuencia de un aumento de la temperatura mínima a un ritmo tres veces mayor que la temperatura máxima. Esta disminución de la amplitud térmica del aire tiene varios factores, como son, aumento en cobertura de nubes, quema de biomasa o como también gases de efecto invernadero (Karl et al., 1993).

En sistemas silvopastoriles la disminución en la amplitud térmica del aire es mayor a más densidad de vegetación arbórea, debido a que las temperaturas extremas son más atenuadas, menores en meses calurosos y mayores en meses fríos (Munka, 2017). A su vez, la amplitud térmica del suelo también se ve afectada por distintos factores, pero principalmente por la radiación incidente. Los suelos cubiertos por una vegetación arbórea tienen un efecto regulador, debido a que al suelo le llega una menor cantidad de radiación directa lo que determina que disminuya sus temperaturas máximas y por lo tanto reduce la amplitud térmica en meses estivales (Cerezuela et al., 2008).

2.1.6.4. Humedad del aire y del suelo

Cuanto mayor sea la altura del componente arbóreo, tanto como su densidad, aumenta la humedad relativa del aire (hasta 6 metros, aumenta 3 % la humedad y 6-8 metros, proporciona un aumento del 20%, Bahamonde et al., s.f.).

Munka (2017), menciona que en sitios sin árboles el microclima es menos húmedo que bajo el dosel forestal

Siempre y cuando el suelo no esté completamente saturado en agua, se ha comprobado que el componente arbóreo y las pasturas van a competir por la humedad disponible en el suelo (Peri et al., 2016). A su vez, en casos de sequía extrema, la presencia del componente arbóreo al reducir la evapotranspiración de los cultivos en el sotobosque por la reducción de temperatura, agregado a la reducción en la velocidad del viento, puede ser beneficiosa para el desarrollo del forraje en el sistema (Peri et al., 2016).

La temperatura del aire y la radiación directa son los principales parámetros microclimáticos que explican gran parte de la evapotranspiración (Allen et al., 2006)

2.1.6.5. Índice de temperatura y humedad (ITH)

El índice de temperatura y humedad (ITH) es uno de los indicadores más usados para evaluar el estrés calórico al que son sometidos los animales (Thom, 1959)

Según Johnson et al. (1961), se ha reportado históricamente que el umbral de ITH a partir del cual la performance animal de vacas Holstein se ve afectada es de 72.

		Humedad Relativa (%)																						
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100		
Temperatura del aire (°C)	22	64	64	65	65	66	66	66	67	67	67	68	68	69	69	69	70	70	70	71	71	72		
	23	65	65	66	66	67	67	67	68	68	69	69	70	70	70	71	71	72	72	73	73	73		
	24	66	66	67	67	68	68	69	69	70	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75		
	25	67	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	Estrés Moderado				75	75	76	76	77	
	26	67	68	69	69	70	70	71	71	72	73	73	74	74	Estrés Moderado				77	77	78	78	79	
	27	68	69	69	70	71	71	72	73	73	74	74	75	76	76	77	77	78	79	79	80	81	81	
	28	69	70	70	71	72	72	73	74	74	75	76	76	77	78	78	79	80	80	81	82	82	82	
	29	70	71	71	72	73	73	74	75	76	76	77	78	78	79	80	81	81	82	83	83	84	84	
	30	71	71	72	73	74	74	75	76	77	78	78	79	80	81	81	Estrés Elevado				84	85	86	
	31	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	80	81	82	83	Estrés Elevado				86	87	88		
	32	72	73	74	75	76	77	77	78	79	80	81	82	83	84	84	85	86	87	88	89	90	90	
	33	73	74	75	76	77	78	79	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	90	91	91	
	34	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	93	
	35	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	Estrés Severo				94	95	
	36	75	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	Estrés Severo				96	97	
	37	76	77	79	80	81	82	83	84	85	86	87	89	90	91	92	93	Estrés Severo				97	99	
	38	77	78	79	81	82	83	84	85	86	88	89	90	91	92	93	95	96	97	98	99	100	100	
	39	78	79	80	82	83	84	85	86	88	89	90	91	92	94	95	96	97	99	100	101	102	102	
	40	79	80	81	82	84	85	86	88	89	90	91	93	94	95	96	98	99	100	101	103	104	104	
	41	80	81	82	83	85	86	87	89	90	91	93	94	95	97	98	99	101	Muerte de vacas				104	106
	42	80	82	83	84	86	87	89	90	91	93	94	95	97	98	99	101	101	Muerte de vacas				106	108
43	81	83	84	85	87	88	90	91	92	94	95	97	98	100	101	102	102	Muerte de vacas				108	109	
44	82	83	85	86	88	89	91	92	94	95	97	98	99	101	102	104	105	107	108	110	111	111		
45	83	84	86	87	89	90	92	93	95	96	98	99	101	102	104	105	107	108	110	111	113	113		

Figura No. 2. Diferentes combinaciones de temperatura y humedad relativa y su ITH correspondiente

Fuente: Armstrong (1994).

Thom (1959), desarrolló una ecuación para calcularlo:

$$\text{ITH} = 0,8 \times \text{Temperatura del aire} + \left(\frac{\% \text{ Humedad Relativa}}{100} \right) \times$$

$$(\text{Temperatura del aire} - 14,4) + 46,4$$

Mader (2003), propuso una nueva ecuación para calcular el ITH horario, en la cual realiza un ajuste a la ecuación desarrollada por Thom (1959) y toma en consideración si el ganado está expuesto o no a la radiación solar y si sobre él está influyendo el viento.

$$ITHA = [4,51 + ITH - (1,992 \times WSPD) + (0,0079 \times RAD)].$$

dónde:

ITHA – Índice de temperatura y humedad ajustado por viento y radiación solar. (adimensional)

ITH – Índice de temperatura y humedad. (adimensional)

WSPD – Velocidad del viento m/s.

RAD – Radiación solar en kcal/m²/h.

2.1.6.6. Viento

Munka (2017), menciona que la presencia de árboles modifica la magnitud del viento y la circulación del aire bajo el dosel. El principal efecto que sufre el viento al encontrarse con árboles es la reducción de la velocidad. Dicho efecto en conjunto con la sombra que generan las superficies forestadas, se lo considera como un servicio al animal (abrigo y sombra) provocando que los animales se encuentren en condiciones de confort en situaciones adversas, tanto por frío o por calor.

Varella (2012), observó bajo un experimento con *Pinus taeda* en comparación a campo abierto que la presencia de árboles disminuye la velocidad del viento, y cuanto más denso sea el componente arbóreo, menor será la velocidad del viento.

2.2. COMPONENTE ARBÓREO

2.2.1. Eucalyptus

Eucalyptus constituye un complejo género de plantas con follaje persistente localizado en la botánica sistemática dentro de la familia de las Mirtáceas, subfamilia Leptospermoideae. Este género de la subfamilia Leptospermoideae es nativa de Australia e Islas vecinas, su área de dispersión natural se localiza entre los 7° N y 43° S de latitud. Las únicas especies que no son nativas de esta área conocidas hasta la actualidad son *E. urophylla* y *E.*

deglupta (Brussa, 1994). Este género cuenta con unos 600 taxones específicos y sub específicos, se presentan especies altamente sensibles al sitio forestal, condiciones de clima, de suelo y otras que tienen mayor grado de plasticidad. Plasticidad es la capacidad del árbol a adaptarse a distintas zonas a la de su ambiente nativo, condición importante cuando se introduce una especie exótica (Brussa, 1994).

2.2.2. *Eucalyptus dunnii*

El área nativa del *Eucalyptus dunnii* es restringida, ubicado al Noreste de Nueva Gales del Sur y al Sur de Queensland, Australia (Boland et al., 2006). Esta área se encuentra desde 300 a 750 metros sobre el nivel del mar, de clima templado, con un promedio de temperaturas máximas de 27-30 °C y mínimas de 0-3 °C, con hasta 60 heladas por año; húmedo, con precipitaciones estivales del orden de 1000 a 1750 mm anuales (Boland et al., 2006).

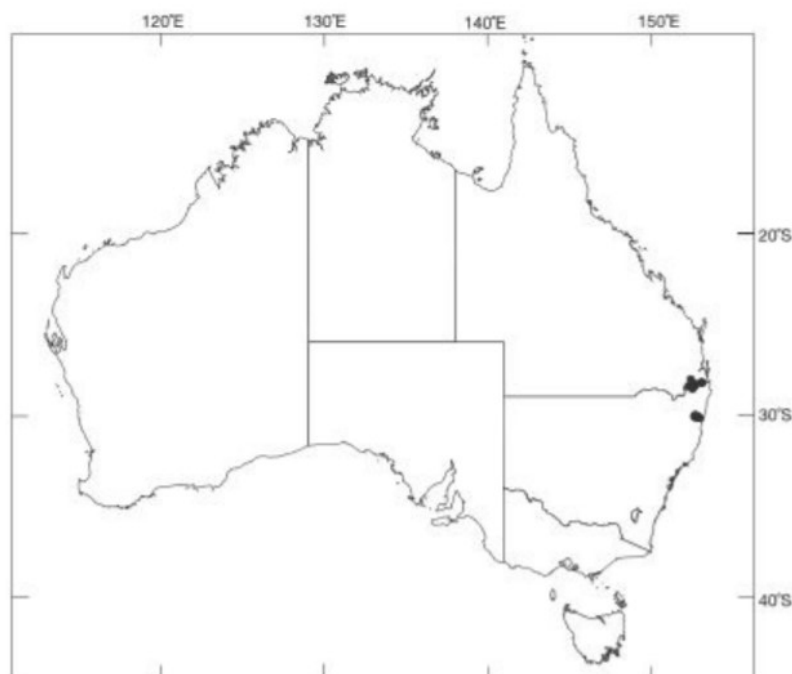


Figura No. 3. Mapa con la distribución natural de *Eucalyptus dunnii*

Fuente: Boland et al. (2006).

Esta especie tiene la ventaja de ser más tolerante a las heladas que *E. grandis* y *E. globulus*, por este motivo es que esta especie se planta principalmente en las zonas bajas del terreno, zonas donde otras especies

presentan mayor dificultad para su crecimiento. Actualmente gracias al avance de técnicas silvícolas, precisamente la producción clonal ha permitido un aumento en el área plantada en Uruguay, factor que se veía imposibilitado debido a la escasa producción de semillas de la especie.

El *E. dunnii* es la especie más plantada en Uruguay, seguida por *E. grandis* y *E. globulus*, y abarca un total de 191.035 ha, lo que representa aproximadamente un 30% total de la superficie de bosques comerciales de eucalyptus. Esta especie al ser más resistente a bajas temperaturas se encuentra localizada en las partes más bajas. Esta es una buena alternativa desde el punto de vista sanitario debido a dos razones, una de ellas es evitar plantar una especie que se vea perjudicada al plantarla en los bajos y sufrir severas consecuencias frente a las heladas, la otra es diversificar especies que resulta beneficioso frente a factores fisiopatológicos o entomológicos (MGAP. DIEA, 2020).

Durante el año 2019, el *Eucalyptus dunnii* fue la especie más plantada en el país, plantándose 36.265 ha, abarcando un total de 49% del total que se plantó en dicho año (MGAP. DIEA, 2020). Lo que significa un aumento de la especie en Uruguay gracias a el avance de las técnicas silvícolas previamente mencionadas, además de que en los últimos años y debido a que el *Eucalyptus globulus* se vio afectado luego de la introducción accidental de *Teratosphaeria nubilosa* al país en el año 2007, lo que generó una disminución de su crecimiento medio anual y por lo tanto su producción de madera.

El *Eucalyptus dunnii* es un árbol de fuste recto, de follaje denso y péndulo. Presenta corteza persistente en la base del tronco y es caduca en largas fajas, el ritidoma es grisáceo a crema. Las primeras hojas son opuestas (10-15 pares); juveniles opuestas o subopuestas, pecioladas (0,5-1,5 cm), ovales a elípticas (4-10 x 3,7 cm), ápice agudo mucronado, base cordada o redondeada, verdes, netamente discoloras. Las intermedias alternas, levemente discoloras. Las hojas adultas son alternas pecioladas (2-3 cm), lanceoladas (10-20 x 2-4 cm), con ápice agudo, acuminado, a su vez presenta la base cuneada, y son hojas levemente discoloras a concoloras (Brussa, 1994). Tiene inflorescencias simples, con 7 flores cada una, axilares, los pedúnculos son achatados (1,5-2 cm); con botones florales ovoides (0,7 x 0,3cm), con pedicelos (0,5 cm) angulosos, opérculo levemente rostrado, más largo que el hipantio. Florece a fines de primavera y verano. Frutos hemisféricos (0,6 x 0,6 cm); disco convexo, notorio, exserto; valvas (3-4) salientes, anchas y fuertes (Brussa, 1994).

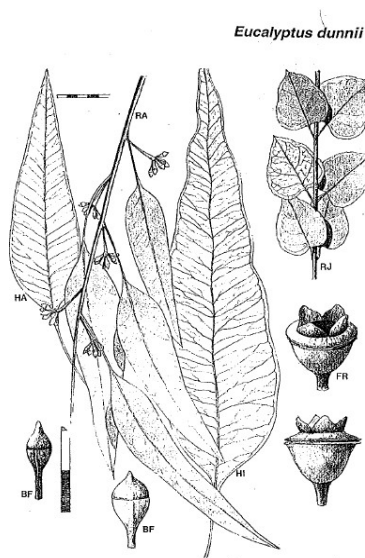


Figura No. 4. Características morfológicas de *Eucalyptus dunnii*

Fuente: Brussa (1994).

2.3. COMPONENTE FORRAJERO

2.3.1. *Lolium multiflorum*

El *Lolium multiflorum* (raigrás) es una especie de gramínea de hábito semi-postrado, presenta un ciclo de vida anual y de producción invernal (Carámbula, 2002). Presenta un alto grado de plasticidad debido a una adaptación a distintas condiciones ambientales, de suelo como también climáticas. Es muy productiva en suelos fértiles y buena respuesta al agregado de nitrógeno. Sobre las condiciones de suelos, crece en suelos bien drenados, pero tolera suelos húmedos o más pesados con menores condiciones de drenaje (Carámbula, 2002). Bajo buenas condiciones de fertilización, esta gramínea presenta una alta digestibilidad (entre 70 y 88%), excelente semillazón y muy buena capacidad de resiembra natural (Carámbula, 2002).

2.4. EVALUACIÓN DEL COMPONENTE FORRAJERO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES

2.4.1. Producción de forraje

La productividad y el valor nutritivo de un forraje en un sistema silvopastoril depende de la interacción entre los factores ambientales y el manejo del sistema, a su vez esta interacción determina el rendimiento de los

animales. Los determinantes del crecimiento del forraje son la temperatura, el agua, el nitrógeno disponible y el tiempo de rebrote de la especie (Peri et al., 2007). Los aspectos principales de la radiación entrante que son modificados por el sistema silvopastoril y afecta la producción de materia seca son la calidad de la luz y su intensidad (Peri et al., 2007). La producción de materia seca de forraje en los sistemas silvopastoriles depende en gran proporción de la interacción entre la disponibilidad de agua en el suelo y la intensidad de luz que llega a las hojas (Bahamonde et al., s.f.).

Existe una relación exponencial negativa entre la producción de materia seca y la luz que alcanza al forraje. Por ejemplo, los rendimientos disminuyeron de 2800 kg MS/ha en campo abierto, con un 100% radiación incidente en el forraje a 500 kg MS/ha bajo sombreado, con un 5% radiación incidente llegando al forraje (Bahamonde et al., s.f.).

Las raíces de los árboles compiten por el agua, pero bajo condiciones de sequía, cuando la humedad del suelo cae por debajo de la capacidad de campo, la sombra producida por los árboles del sistema beneficia el crecimiento del forraje. En estas condiciones, el componente arbóreo puede conservar la humedad del suelo al reducir la evapotranspiración de las pasturas a través de una reducción de la temperatura del dosel y a su vez una reducción de la velocidad del viento (Bahamonde et al., s.f.).

Un trabajo realizado por Bonino y da Rosa (2016), en un campo nativo bajo una plantación comercial de *Pinus taeda* de 7 años con una densidad de 1000 árboles/ha, tuvo una disminución de más de 70% de tasa de acumulación diaria de materia seca. Pasó de un promedio de 18 kg de MS/ha/día en campo natural a menos de 3 kg de MS/ha/día. Otro trabajo nacional determinó que 3 gramíneas C3 (*Dactylis glomerata*, *Lolium perenne* y *Festuca arundinacea*) asociadas con leguminosas (*Lotus corniculatus* y *Trifolium repens*), tuvieron una reducción en la producción de su forraje de entre 50 a 60% cuando fueron cultivadas en asociación a un sistema silvopastoril con *Pinus taeda* de 33 años y una densidad de 136 árboles/ha (Bonino y da Rosa, 2016).

Cuando aumenta el sombreado sobre el componente herbáceo, éste disminuye la tasa de crecimiento diario, debido a una disminución de energía requerida para los procesos fotosintéticos (Varella, 2012).

Se recomienda antes de establecer los árboles en el sistema silvopastoril, sembrar el forraje para que no se vea afectado por esta restricción de luz. A su vez es importante mantener la disponibilidad promedio del 40 al 60% de la radiación disponible en el sistema a lo largo del tiempo, utilizando prácticas de poda de los árboles. Además de hacer un manejo cuidadoso de

pastoreo, el forraje bajo sombreado realiza una menor fotosíntesis, por lo tanto tiene menos reservas que si estuviera a pleno sol (Varella, 2012).

Según Carvalho (1998), si las características de la especie determinan que sea de copa amplia, para una mayor transmisión de luz para el sotobosque, requerirá de mayor espaciamiento que otra especie cuya copa sea poco densa. El manejo de las prácticas silviculturales como sea la especie seleccionada por sus características morfológicas, la densidad y el espaciamiento del componente arbóreo es importante para permitir el acceso de radiación solar al sotobosque.

2.4.2. Interceptación de la radiación fotosintética

La fotosíntesis consiste en, bajo presencia de luz solar, fijar carbono en los tejidos de la planta. El espectro electromagnético de radiación incluye diferentes ondas que van desde las de radio, microondas, infrarrojas, luz visible, luz ultravioleta, rayos X, hasta rayos gamma, según su longitud. La luz visible está entre los 380 y 750 nanómetros, del azul al rojo (Rinker, 1994). El espectro visible que las plantas usan para la fotosíntesis posee una longitud de onda entre 400-700 nm y es llamado la radiación fotosintéticamente activa (PAR, Nair 1993).

Los doseles verdes con concentraciones adecuadas de nitrógeno y clorofila, absorben la luz fotosintéticamente activa (RFA, roja y azul), y reflejan la luz verde e infrarroja, delineando un patrón característico (Figura No. 5).

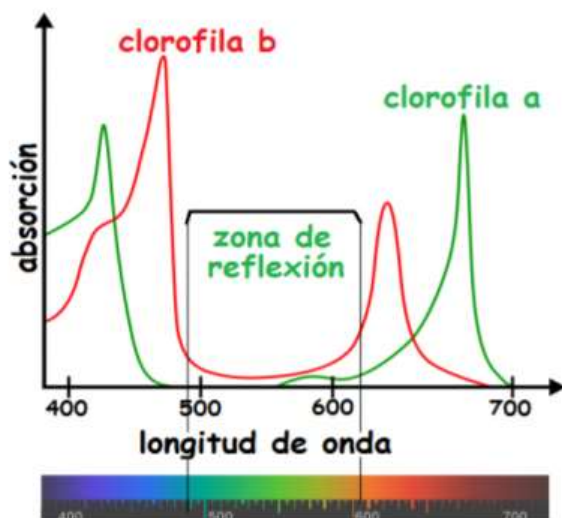


Figura No. 5. Absorción de luz en sus diferentes longitudes de onda por parte de las plantas

Fuente: Campbell (2007).

El IVN (índice de vegetación de diferencia normalizada) presenta una relación estrecha y positiva con la fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (fRFAA) por la vegetación verde y por tanto con la productividad (Baret y Guyot, 1991).

Monteith (1972), planteó que la PPNA (tasa de acumulación de biomasa por unidad de superficie) es directamente proporcional a la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel (RFAA), y que la constante de proporcionalidad viene dada por la eficiencia de conversión de energía radiante en biomasa según la siguiente ecuación:

$$PPNA = EUR \times RFAA = EUR \times RFA \text{ fRFAA}$$

Dónde: EUR (Eficiencia en el Uso de la Radiación) es la eficiencia de conversión de energía en biomasa; RFA es la radiación fotosintéticamente activa incidente y fRFAA es la fracción de esa radiación interceptada por la vegetación.

La radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (RFAA) se obtiene de multiplicar la fracción interceptada (fRFA) por la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA). Se calculan valores diarios de RFA a

partir de valores diarios de heliofanía (horas de sol) con datos de la estación meteorológica según el área geográfica cuál representa (Baeza et al., 2011).

Considerando lo previamente mencionado, y a partir de un estudio realizado en el norte de China, Jose et al. (2008), también determinaron que bajos niveles de radiación fotosintéticamente activa incidiendo en el forraje generan una menor biomasa total del mismo. A medida que las hileras de los árboles están a una distancia mayor entre ellas, la radiación fotosintéticamente activa que incide sobre el forraje es mayor, lo que determina una mayor cantidad de biomasa total del cultivo en el sotobosque.

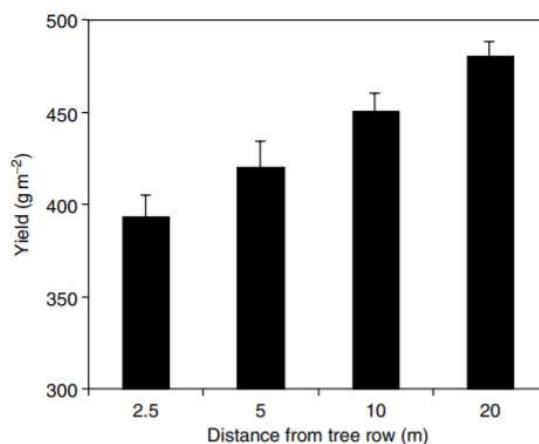


Figura No. 6. Rendimiento de grano de trigo de invierno según la distancia entre filas de árboles en Paulownia, China

Fuente: Jose et al. (2008).

2.4.3. Fluorescencia de la clorofila

Durante el proceso fotosintético los pigmentos (clorofila a, b y carotenoides) absorben la luz. Parte de esta energía absorbida es transferida como energía de excitación, la cual es atrapada por el centro de reacción y otra parte es disipada como calor y en menor grado re-emitida como energía luminosa de menor energía, a ésta última es que se le llama fluorescencia (González et al., 2008).

En contraste con la absorción y utilización del RFA (400-700 nm), las hojas evolucionaron para dispersar (reflejar y transmitir) la radiación solar infrarroja (mayor a 700 nm), porque su nivel energético por fotón no es termodinámicamente suficiente para impulsar la síntesis de moléculas orgánicas (Campbell, 2007).

La distribución de energía entre la que es atrapada por el centro de reacción para la realización de la fotosíntesis, la disipada como calor y la fluorescencia ocurre simultáneamente, lo que quiere decir que el incremento de uno de estos factores determina la disminución de los restantes (González et al., 2008). Por lo tanto, a través de la medición del rendimiento de la fluorescencia de la clorofila se puede obtener información de la eficiencia fotoquímica y la disipación como calor de la energía absorbida (González et al., 2008).

González et al. (2008), también observaron que: *“las características cinéticas de la reacción de la fluorescencia emitida son determinadas por la intensidad luminosa de excitación, la concentración de pigmentos que absorben la luz, la transferencia de la energía de excitación, la naturaleza y orientación de los pigmentos fluorescentes, el estado redox de aceptores y donadores del PSII, el apilamiento de los tilacoides y la translocación de protones, entre otro”*.

Diversos factores físicos o químicos de estrés ambiental como temperaturas altas, heladas, sequía, poca intensidad lumínica, pocos nutrientes disponibles, presencia de herbicidas, fungicidas, entre otros afectan la función de fotosistema II (principal lugar de emisión de fluorescencia) de manera directa o indirecta. Por ello, los cambios en la emisión de la fluorescencia, pueden utilizarse para revelar mecanismos de respuesta, cuantificación de respuestas al estrés e identificación de ciertos contaminantes y sus fuentes (González et al., 2008).

En la actualidad se utilizan principalmente 2 técnicas fluorométricas, una que mide la fluorescencia directa y otra, la fluorescencia modulada. Para medir la fluorescencia modulada se utiliza un fluorómetro (González et al., 2008).

2.4.3.1. Curvas rápidas de respuesta de la ETR a la luz

Según Agati et al. (2000), éstas curvas proporcionan información sobre el estado actual de la fotosíntesis y no deben confundirse con la respuesta clásica a la luz fotosintética. Al graficar la tasa de transferencia relativa de e^- (ETR) frente a la radiación fotosintéticamente activa (RFA), las curvas rápidas de respuesta a la luz proporcionan los siguientes parámetros clave:

- α (alfa), electrones / fotones – pendiente inicial de RLC que está relacionada a la eficiencia cuántica de la fotosíntesis.

- ETR_{max}, μmol electrones / (m²· s) – velocidad máxima de transporte de electrones.
- I_k, fotones μmol / (m²· s) – irradiancia de saturación mínima.

Eilers y Peeters (1988), utilizan un modelo mecánico que considera los procesos de fotosíntesis y fotoinhibición.

El modelo final de la función es:

$$ETR = \frac{RFA}{a \cdot RFA^2 + b \cdot RFA + c}$$

Para describir los puntos de una curva de luz rápida, se varían los tres parámetros libres (a, b y c) de la función del modelo final hasta lograr el mejor ajuste entre la función y los datos.

Con estimaciones para los parámetros libres, los puntos de las curvas de luz rápida se calculan de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{1}{c}$$

$$ETR_{max} = \frac{1}{b + 2 \cdot \sqrt{a \cdot c}}$$

$$I_k = \frac{c}{b + 2 \cdot \sqrt{a \cdot c}}$$

2.4.4. Efecto del sombreado sobre gramíneas

El interés en el establecimiento de forrajes bajo sombra en sistemas silvopastoriles ha crecido en los últimos años, pero es muy importante tener presente las interacciones que se generan al establecer esta relación. Las pasturas y los árboles compiten por agua, radiación y nutrientes. Específicamente la radiación es el elemento considerado más importante y determinante del potencial de crecimiento de las especies forrajeras que crecen bajo los árboles en un sistema silvopastoril (Varella, 2008).

Según Mesa y Rubí (2010), el rendimiento de los forrajes en los potreros disminuye por la presencia de árboles que compiten con las herbáceas, principalmente por la luz. Sin embargo, debido a la menor temperatura y radiación solar en el sotobosque, normalmente la calidad del forraje aumenta ya que disminuye el contenido de la fibra detergente neutro y aumenta la digestibilidad.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y PERÍODO EXPERIMENTAL

El experimento se llevó a cabo entre los meses de setiembre del 2019 y febrero del 2020 en el establecimiento “Lomas Bien” (Padrón 18615), perteneciente a Martín Pérez del Castillo (Figura No. 7). Dicho predio se encuentra ubicado en el Paraje Costas Mansavillagra, sección policial número 14 del departamento de Florida (las coordenadas del establecimiento son Latitud 33°67'31,7" S y Longitud 055°63'33,6" W).



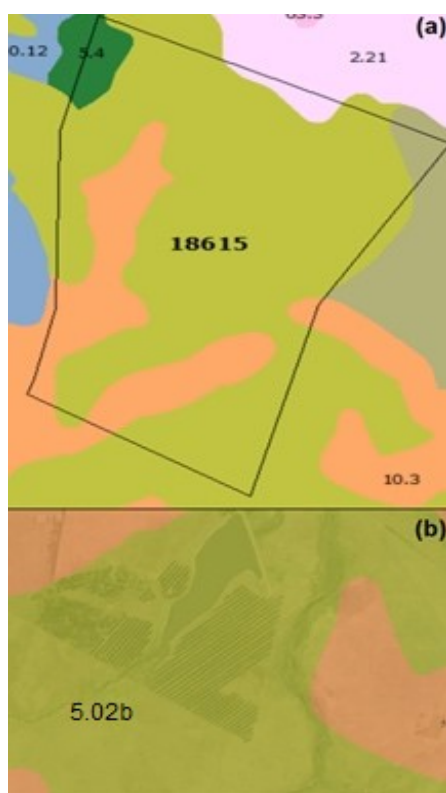
Figura No. 7. Imagen satelital con la ubicación de la unidad experimental

Fuente: MGAP. RENARE (2020).

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS

Este experimento se realizó en el padrón número 18615, sobre suelo 5.02b y que tiene un índice de productividad del sitio de 101 según la carta de descripción de suelos CONEAT (Figura No. 8). Según Annunziatto et al. (2016), la productividad de esa zona CONEAT de prioridad forestal es baja.

Los suelos predominantes para este grupo en el predio son Brunosoles Subeutricos Háplicos moderadamente profundos a superficiales a los que se asocian Inceptisoles a veces superficiales. El relieve es ondulado y ondulado fuerte, con pendientes de entre 5-7%. El horizonte superior es de color pardo y pardo rojizo, a veces pardo amarillento, de textura franca, franco gravilosa o arenoso franca con gravillas abundantes, la fertilidad es media, a veces baja. La rocosidad es moderada y varía entre un 2 al 10% del área con afloramientos. En toda el área pueden existir bajos angostos, asociados a vías de drenaje de poca importancia, que contienen Gleysoles Lúvicos y Brunosoles Eutricos Típicos o Lúvicos. Este grupo de suelo corresponde a la unidad San Gabriel-Guaycurú en la carta a escala 1:1.000.000.



a) Índices de productividad CONEAT incluidos en el padrón y zona de estudio, b) Imagen Satelital con los correspondientes grupos CONEAT donde se realizó el experimento

Figura No. 8. Imagen satelital del predio

Fuente: MGAP. RENARE (2020).

Se realizó un análisis de suelo para el cual se tomaron tres ubicaciones, posición centro del callejón, posición cercana a los árboles (de entre 1 a 3 metros del mismo) y la ubicación del control. En las primeras dos se tomaron 20 submuestras para cada ubicación, mientras que en la ubicación del control fueron realizadas 10 submuestras. Todas las submuestras tuvieron una profundidad de 0-10 cm y fueron homogeneizadas y encaminadas para laboratorio.

Cuadro No. 1. Análisis químico del suelo realizado en dos condiciones bajo influencia del componente arbóreo

Punto de muestreo	pH	CE* (uS)	P* (ppm)	CO* (%)	MO* (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Entrefila	4,8	265	4	2,79	4,82	55	25	20
Fila	5,0	305	6	3,12	5,37	55	25	20
Control	5,1	546	7	4,28	7,38	50	22	28

Entrefila: muestras tomadas en el medio del callejón.

Fila: próximo a la línea de árboles y en el control.

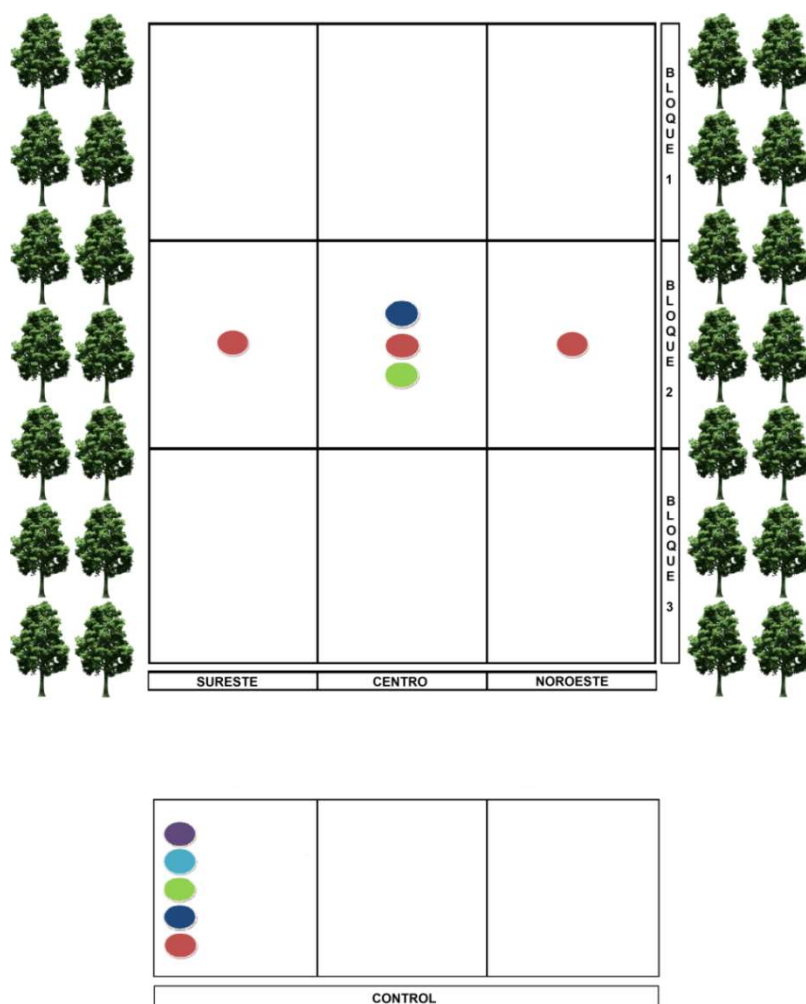
*CE: conductividad eléctrica; P= fósforo; CO= carbono orgánico; MO= materia orgánica.

Los resultados de la fila y la entrefila fueron similares, variando un 15% en la conductividad eléctrica, un 11,8% en el carbono orgánico y un 11,4% en la materia orgánica. A su vez, si se toma como referencia la entrefila, el control presenta un 53% más de carbono orgánico, 53% más de materia orgánica, 75% más de fósforo y un 106% más de conductividad eléctrica. Mientras que la diferencia del control con la fila es de 37% más de carbono orgánico, 37,4% más de materia orgánica, 16,7% más de fósforo y un 79% más de conductividad eléctrica.

Las proporciones de las distintas partículas de suelo (arena, limo y arcilla) encontradas en el experimento permite clasificar el suelo presente en las condiciones bajo influencia silvopastoril como franco arenoso, y el suelo del control como franco arcillo arenoso, debido a una composición de suelo más arcillosa frente a dentro del sistema silvopastoril.

3.3. VARIABLES MICROCLIMÁTICAS

Se instalaron sensores para la medición de variables microclimáticas dentro del sistema silvopastoril y en el control a campo abierto (Figura No. 9). Se registró la temperatura y humedad del aire (sensores VP-4, Meter®), y suelo (medidas con sensores 5TM, Meter®), la radiación fotosintéticamente activa (sensor QSO-S, Meter®), precipitación (sensor ECRN-100, Meter®) y la velocidad y dirección del viento (medida con anemómetro Davis). Todos los sensores tuvieron una frecuencia de 10 minutos entre cada medición y conectados a un datalogger (Em50 Meter®).



Sensores de radiación son representados en rojo, sensores de temperatura y humedad del aire son representados en azul, sensor de temperatura y humedad del suelo es representado en

verde, sensor de velocidad y dirección del viento es representado en celeste y sensor de precipitaciones es representado en violeta.

Figura No. 9. Representación de las unidades experimentales del presente experimento, con detalle de la ubicación de los sensores para evaluación microclimática

3.4. DISEÑO Y MATERIAL EXPERIMENTAL

La preparación del área experimental consistió en una aplicación del herbicida glifosato a una dosis de 6l/ha, el día 11 de marzo de 2019, lográndose un excelente control de la vegetación presente. Aproximadamente 100 días después se detectó la presencia de la especie *Lolium multiflorum* (raigras anual), especie oriunda en el banco de semillas del suelo, que presentó una contribución promedio de cerca del 95% de cobertura vegetal en las distintas unidades experimentales.

Debido al buen desarrollo de esta especie dominante y a las condiciones experimentales adecuadas para su estudio en distintas condiciones microclimáticas generadas por la presencia del componente arbóreo, el raigrás fue el material experimental de la presente tesis. Fueron realizadas dos aplicaciones de nitrógeno (50 kg de N por aplicación) en la forma de urea, en los días 4 de julio y 19 de setiembre de 2019.

La especie *Lolium multiflorum* fue evaluada en distintas condiciones de interferencia del componente arbóreo. El componente arbóreo presente en la unidad experimental es *Eucalyptus dunnii*, plantado en el año 2012. El marco de plantación consiste en callejones de 15 metros de ancho, con filas dobles apareadas a 2 metros y 4 metros entre plantas, con orientación de las filas Noreste – Suroeste (Figura No. 10).



Figura No. 10. Imagen satelital con la ubicación del control y el sistema silvopastoril dentro de la unidad experimental

Fuente: MGAP. RENARE (2020).

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con tres repeticiones. El criterio para la definición del bloque fue la pendiente. Los tratamientos estudiados fueron basados en la posición en relación a los árboles y control. Los tratamientos fueron: 1. Control; 2. Sotobosque en la posición noroeste adyacente a los árboles (a; Sureste); 3. Sotobosque en la posición central (b; centro); y 4 Sotobosque en la posición sureste adyacente a los árboles (c; Noroeste) (Figura No. 11). Las unidades experimentales (UEs) son parcelas de 5m x 16m (Figura No. 9).

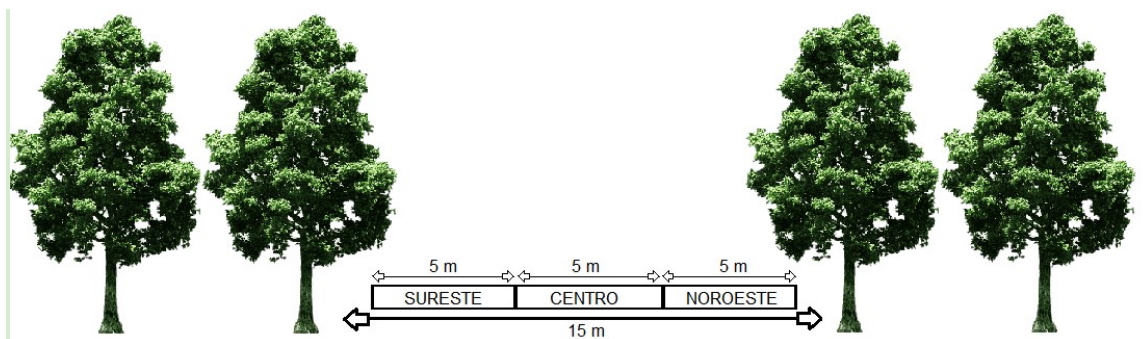


Figura No.11. Diseño esquemático de las posiciones de evaluación en relación con las hileras (Sureste, centro y Noroeste) que constituyen los tratamientos en la condición bajo influencia del componente arbóreo, y sus respectivas medidas

3.5. DETERMINACIONES DEL COMPONENTE FORRAJERO

Las determinaciones realizadas en el componente forrajero fueron llevadas a cabo en tres momentos: el 6 de noviembre de 2019, el 18 de diciembre de 2019 y por último el 20 de febrero de 2020.

3.5.1. Masa de forraje y altura del pasto

Para determinar la masa de forraje se procedió a ubicar en cada unidad experimental 4 cuadros de 0,3m x 0,3m distribuidos aleatoriamente dentro de las mismas. En cada cuadro se cortó el forraje ubicado dentro del mismo a ras del suelo con una máquina de esquila y se colocaron las muestras en bolsas de papel. Estas muestras fueron pesadas en fresco y luego secadas en estufa de aire forzado a 60°C, por un período de 48 a 72 horas, hasta que las mismas tuvieron un peso constante.

En las mismas UEs en las cuales se determinó la masa de forraje, se midió la altura del pasto. Ésta se realizó tomando una medida promedio de la altura del dosel a partir de una regla graduada en centímetros.

3.5.2. Eficiencia fotosintética de la pastura

Se realizaron curvas de respuesta a la luz mediante un fluorómetro PAM 2500 (Walz, Alemania). Se determinó la Tasa Relativa de Transporte de Electrones (ETR) a diferentes niveles de PAR (500, 1000, 1500 Y 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) suministrada por el equipo. Para esto se aclimató la hoja a la oscuridad durante 30 minutos previo a las mediciones.

Para el cálculo de los parámetros IK, ETRmax y alfa se tomaron los datos y luego se ajustó la función "Curva de luz" de PamWin-3 según Eilers y Peeters (1988).

Las mediciones se realizaron en la hoja más joven de raigrás totalmente expandida, siendo las mismas aclimatadas a la oscuridad por 30 minutos con un dark leaf clip dlc-8. Luego, se realiza la curva rápida de luz.

3.6. DETERMINACIONES DEL COMPONENTE ARBÓREO

Las mediciones dasométricas de los árboles, es decir, la altura total, altura de copa verde, proyección de copa y diámetro a la altura de pecho (DAP) fueron realizadas en el día 20 de febrero de 2020. Es importante considerar que para dicha fecha la edad de los árboles era de 9 años.

3.6.1. Altura total

Para medir la altura total se determinó la altura comprendida entre la base del árbol y el tope de la copa (Sorrentino, 1994). La altura total de cada árbol se midió a través de un clinómetro hipsómetro, donde se configuró el instrumento de manera que marque la misma distancia de la cual se midió cada árbol. Se marcó la base del árbol y el ápice, a cierta distancia, el clinómetro entrega la altura de cada árbol mediante cálculos trigonométricos (Sorrentino, 1994).

3.6.2. Altura de copa verde

La altura de copa verde fue determinada por la medición de la distancia comprendida entre la extremidad superior del fuste hasta el ápice del árbol (Sorrentino, 1994). Para esta medición fue utilizado un clinómetro, obteniéndose la altura de copa verde como suma o diferencia de las dos lecturas que se hayan realizado con el clinómetro.

3.6.3. Proyección de copa

Se evaluó la proyección de copa mediante los diámetros o radios de copa (Sorrentino, 1994). El instrumento utilizado para determinar la proyección de la copa fue una cinta métrica (metro) y se determinó al mediodía, cuando el sol se encontraba encima del componente arbóreo. Este parámetro determina el total sombreado de cada árbol sobre el componente forrajero.

3.6.4. Diámetro de altura de pecho

Para la determinación del diámetro de altura de pecho se realizaron mediciones con una forcípula graduada a 1 mm a 1,30 m desde el nivel del suelo. Se tomaron dos medidas por árbol, perpendiculares la apreciación entre ella. Esto es así para árboles que no poseen raíces adventicias o que si las poseen, se encuentran a menos de un metro de altura (Sorrentino, 1994).

3.6.5. Medidas dasométricas promedio del componente arbóreo

Cuadro No. 2. Medidas dasométricas promedio de los árboles del experimento

Parámetro	Medida (m)
Altura total	14,5 (± 6)*
Altura de copa verde	10,2 ($\pm 4,6$)
Proyección de copa	2,9 ($\pm 1,2$)
Diámetro de altura de pecho	17,4 ($\pm 7,9$)

* desvío estándar de la muestra entre paréntesis

3.7. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Los sensores brindaban información cada 10 minutos, por lo que lo que el primer paso fue realizar promedios para tener la información sintetizada de forma horaria.

Para el caso de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) luego de tener la información horaria se promediaron para cada mes los valores de RFA registrados en los sensores desde las 6am hasta las 6pm para luego obtener gráficas mensuales de RFA y poder compararlas.

Con la información de temperatura del aire y suelo se calcularon promedios, máximo, mínimo y amplitud térmica para todo el periodo estudiado y luego se graficó esta información; de igual manera se procedió para los datos de humedad del aire y suelo, calculando para estos parámetros solamente los promedios mensuales.

Para el cálculo del índice de temperatura y humedad (ITH) se utilizó la información de temperatura y humedad brindada por los sensores y aplicando la fórmula correspondiente se calculó el valor del mismo para cada hora, de igual modo se procedió para el cálculo del índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA), donde se ajustó la ecuación de ITH agregándole a ésta los datos de radiación incidente y velocidad del viento proporcionada por los sensores. Luego del cálculo de los valores promedios de ITH e ITHA se graficaron los mismos para todo el periodo evaluado y se sumaron las horas en que dichos

índices presentaron un valor mayor a 72 y 80, luego se graficó nuevamente esta información.

Para la información de las precipitaciones el procedimiento fue diferente, ya que se realizó una sumatoria mensual de las mismas para luego graficarlas y poder comparar esta información con la serie histórica.

El programa ShadeMotion (del CATIE, año 2020) se utilizó para obtener la proyección de sombra generada por el componente arbóreo del sistema silvopastoril. En el primer paso se definió un ángulo de inclinación, orientación, pendiente y se ingresaron los datos de la latitud correspondiente al lugar donde se realizó la evaluación. Luego se plantó el componente arbóreo con su correspondiente marco de plantación, utilizando las medidas reales de parámetros como el DAP, altura y ancho de copa y altura de tronco de cada uno de los árboles. Con todos estos datos ingresados al programa se realizó la simulación para obtener la proyección de sombra del sistema previamente establecido. La información obtenida se exportó mediante un archivo de Excel, donde a los datos brindados se les aplicó una fórmula para realizar el cálculo de porcentaje de sombra y luego graficarlo.

Para saber si la producción de forraje en los diferentes tratamientos era significativa, se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Con el promedio en kg MS ha⁻¹ de los diferentes tratamientos y a partir de un análisis estadístico de Tukey con un 0,05% de cometer error, se determinó la existencia de diferencias significativas del tratamiento control frente a los tratamientos dentro del sistema silvopastoril.

Se utilizó el programa PamWin para visualizar la información proporcionada por el fluorómetro, posteriormente esta información fue llevada a Excel donde se realizó una planilla que luego se utilizó como fuente de información para procesar los datos en el programa estadístico Infostat. Este programa brindó un conjunto de datos necesarios para realizar los cálculos de los parámetros α , ETR max e Ik.

Se realizaron análisis estadísticos por medio del paquete estadístico JMP[®] versión 10 (de SAS Institute).

Para todas las variables analizadas, fue utilizado el modelo experimental que corresponde a un diseño en bloques completos al azar (DBCA), el cual se representa como:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Siendo,

Y_{ij} : variable de interés;

μ : media general;

τ_i : efecto del i -ésimo tratamiento;

β_j : efecto del j -ésimo bloque;

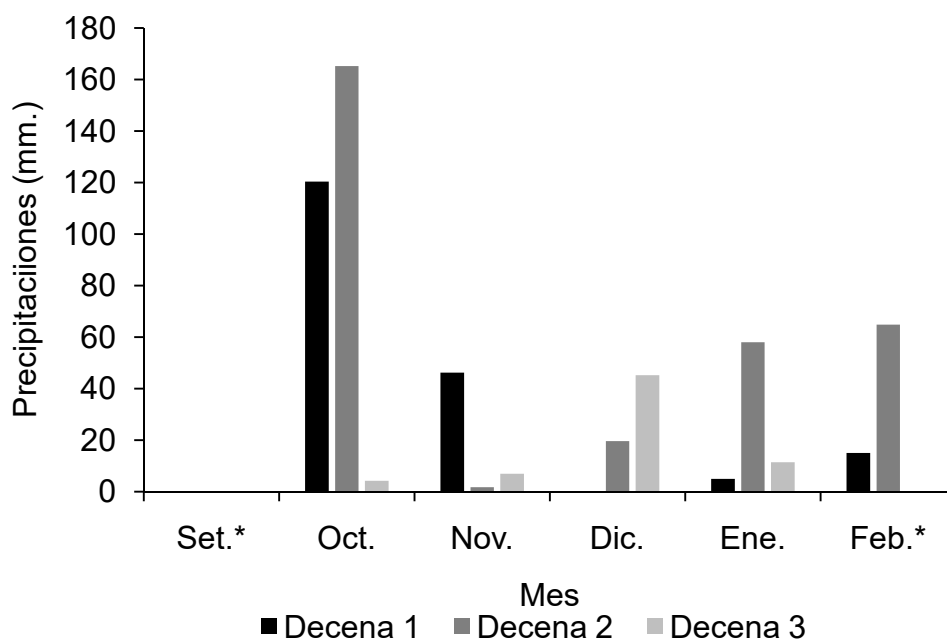
ε_{ij} : es el error aleatorio asociado a la observación Y_{ij} .

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN MICROCLIMÁTICA

4.1.1. Precipitaciones

Durante el período experimental, se observó que en la última decena de setiembre no se registraron eventos de precipitación (los sensores fueron instalados en el día 19/09/2019) (Figura No. 12). Ya en las dos primeras decenas del mes de octubre se obtuvieron los mayores registros pluviométricos del periodo evaluado, con un volumen de 120 mm en la primera y de 165 mm en la segunda decena. En los meses restantes, a pesar de presentar niveles más bajos de precipitación, se observó una distribución equilibrada en el tiempo, siendo que todos los meses presentaron decenas con valores de precipitación llegando a los 45,2 mm.

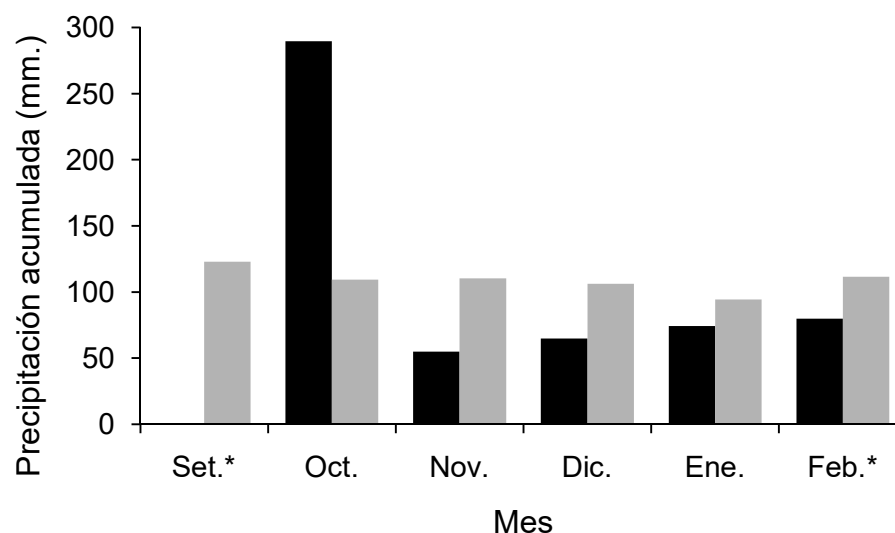


* los registros pluviométricos comenzaron el 19 de septiembre y culminaron el 20 de febrero.

Figura No. 12. Sumatoria total de precipitaciones acumuladas evaluadas en períodos de diez días

Al comparar las precipitaciones registradas en este trabajo con la serie histórica, se observó que el valor acumulado mensual para el período en estudio se mantuvo siempre por debajo de la serie histórica, con excepción del mes de octubre (Figura No. 13). En el referido mes la precipitación acumulada llegó a 290 mm, valor que fue casi tres veces mayor al promedio histórico y que

hizo que se registraran las mayores diferencias entre el año en estudio y el promedio de la serie histórica. De noviembre a febrero, se observa que el descenso de la precipitación varió de un 50% (noviembre) a un 21% (enero) en relación al promedio histórico.



* las barras negras corresponden al período experimental y las barras grises a la serie histórica 1986-2018. Los registros comenzaron el 19 de septiembre y culminaron el 20 de febrero.

Figura No. 13. Registro mensual de la precipitación acumulada durante el período experimental y comparación con la serie histórica 1986-2018

Fuente: Datos históricos provenientes de los registros climáticos del SUL. CIEDAG.¹

4.1.2. Radiación

Los mayores valores de RFA acumulados mensualmente fueron registrados por el sensor que se encontraba en el control (Cuadro No. 3). En las condiciones de sotobosque, se observó que los sensores ubicados en las posiciones Noroeste, Centro y Sureste recibieron 26%, 45% y 53% respectivamente de la RFA recibida a sol pleno. Esa disminución significativa en los valores de RFA cuando se incorpora la presencia de árboles concuerda con Feldhake y Belesky (2009), que mencionan que el principal aspecto negativo

¹ SUL. CIEDAG. (Secretariado Uruguayo de la Lana. Centro de Investigación y Experimentación Dr. Alejandro Gallinal, UY). s.p. Datos históricos provenientes de los registros climáticos: 1986-2019. (sin publicar)

para el crecimiento forrajero en un sistema silvopastoril es la reducción en cantidad y calidad de radiación fotosintéticamente activa. Éste es considerado uno de los aspectos microclimáticos más estudiados y afectados por los árboles en un sistema silvopastoril. Los resultados obtenidos también concuerdan con Dupraz et al. (2018), quienes mencionan que árboles con orientación Norte-Sur (en zonas de media o baja latitud) generan en el sotobosque tanto sol como sombra durante el día, resultante de una mayor uniformidad de la irradiancia en el callejón, mientras que los árboles con orientación Este-Oeste pueden estar a pleno sol o sombra durante todo el día, dependiendo de su posición en el callejón. En este caso, tener una orientación Noreste-Suroeste permitió obtener resultados intermedios entre estos dos casos.

Cuadro No. 3. Promedio de los valores acumulados diarios de RFA (mol.m^{-2}) registrados en los diferentes sensores del experimento

Tratamiento	Mes					
	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
Control	20,9 ($\pm 1,4$) [*]	15,7 ($\pm 8,4$)	23,6 ($\pm 6,8$)	25,8 ($\pm 6,1$)	25,2 ($\pm 6,2$)	23,5 (± 5)
SSP NO	6 ($\pm 0,3$)	4,8 ($\pm 2,8$)	7,5 ($\pm 2,3$)	7,8 (± 2)	7,1 ($\pm 1,8$)	6,9 ($\pm 1,8$)
SSP SE	9,9 (± 1)	7,7 (± 5)	11,4 ($\pm 4,3$)	11,1 ($\pm 4,6$)	11,4 (± 4)	10,2 ($\pm 3,1$)
SSP Cen	9,9 ($\pm 0,9$)	8,8 ($\pm 4,8$)	13,2 ($\pm 4,5$)	13,7 ($\pm 3,9$)	13,1 (± 4)	12 ($\pm 3,3$)

*desvío estándar de los distintos días entre paréntesis.

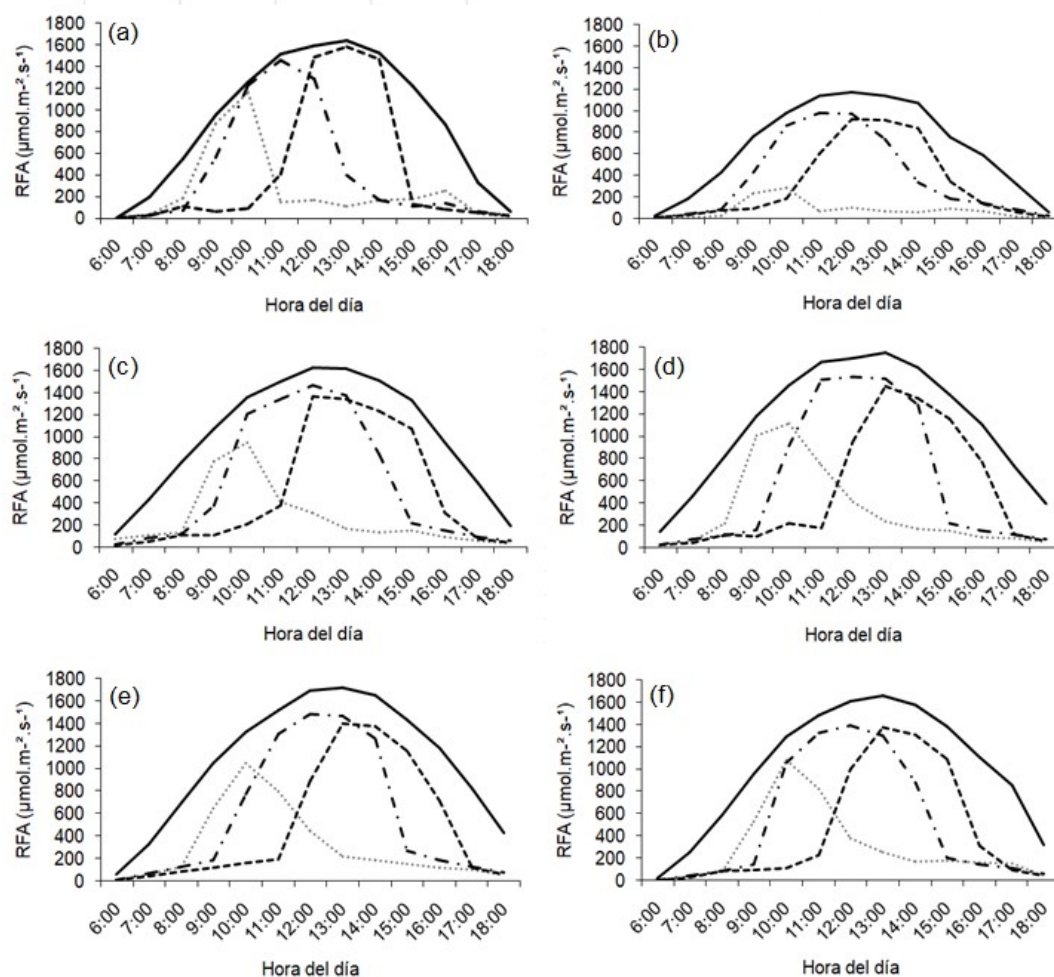
La sumatoria de RFA no incluyó todos los días de los meses de setiembre y febrero.

SSP NO: sistema silvopastoril Noroeste; SSP SE= sistema silvopastoril Sureste; SSP Cen= sistema silvopastoril centro.

Buscando comprender el origen de los valores acumulados de RFA observados en la tabla anterior, se realizó un análisis del comportamiento diario de la RFA para el periodo diurno (de las 6 hasta las 18 horas) (Figura No. 14), donde se percibió la variación horaria de la radiación solar, y como ésta es

afectada por la ubicación de los sensores respecto a la fila de los árboles y por el momento de medición (Figura No. 14). Se observó que en todos los meses el sensor ubicado a pleno sol presentó los mayores valores de RFA y que los sensores ubicados en el centro y al Sureste del callejón presentaron un patrón de sombreado similar, pero como era de esperarse, con valores de RFA menores. Ya el sensor ubicado en la posición Noreste del callejón presentó consistentemente valores inferiores de RFA, con picos de radiación en las primeras horas del día y luego un descenso marcado a partir de las 10 horas, aproximadamente. Este comportamiento se relaciona al movimiento aparente del sol (Figura No. 15) en relación a la disposición de los árboles, que permite la entrada de RFA al sotobosque en las primeras horas del día (en la posición Noroeste), siendo que durante el resto del día los sensores ubicados en centro y Sureste tienen valores superiores. Cuanto más cercano al solsticio de invierno, mayor es el ángulo de inclinación del sol hacia el Norte en la latitud estudiada, y por lo tanto la radiación pasa a ser interceptada mayormente por la canopia de los árboles, generando así un mayor sombreadamiento en el callejón.

El mes de octubre presentó los menores valores de RFA, si se observa esta información junto a la de precipitaciones, se puede suponer que esto se debió a las grandes precipitaciones que se registraron este mes.



Registros tomados desde las 6 am a las 6 pm, para los meses de setiembre (a), octubre (b), noviembre (c), diciembre (d), enero (e) y febrero (f). La línea negra continua corresponde al control, línea gris punteada al sensor Noroeste, línea negra con guiones al sensor Sureste y línea negra con puntos y guiones sensor central.

Figura No. 14. Promedios diarios de radiación fotosintéticamente activa (RFA) para los diferentes meses del experimento



El color naranja representa el solsticio de invierno y el color amarillo representa el solsticio de verano.

Figura No. 15. Diagrama de la trayectoria aparente del sol en relación a las filas de árboles durante el día del solsticio de invierno y de verano

Teniendo en cuenta la posición aparente del sol hacia el Norte durante la mayor parte del día (sobre todo en los primeros meses del ensayo), la interceptación de la radiación por la canopia de los árboles genera variabilidad espacial y temporal en el sotobosque, creando condiciones contrastantes en la disponibilidad de recursos para los cultivos herbáceos (Figura No. 16).

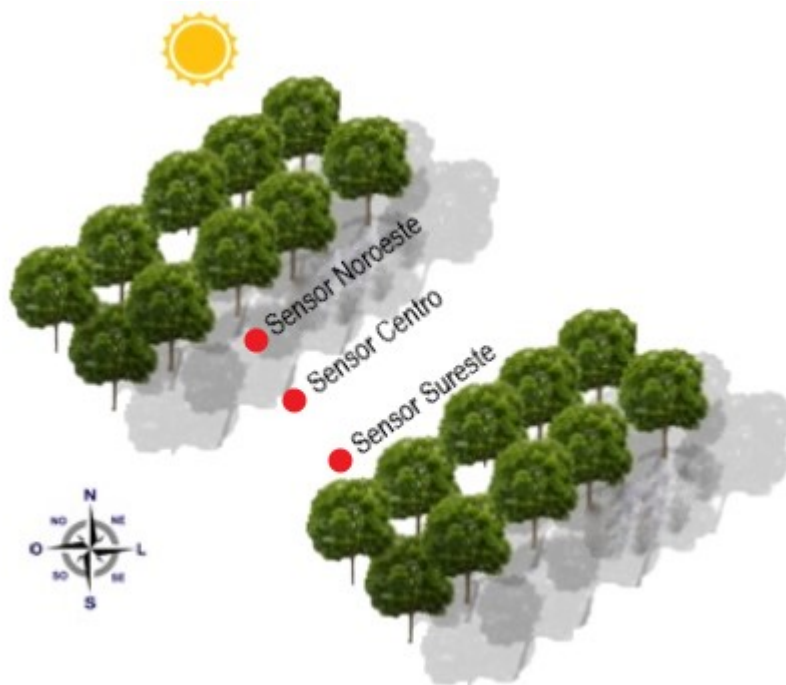


Figura No. 16. Representación esquemática de la posición aparente del sol hacia el Norte y sus efectos en la interceptación de la radiación por la canopia de los árboles del presente estudio, generando variabilidad espacial en el régimen de sombreado del sotobosque

4.1.2.1. Porcentaje de sombra

Paralelamente a los datos de RFA registrados por los sensores, se realizó una simulación de las horas de sombra acumuladas en el sotobosque por medio del software ShadeMotion. Con las medidas reales de todos los árboles del experimento (Cuadro No. 2) ingresados en el software, se detectó que el porcentaje de sombra presenta los mayores valores en octubre (período donde se presentan los menores valores de radiación del experimento), luego disminuye hasta el mes de diciembre, se mantiene constante en enero y vuelve a aumentar en el mes de febrero (cuando los valores de radiación nuevamente comienzan a disminuir) (Figura No. 17). A pesar de que para dicha simulación se consideró que el monte tuvo orientación Norte-Sur (la cual difiere al presente experimento), se obtuvo una aproximación de las tendencias registradas por los sensores. El uso de modelos de simulación de sombra para este tipo de sistema es fundamental para la planificación del mismo, una vez que permite la predicción de los cambios microclimáticos y su impacto en el componente herbáceo. De acuerdo con Lin et al. (2001), cuando los valores de sombreado superan el 50% en el sotobosque forestal se generan condiciones limitantes

para el desarrollo adecuado de especies C3. De acuerdo con la simulación efectuada, esos valores no superaron el 44%, no teniendo (en el promedio del callejón) un efecto restrictivo para el desarrollo del raigrás en el sotobosque. Sin embargo, hay que considerar que existe, en estos sistemas, una alta variabilidad espacial de la RFA, aspecto no contemplado por la presente simulación. Además, no se consideran los meses de invierno en la Figura No. 17, meses que debido a la inclinación aparente del sol hacia el Norte pueden generar porcentajes de sombra restrictivos al adecuado establecimiento y desarrollo de las especies herbáceas.

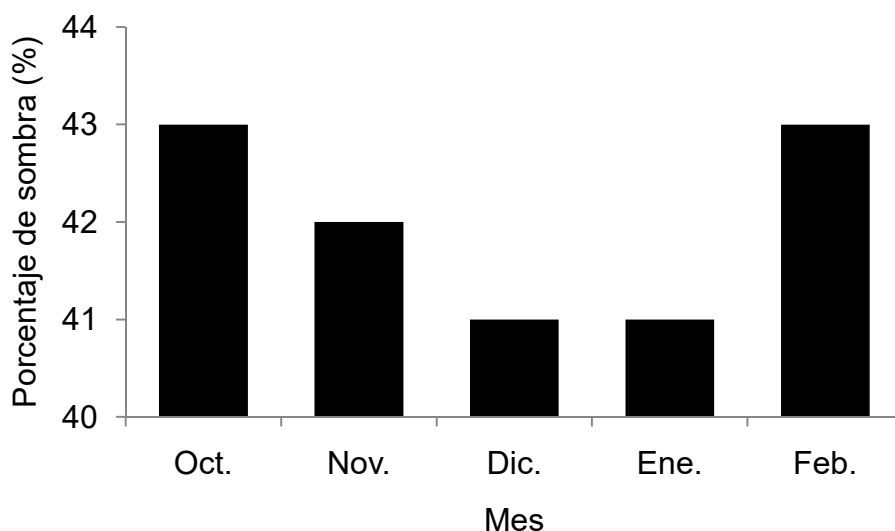


Figura No. 17. Porcentaje de sombra en el sistema silvopastoril para cada mes del período evaluado

4.1.3. Temperatura del aire

Se observó la evolución de la temperatura promedio del aire desde el mes de septiembre a febrero (Figura No. 18a), siendo sensiblemente mayor la temperatura del control respecto a la del sistema silvopastoril para los meses de setiembre y octubre, estas diferencias fueron de 1,14% mayor en setiembre y de 1,57% mayor en octubre. En noviembre se igualan la temperatura promedio y de diciembre a enero es mínimamente mayor la temperatura del sistema silvopastoril con respecto el control, esa diferencia en los tres meses es de aproximadamente 1%.

De igual forma, para las temperaturas máximas (Figura No. 18c) y mínimas del aire (Figura No. 18d), se determinó un aumento marcado desde el

mes de octubre al mes de diciembre. Se podría decir que en los meses de setiembre y octubre la temperatura fue levemente mayor en el control, invirtiéndose para los meses de diciembre y enero.

Para el caso de la temperatura máxima (Figura No.18c), el mes que presentó los mayores valores del silvopastoreo con respecto a el control fue diciembre, donde fue $1,14^{\circ}\text{C}$ superior, lo que representó un 3,7% de variación. En el mes de enero el control presentó su mayor temperatura, $30,4^{\circ}\text{C}$, mientras en el sistema silvopastoril fue de $31,8^{\circ}\text{C}$ en el mes de diciembre.

Estudios realizados por Cabrera et al. (2016), demostraron una diferencia en la temperatura máxima dentro de sistemas silvopastoriles de $3,5^{\circ}\text{C}$ menor que a campo abierto, con una densidad de 1.189 pl/ha. Mientras que en un monte de 642 pl/ha se registró una menor diferencia en la temperatura máxima, siendo ésta de $1,7^{\circ}\text{C}$.

A diferencia de los resultados obtenidos por Cabrera et al. (2016), no se observó grandes diferencias en la temperatura del aire a campo abierto en comparación con el sistema silvopastoril, sabiendo que el aire está en continuo movimiento, se determinó que estas escasas diferencias se debieron a la cercanía entre el control y el sistema silvopastoril.

En cuanto a la temperatura del aire mínima promedio (Figura No. 18d), se determinó que las diferencias son muy pequeñas, no superando 1°C . No se llegó a 0,1% de diferencias entre el control y el sistema silvopastoril. La mínima temperatura mínima del aire promedio mensual se registró en el mes de setiembre y fue en el sistema silvopastoril con $4,45^{\circ}\text{C}$, mientras que la máxima temperatura mínima promedio mensual también se registró en el sistema silvopastoril con un valor de $16,79^{\circ}\text{C}$ para el mes de febrero.

En cuanto a la amplitud térmica de la temperatura del aire (Figura No. 18b), se observó que si bien se presentan diferencias entre el control y el sistema silvopastoril, éstas son pocas. Durante los meses de setiembre, octubre y noviembre fue un poco mayor la amplitud en el control que el sistema silvopastoril, alcanzando la máxima diferencia en noviembre y fue de $1,1^{\circ}\text{C}$ mayor en el control que el sistema silvopastoril (6,27%). Para los meses de diciembre, enero y febrero, fue levemente mayor la amplitud térmica en el sistema silvopastoril, alcanzando una diferencia máxima en el mes de enero de $0,67^{\circ}\text{C}$, es decir, de 4,25% de variación.

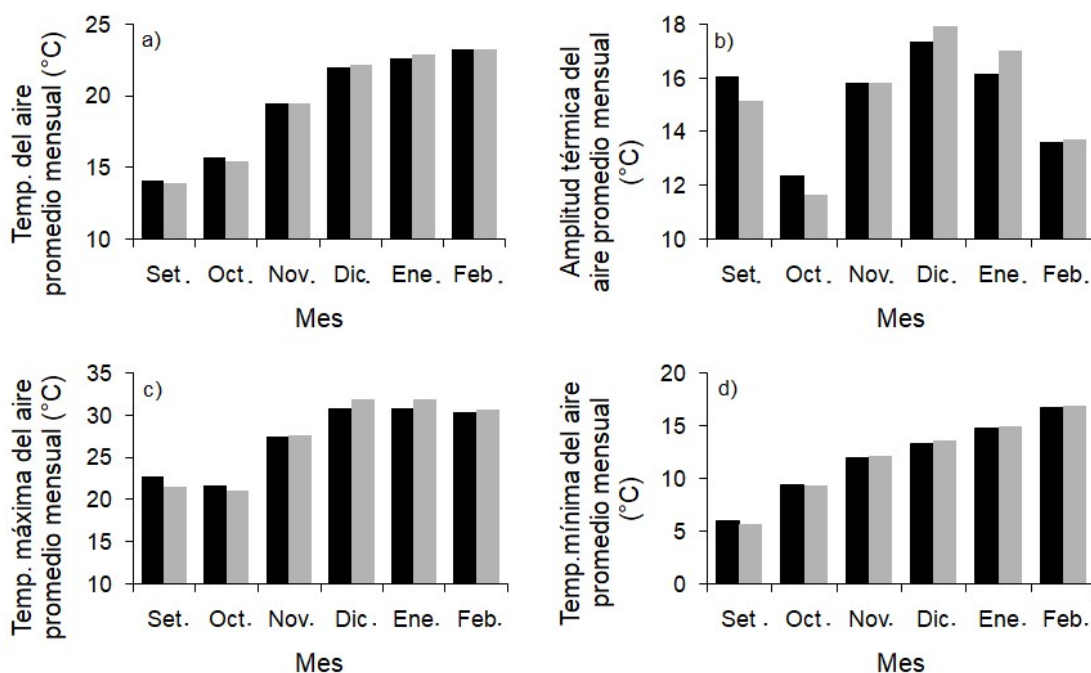
Los resultados obtenidos en este estudio no difieren con lo reportado por Munka (2017), donde una mayor cobertura arbórea en estos sistemas disminuye la amplitud térmica en los callejones, es decir, generan en meses de

invierno, temperaturas mínimas mayores, así como en meses de verano, temperaturas máximas menores.

En el mismo sentido, estudios en monte de *Pinus taeda* de 8 años han demostrado una disminución de temperatura en verano de valores en 2,6-2,8°C entre las 10 y las 20hs, así también aumentando las temperaturas nocturnas en invierno (aproximadamente +1°C), generando la disminución en la amplitud térmica en ambas estaciones (Fedrigo et al., 2018).

A diferencia de esto, West (2003), determinó que la sombra generada evita estrés en el periodo estival generado por radiación directa, pero no afecta en si la temperatura del aire.

En cambio, se observó un resultado de mayor amplitud térmica para los meses estivales en el sistema silvopastoril, el cual está dado por el aumento de las temperaturas máximas, pero esta diferencia es muy pequeña y se debe a efectos aleatorios y no a un efecto que puede ser desarrollado por el sistema silvopastoril.



Promedio mensual de la temperatura del aire (a), de la amplitud térmica del aire (b), de la temperatura máxima del aire (c) y de la temperatura mínima del aire (d).

Las barras de color negro representan el control mientras que las barras de color gris representan el sistema silvopastoril.

Figura No. 18. Comportamiento de la temperatura del aire en el periodo evaluado

4.1.4. Temperatura del suelo

Al igual que para la temperatura del aire, los sistemas silvopastoriles generan una disminución en la amplitud térmica para la temperatura del suelo (Munka, 2017). A su vez, la magnitud de la disminución en la amplitud térmica va a variar según cuál sea la densidad del monte, el espaciamiento, como también la altura promedio del mismo. En verano se han registrado reducciones de 3,8°C en árboles con altura promedio de 6-8 metros y de 2,1°C en árboles menores a 6 metros (Bahamonde et al., s.f.). Valores extremos de temperatura del suelo en estaciones estivales, tienen un efecto negativo de importancia sobre las especies forrajeras invernales debido a que inhiben la fotosíntesis y la síntesis de citoquinina, hormona responsable de la producción de nuevas hojas, macollos y retrasan la senescencia de la hoja. Es decir, los arboles pueden representar una buena alternativa para disminuir temperatura de suelo en meses donde las temperaturas son elevadas y que le sea favorable a este tipo de especies (Wang et al., 2003).

Se aprecia en la Figura No. 19c el comportamiento de la temperatura máxima promedio del suelo, desde el mes de septiembre a febrero. En la misma se registró un descenso de septiembre a octubre y luego experimentó un ascenso en noviembre y diciembre llegando a un máximo en diciembre de 36,4°C en el control y 33,7°C en el sistema silvopastoril; y en enero y febrero en ambos casos esa temperatura vuelve a bajar en una pequeña cantidad. Cabe destacar que en todos los meses esta temperatura siempre fue superior para el caso del control, frente al sistema silvopastoril, entre 2°C y 3°C, a excepción del mes de noviembre, donde la temperatura del control casi llega a ser 4°C superior, siendo de 30,5°C para el control y 26,6°C para el sistema silvopastoril.

Esta temperatura máxima del suelo, la cual es menor en el sistema silvopastoril para todos los meses, se debe a una menor radiación directa que llega a la superficie con respecto a donde no se encuentra la composición arbórea (Sotomayor y Teuber, 2011).

En la Figura No. 19d, se puede ver el comportamiento de la temperatura mínima promedio mensual del suelo. Se aprecia que la misma presenta un aumento desde septiembre partiendo de 10,3°C para el caso del sistema silvopastoril y 10,9°C para el caso del control, se igualan en el mes de

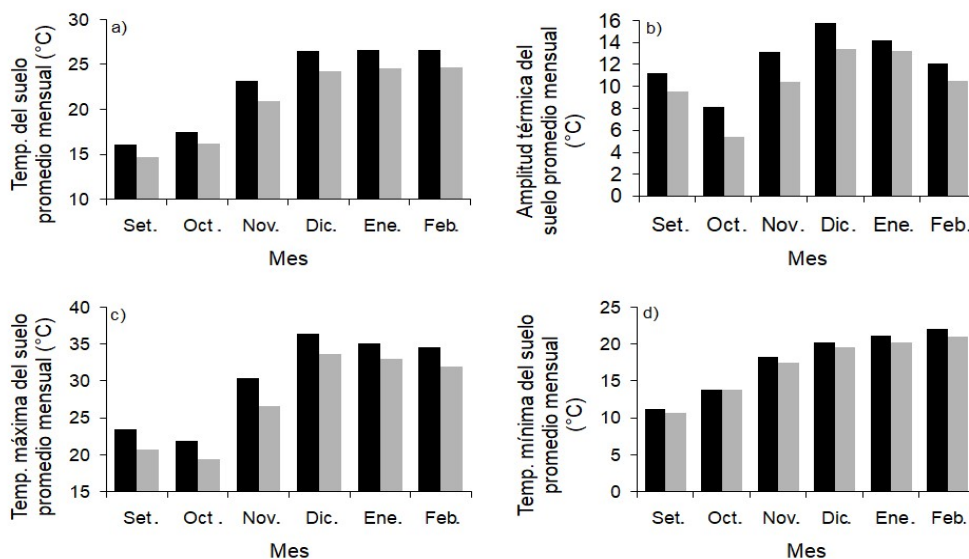
octubre en unos 13,9°C y luego siguen aumentando, hasta alcanzar los 21°C en el mes de febrero para el sistema silvopastoril y los 21,9°C para el control. A excepción del mes de octubre donde las temperaturas mínimas del suelo son iguales, en el resto de los meses en estudio, las temperaturas mínimas del suelo fueron mayores para el control que para el sistema silvopastoril, en aproximadamente 1°C.

Se puede visualizar en la Figura No.19a, para todos los meses en estudio, una mayor temperatura del suelo para el control que para el sistema silvopastoril. A su vez el mismo con una tendencia en alza desde el mes de setiembre hasta diciembre, mes en cual se estabiliza el promedio de la temperatura del suelo y se mantiene, en ambos casos, hasta el mes de febrero. La temperatura del suelo para la cual se estabiliza en los meses de verano es de aproximadamente 26,5° C para el control y de unos 24,5° C para el sistema silvopastoril.

El promedio mensual de la amplitud térmica del aire para cada mes, es mayor en el control que en el sistema silvopastoril en el periodo evaluado (Figura No. 19b). El mes que mostró una mayor amplitud térmica, tanto para el control, como para el sistema silvopastoril fue el mes de diciembre, teniendo una mayor diferencia entre la máxima temperatura y la mínima. Mientras que el mes que presentó una menor amplitud térmica fue también para ambos casos, el mes de octubre, teniendo una menor diferencia entre su temperatura máxima y mínima.

La amplitud térmica promedio para el control fue de 12,63°C, mientras que para el sistema silvopastoril fue de 10,48°C, es decir, el sistema silvopastoril tuvo una menor amplitud térmica promedio en los 6 meses, con un valor de 2,15°C. Esto quiere decir que la diferencia entre la máxima temperatura promedio y la mínima temperatura promedio del suelo, fue menor para el sistema silvopastoril. A su vez se determinó que la máxima diferencia entre amplitudes térmicas se dio en el mes de noviembre, donde hubo una diferencia de 3,15°C, mientras la mínima diferencia de amplitudes térmicas se dio en enero, donde hubo una diferencia de 1,1°C.

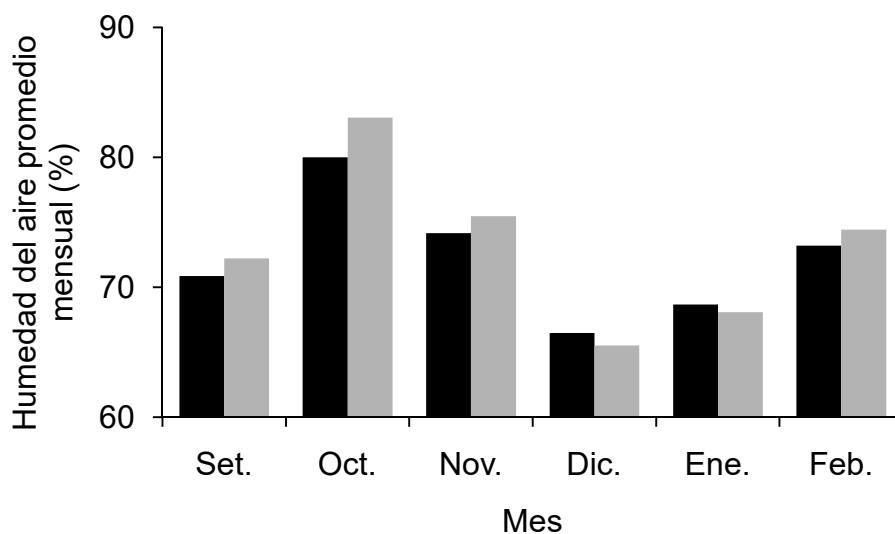
Considerando los estudios mencionados previamente de Bahamonde et al. (s.f.), se determinó una coincidencia con los resultados para la amplitud térmica del suelo, es decir, en ambos estudios la amplitud térmica dentro del sistema silvopastoril, disminuye.



Promedio mensual de la temperatura del suelo (a), de la amplitud térmica del suelo (b), de la temperatura máxima del suelo (c) y de la temperatura mínima del suelo (d). Las barras de color negro representan el control mientras que las barras de color gris representan el sistema silvopastoril.

Figura No. 19. Comportamiento de la temperatura del suelo en el periodo evaluado

4.1.5. Humedad del aire



Las barras de color negro representan el control mientras que las barras de color gris representan el sistema silvopastoril.

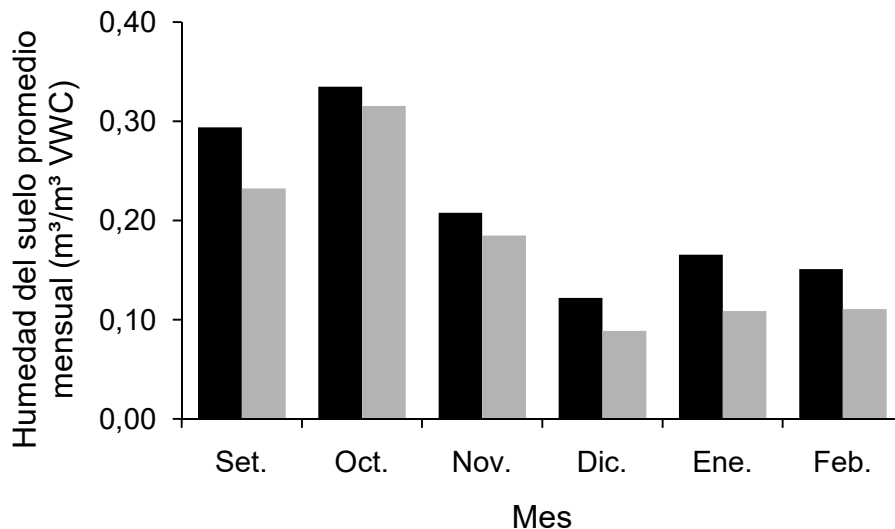
Figura No. 20. Promedio mensual de la humedad del aire en el período evaluado

No se registró grandes diferencias en la humedad del aire promedio entre el control y el sistema silvopastoril, si bien se observó una pequeña tendencia a presentar mayores valores en el sistema silvopastoril. De setiembre a noviembre, y luego en febrero se registraron mayores valores de la misma en el sistema silvopastoril; mientras que para los meses de diciembre y enero la humedad del control se encuentra mínimamente por encima a la del sistema silvopastoril. Para ambos casos la humedad siempre se mantuvo por encima del 60% (Figura No. 20).

Bahamonde et al. (s.f.), afirman que la humedad relativa del aire en general es mayor en áreas con cobertura de bosques, cuanto mayor sea la altura del componente arbóreo, así como su densidad, aumenta la humedad relativa del aire (hasta 6 metros, aumenta 3 % la humedad y 6-8 metros, proporciona un aumento del 20%). En casos de sequía extrema, la presencia del componente arbóreo al reducir la evapotranspiración del follaje por la reducción de temperatura, agregado a la reducción en la velocidad del viento, puede ser beneficiosa para el desarrollo del forraje en el sistema (Peri et al., 2016).

Por ende, los resultados concuerdan con Bahamonde et al. (s.f.) y con Munka (2017), quien menciona que el microclima bajo el dosel forestal es más húmedo que en sitios sin árboles.

4.1.6. Humedad del suelo



Las barras de color negro representan el control mientras que las barras de color gris representan el sistema silvopastoral.

Figura No. 21. Promedio mensual de la humedad del suelo en el período evaluado

La humedad del suelo aumentó de septiembre a octubre y luego presentó un descenso hasta diciembre de manera gradual, se da un leve ascenso en enero y luego en febrero vuelve a descender mínimamente. Se observó que en todos los meses, la humedad del suelo del control siempre se mantuvo por encima de la del sistema silvopastoral.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Munka (2017), que menciona que el menor contenido de humedad en un área con árboles con respecto a un área sin presencia arbórea se debe a que parte de la precipitación es interceptada por los mismos, pudiendo ser evaporada o precipitada desde el dosel al suelo.

Por otra parte, las plantaciones forestales interceptan más agua de la lluvia, reduciendo la cantidad de agua disponible del suelo, pero también tienden a presentar mayor pérdida de agua por evapotranspiración que una pastura bajo pastoreo (Munka, 2010).

Desde el mes de octubre hasta el mes de enero aumentaron los valores de temperatura del aire y radiación, mientras se da un descenso progresivo en

el contenido de humedad del suelo, esto coincide con Allen et al. (2006), quienes mencionan que la temperatura del aire y la radiación directa son los principales parámetros microclimáticos que explican gran parte de la evapotranspiración. De esta forma, dicho aumento en la evapotranspiración es lo que genera un menor contenido de humedad en el suelo.

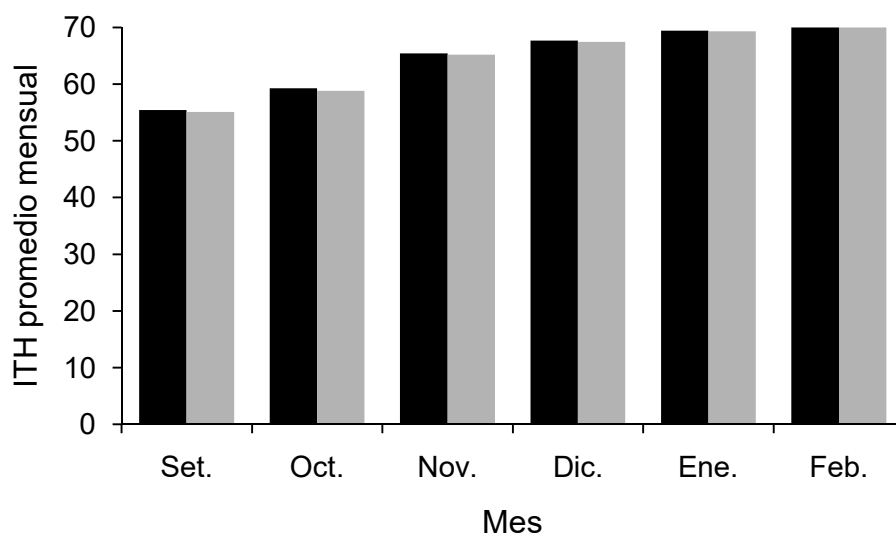
4.2. INDICADORES DE ESTRÉS CALÓRICO ANIMAL

4.2.1. Índice de temperatura y humedad (ITH)

Teniendo en cuenta el gran detalle de las condiciones microclimáticas generadas en la presente tesis, se calculó el ITH promedio con los datos de temperatura y humedad relativa para los meses evaluados. Esta información permitió concluir a qué nivel de estrés térmico estarían sometidos los animales si estuvieran presentes.

Se puede visualizar el promedio de ITH para el periodo en cuestión (Figura No. 22), teniendo valores crecientes desde el comienzo del experimento hacia los meses de verano, donde la temperatura es mayor. Los valores promedios del mes de setiembre fueron de 55 y ascendieron hasta 71 en el mes de febrero.

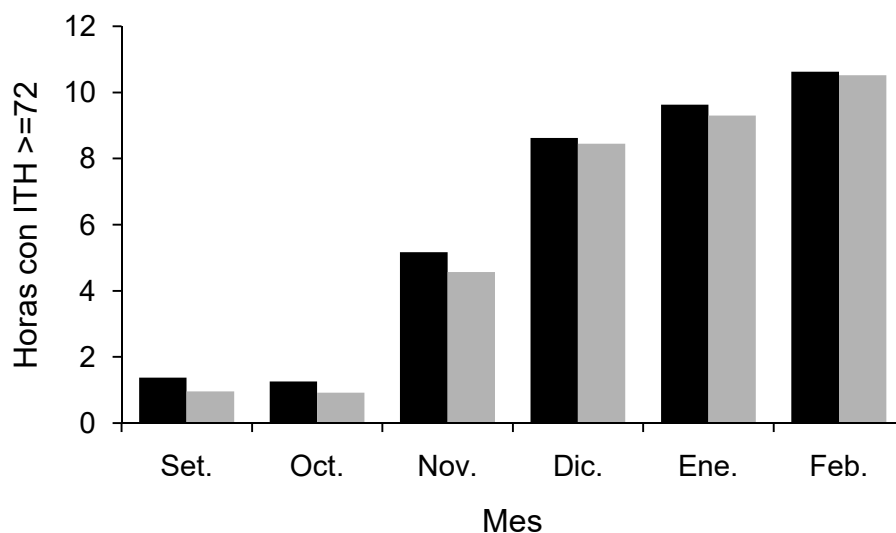
Johnson et al. (1961), han comprobado que el valor crítico de ITH para la producción de leche en vacas Holstein es 72, a partir de este valor comenzaría un estado de estrés térmico moderado (alerta), mientras que valores mayores a 80 representarían un estrés térmico severo para los animales (emergencia). De esta forma, se calculó las horas en las que los valores de ITH fueron superiores a 72 y 80 respectivamente.



Las barras de color negro representan el control mientras que las barras de color gris representan el sistema silvopastoril.

Figura No. 22. Promedio mensual del índice de temperatura y humedad (ITH) en el período evaluado

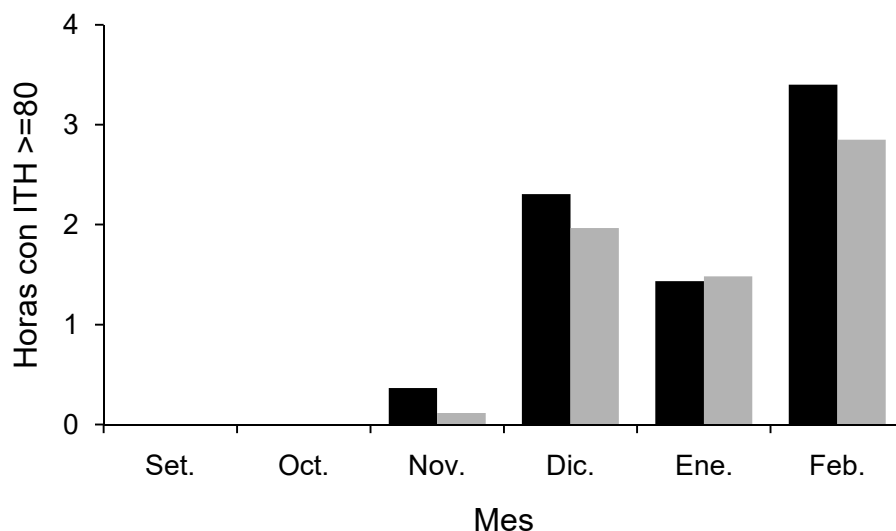
El promedio diario mensual de horas con ITH mayor o igual a 72 aumentó durante el transcurso del experimento (Figura No. 23). Se pasó de tener 1 hora promedio de desconfort térmico moderado en el mes de setiembre a más de 10 horas promedio en el mes de febrero. En todos los casos los valores promedio de horas con ITH mayor o igual a 72 fueron mayores en el control en comparación con el sistema silvopastoril.



Las barras de color negro representan el control mientras que las barras de color gris representan el sistema silvopastoral.

Figura No. 23. Promedio diario mensual de horas en que el índice de temperatura y humedad (ITH) fue mayor a 72

Valores de ITH mayores o iguales a 80 representan un estrés calórico severo para los animales (Johnson et al., 1961). En la Figura No. 24 se visualiza cómo en los meses de setiembre y octubre no hubieron registros de ITH ≥ 80 , mientras que a partir del mes de noviembre comenzó a aumentar de forma creciente el número de horas con registros de ITH ≥ 80 , presentando un leve descenso en el mes de enero. Se observó una reducción de las horas con ITH ≥ 80 en el sistema silvopastoral con respecto al control.



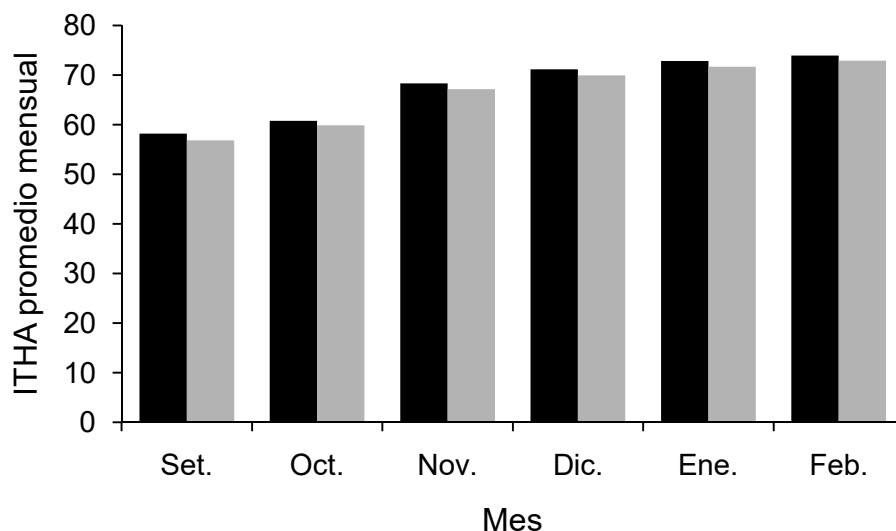
Las barras de color negro representan el control mientras que las barras de color gris representan el sistema silvopastoril.

Figura No. 24. Promedio diario mensual de horas en que el índice de temperatura y humedad (ITH) fue mayor a 80

4.2.2. Índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA)

El ITH toma en cuenta solamente la temperatura y la humedad relativa, por lo que presenta algunas limitantes para caracterizar completamente el ambiente térmico. Renaudeau et al. (2012), mencionan que el ITH impacta en diferente medida en los animales según la radiación solar y la velocidad del viento.

A partir de esta información se calculó el ITHA (Índice de temperatura y humedad ajustado por radiación solar y velocidad del viento). Se observó como el índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA) también aumentó desde el mes de septiembre al mes de febrero (Figura No. 25), esto se debió al aumento de temperatura y radiación solar que se da a medida que se aproxima el verano. A su vez los valores se mantienen siempre mayores en el control que se encuentra a pleno sol en comparación con el sistema silvopastoril.

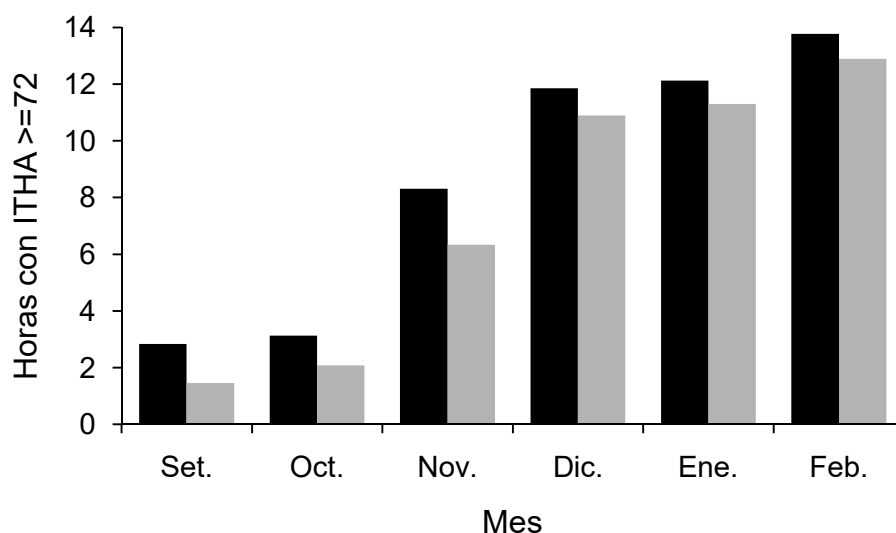


Las barras de color negro representan el control mientras que las barras de color gris representan el sistema silvopastoril.

Figura No. 25. Promedio mensual del índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA) en el período evaluado

Se observó cómo desde el comienzo al final del experimento aumentaron las horas con $ITHA \geq 72$, pasando de aproximadamente 3 horas en los meses de setiembre y octubre a más de 12 horas de promedio diario en los últimos meses (Figura No. 26). En todos los casos los valores del control fueron mayores a los del sistema silvopastoril.

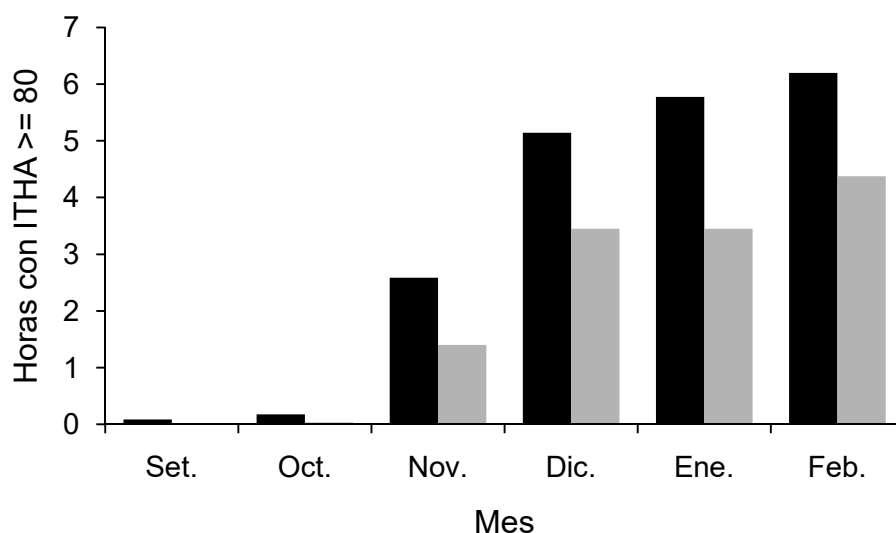
Si se comparan las horas con $ITH \geq 72$ con las horas con $ITHA \geq 72$, se observa cómo para el mismo período hay un mayor número de horas con $ITHA \geq 72$, esto se debe a que al realizar el ajuste correspondiente que tiene en cuenta la velocidad del viento y la radiación solar el número de horas promedio con un estrés térmico moderado aumentó (es probable que lo que haya incidido en el mayor número de horas con $ITHA \geq 72$ sea la radiación solar, al tratarse de meses donde hay un aumento de la misma)



Las barras de color negro representan el control mientras que las barras de color gris representan el sistema silvopastoril.

Figura No. 26. Promedio diario mensual de horas en que el índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA) fue mayor a 72

Valores de ITH ≥ 80 indican un estrés severo para los animales; en la Figura No. 27 se observa cómo las horas con ITHA ≥ 80 aumentan, siendo muy escasas en los primeros meses y pasando tener valores promedio de hasta 6 horas en los meses en que se dan los mayores registros de temperatura y radiación solar. Al igual que con las horas con ITHA ≥ 72 , al considerar la radiación solar y la velocidad del viento las horas con ITHA ≥ 80 son casi doblemente mayores a las horas con ITH ≥ 80 ; en este caso también se observó una marcada diferencia entre el control y el sistema silvopastoril, donde el control nuevamente presentó los mayores valores.



Las barras de color negro representan el control mientras que las barras de color gris representan el sistema silvopastoril

Figura No. 27. Promedio diario mensual de horas en que el índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA) fue mayor a 80

Tal como indican Kendall et al. (2006), el efecto negativo del estrés térmico se puede mitigar mediante la disminución de la radiación solar o de la temperatura del aire que rodea al animal, esto se logra brindándole a los mismos acceso a sombra. Es por esto que los valores de horas con estrés térmico moderado y severo resultaron mayores en el control que se encuentra a sol pleno en comparación con el sistema silvopastoril donde hay acceso a sombra.

Existen innumerables estudios que mencionan que en un sistema silvopastoril los principales aspectos microclimáticos modificados por los árboles son los cambios generados en la radiación solar incidente en el sotobosque (Lewis et al. 1983, Watson et al. 1984, Peri et al. 2007), la humedad del aire y del suelo (Silveira et al., 2006), la temperatura (Anderson 1977, Sotomayor 198, Fedrigo et al. 2017) y la disminución de la velocidad del viento (Solangaarachchi y Harper 1987, Sotomayor y Teuber 2011).

Los resultados muestran un descenso en los valores de radiación obtenidos en el sistema silvopastoril con respecto al control, mientras que los demás parámetros como ser humedad, temperatura y velocidad del viento no presentaron grandes variaciones. De los indicadores de estrés calórico calculados, el ITH no incluye en su cálculo la radiación, mientras que el ITHA si

lo hace. De esta forma, un descenso en la radiación solar incidente en el sistema silvopastoril con respecto al control, redujo el índice de temperatura y humedad ajustado (ITHA) logrando que los animales sufran un menor estrés térmico en comparación a si se encontraran en sol pleno (cómo es el caso del control).

Por lo tanto, la introducción de árboles modifica favorablemente el microclima, lo que podría ser una estrategia para mitigar el estrés térmico en rumiantes.

4.3. PRODUCCIÓN DE BIOMASA DE FORRAJE

Se evaluó la producción de biomasa de forraje del raigrás en kg MS ha^{-1} (Figura No. 28). La presencia de los árboles sobre la pastura redujo la producción de biomasa. Mientras que el control alcanzó los $3706 \text{ kg MS ha}^{-1}$, los tratamientos ubicados en el sotobosque mostraron una reducción de 47%, 25% y 32% para norte, centro y sur respectivamente.

No se detectó diferencias significativas para las diferentes posiciones bajo los árboles, aunque los menores valores de kg MS ha^{-1} en la ubicación Noroeste frente a la ubicación Sureste y centro de los tratamientos coinciden con una menor radiación incidente en la misma.

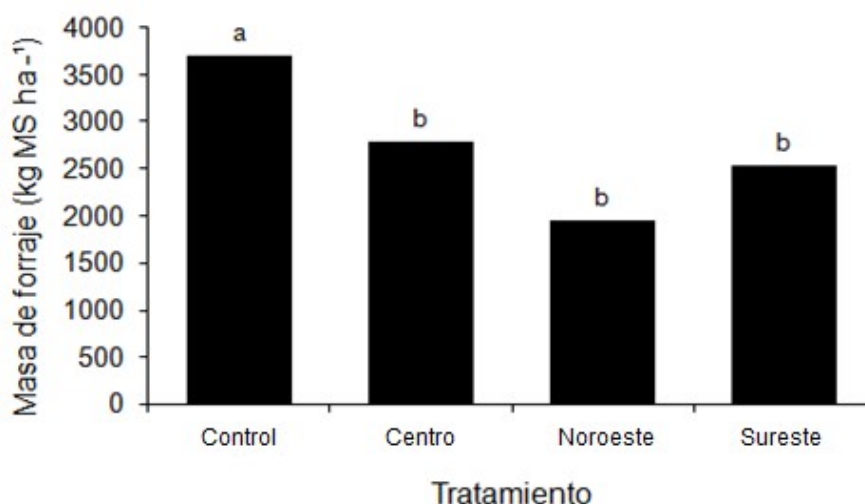


Figura No. 28. Cantidad de masa de forraje de los distintos tratamientos expresado en kg MS ha^{-1} para el mes de noviembre

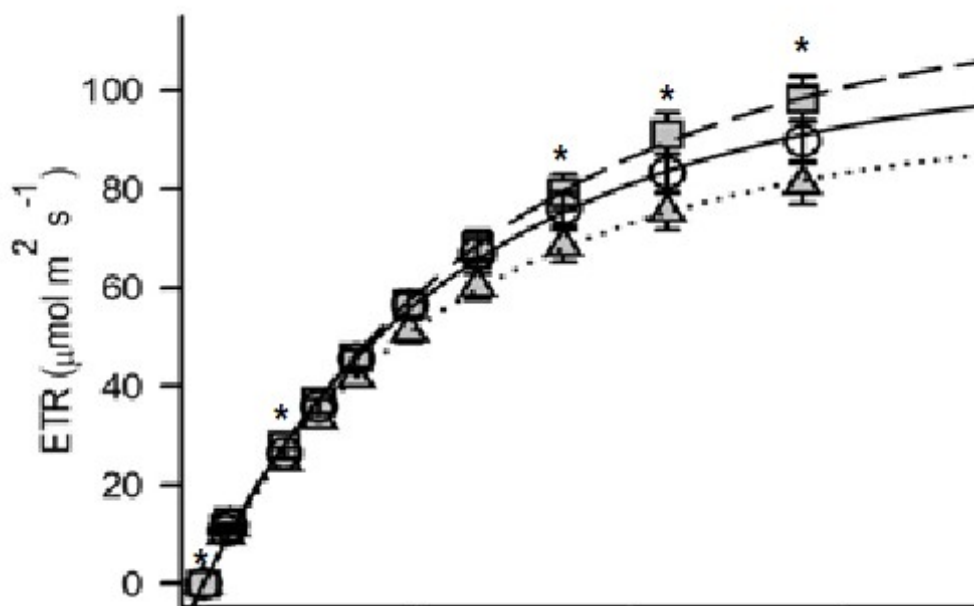
Varela (2012), realizó un estudio bajo un sistema silvopastoril de *Pinus radiata* (200 árboles/hectárea) en el cual constató que el componente herbáceo (*Dactylis glomerata*), disminuyó su actividad fotosintética cuando sus hojas se encontraban bajo sombreado. Exponer plantas de *Dactylis glomerata* a 20 minutos de sombreado ya era suficiente para causar una caída de aproximadamente 50% en la tasa máxima de fotosíntesis de sus hojas en comparación a sin ser sombreado. De esta forma Varela (2012), determinó que el forraje bajo esta restricción de luz determina un menor número de plantas por área determinada, es decir, un menor volumen de materia seca.

Tanto lo previamente mencionado, como otros estudios, han constatado que al aumentar el sombreado, menor es la actividad fotosintética del componente forrajero. Esto coincide con los resultados obtenidos, en los cuales, dentro del sistema silvopastoril, en comparación al control, la cantidad de materia seca de forraje fue menor debido a una menor incidencia de la radiación por efectos del componente arbóreo.

Si bien entre el control y el sistema silvopastoril se obtuvieron diferencias significativas en la producción de forraje, es importante destacar que los árboles del experimento se encontraban en el último año de la rotación, por lo que el sotobosque tenía un nivel máximo de interferencia lumínica. A pesar de estas circunstancias, la producción de forraje dentro del sistema silvopastoril se mantuvo en niveles adecuados para la producción ganadera.

4.4. FLUORESCENCIA DE LA CLOROFILA

La curva de respuesta de la tasa de transferencia relativa de e^- (ETR) a la radiación fotosintéticamente activa (RFA) de la pastura mostró diferencias según la ubicación respecto a los árboles. Si bien a bajos niveles de RFA la ETR fue similar en todas las condiciones, excepto a $53 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a niveles superiores a 1000 μmoles la pastura ubicada al centro del callejón presentó mayores tasas de transporte de electrones que las localizadas al noroeste de éste (Figura No. 29). Esto determinó que la ETR_{max} de la posición central fuera un 24.5 % superior a la ubicada al noroeste y que el nivel de radiación al que se alcanza ésta (I_k) fuera $108 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ más alta (Cuadro No. 4).



Cuadrados representan al centro, triángulos a la posición Noroeste y círculos al control.

Figura No. 29. Relación entre la radiación fotosintéticamente activa (RFA) y la tasa de transferencia de e^- (ETR) para tres posiciones del experimento

Cuadro No. 4. Valores de los parámetros α , ETR max e I_k calculados a partir de los datos proporcionados por el fluorómetro, para el centro, Noroeste y control del experimento

Tratamiento	α	ETRmax ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	I_k
Centro	0,175	115	646
Control	0,182	102	562
Noroeste	0,171	92	538

La tasa de transferencia relativa de e^- (ETR) depende de la radiación incidente, por lo que al aumentar los valores de radiación, los valores de ETR también crecen con incrementos decrecientes.

La ETR puede compararse con la tasa de asimilación de CO₂ o de liberación de O₂. Para tal comparación son relevantes los siguientes aspectos:

- Por cada CO₂ asimilado o O₂ liberado, se deben transportar 4 e⁻.

- La información de fluorescencia se origina principalmente en la parte superior de las capas de cloroplasto, mientras que el intercambio de gases está integrado en todas las capas; Por otro lado, las capas superiores absorben la mayor parte de la luz. Es por esto que éstas son las responsables de la mayor parte del intercambio de gases, a menos que estén fotoinhibidas (Heinz Walz GmbH, 2020).

La menor ETR_{max} (tasa transportadora de electrones) del Noroeste en relación al centro del sistema silvopastoril, se debió a una menor exposición a la luz. Las hojas bajo sombra tienen presencia de cloroplasto únicamente en la capa más externa, mientras que las hojas de luz, presentan en la capa más externa y a su vez en menor cantidad en las demás capas. Entre el control y el centro, se observó diferencia en los valores de radiación incidente, mientras que los valores de ETR_{max} fueron similares entre ellos, esto generó una saturación de los sistemas fotosintéticos en el control.

Al llegar a un umbral de radiación incidente, se provoca una fotoinhibición de los fotosistemas, haciendo que se disipe la energía en forma de calor, gran parte de ésta, estaría relacionada con el ciclo de las xantófilas (Ceacero et al., 2012). Estrada et al. (2014), mencionan que el aumento de la radiación incidente en plantas C₃, causa el cierre estomático, disminuyendo el intercambio gaseoso, generando una disminución de asimilación de CO₂ en la planta, reduciendo la transferencia de electrones en el fotosistema II.

Lo mencionado anteriormente, coincide con los resultados del experimento. La tasa de transferencia de electrones en el control es igual a la de el centro del sistema silvopastoril, por ende se determinó que para el mes en estudio, la elevada radiación incidente generó un cierre estomático, disminuyendo el intercambio gaseoso y asimilación de CO₂, y por lo tanto se redujo la ETR_{max} del control.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de la presente tesis confirman la existencia de variabilidad espacial y temporal de las condiciones microclimáticas en el sotobosque silvopastoril de *Eucalyptus dunnii* relacionado a una situación sin interferencia arbórea, y su relación en la fisiología y producción de forraje en el sotobosque.

Se detectó claramente una disminución de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) en el sistema silvopastoril respecto al control, siendo que el centro del callejón registró valores un poco menor al control, y la posición Noroeste adyacente a los árboles registró los menores valores de RFA. La RFA tuvo variaciones también a lo largo de los meses, presentando el menor valor en octubre y los mayores valores en los meses de enero y febrero. Se observó para las demás variables microclimáticas como ser la humedad y temperatura del aire y suelo un descenso de los valores en el sistema silvopastoril. También en el sistema silvopastoril se observó una reducción de cantidad de horas con ITH e ITHA ≥ 72 y 80.

Una mayor radiación incidente permitió una mayor asimilación de gases en las plantas, lo que generó mayor ETR max en el control frente a hojas de sombra. Luego de determinado umbral de radiación se produjo una fotoinhibición de los fotosistemas, disipando la energía en forma de calor, lo que generó un cierre estomático y por lo tanto un menor intercambio gaseoso.

El porcentaje de sombra obtenido por medio del software ShadeMotion no superó el 44%, por lo que el sistema silvopastoril estudiado no debería presentar grandes limitantes para el crecimiento de especies C3 en el sotobosque. Teniendo en cuenta esto, se observó que si bien se registraron diferencias significativas en la producción de forraje entre el control y el sistema silvopastoril, las mediciones en el sotobosque fueron realizadas en el último año del periodo de rotación, en el cuál el componente arbóreo estaba ejerciendo la máxima interferencia lumínica para el crecimiento de pasturas bajo el dosel. Igualmente, dentro del sistema silvopastoril se generó una cantidad de forraje adecuada para la producción ganadera. Visto esto y teniendo en cuenta los beneficios que brinda la incorporación del componente arbóreo hacia la ganadería, realizando un adecuado diseño de la plantación que permita un buen crecimiento de pasturas y un correcto plan de manejo, la adopción de un sistema silvopastoril es considerada una buena opción debido a la sinergia generada entre los componentes del sistema productivo y una reducción de riesgos económicos al diversificar los rubros.

6. RESUMEN

Los sistemas silvopastoriles consisten en la integración de los rubros forestal y ganadero en una misma unidad de superficie, teniendo como premisa la promoción de sinergias de sus componentes para maximizar las interacciones positivas y atenuar las negativas. El éxito de estos sistemas está determinado por la producción equilibrada entre los componentes forestal, forrajero y animal, siendo fundamental una adecuada planificación y monitoreo de sus interacciones. Dentro de ese contexto, el objetivo de este experimento fue evaluar las variaciones microclimáticas y el desempeño forrajero de la especie *Lolium multiflorum* sembrada en entrefilas de 15 metros de una plantación de *Eucalyptus dunnii*. El mismo se llevó a cabo en el establecimiento “Lomas Bien”, ubicado en el departamento de Florida, entre los meses de octubre del 2019 y febrero del 2020. El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los tratamientos en estudio fueron basados en la posición en relación a los árboles y control: 1. control; 2. sotobosque en la posición Noroeste adyacente a los árboles; 3. sotobosque en la posición central; y 4 sotobosque en la posición Sureste adyacente a los árboles. Se determinó la temperatura y humedad del aire y del suelo, radiación fotosintéticamente activa, precipitación y velocidad y dirección del viento por medio de sensores fijos instalados en las distintas condiciones. Se incluyó la medición de altura del pasto, masa de forraje y fluorescencia de la clorofila en las determinaciones realizadas en el componente forrajero, y éstas fueron realizadas el 6 de noviembre de 2019, el 18 de diciembre de 2019 y el 20 de febrero de 2020. En cuanto al componente arbóreo el 20 de febrero de 2020 se realizó una medición de la altura total, altura de copa verde, proyección de copa y diámetro a la altura de pecho (DAP), que luego se ingresó al software ShadeMotion donde se detectó el porcentaje de sombra. Los mayores valores de RFA fueron registrados en el control, mientras que los menores valores se registraron en el sensor que se encontraba en la posición noroeste adyacente a los árboles. La masa de forraje siguió esta tendencia teniendo mayores valores en el control donde obtuvo mayor radiación y menores valores en la posición Noroeste del sistema silvopastoril, aunque este valor no se diferenció significativamente con los obtenidos en las otras posiciones del sistema silvopastoril. Se detectó que el sistema silvopastoril ayudó a atenuar los cambios de temperatura. La humedad del aire y suelo siguió un comportamiento similar presentando los mayores valores mayoritariamente en el control. Para el ITH y el ITHA se observó un descenso de las horas con ITH e ITHA ≥ 72 y 80 en el sistema silvopastoril con respecto al control, lo que indica que la adopción de un sistema silvopastoril ayuda a reducir el desconfort térmico en los animales. La mayor ETR max ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) del centro del sistema silvopastoril, así como

del control, frente al norte del sistema silvopastoril, se debió a una mayor intercepción de la radiación incidente. A su vez entre el control y el centro del sistema silvopastoril no se observaron diferencias significativas de ETR max, esto se debe a que elevada radiación incidente en el control llevó a un cierre estomático por situación de estrés.

Palabras clave: Microclima; Sistema silvopastoril; *Lolium multiflorum*; *Eucalyptus dunnii*; Radiación.

7. SUMMARY

Silvopastoral systems consist of the integration of forestry and livestock in the same surface unit, taking as a premise the promotion of synergies of their components to maximize positive interactions and mitigate negative ones. The success of these systems is determined by the balanced production between the forest, forage and animal components, being essential an adequate planning and monitoring of their interactions. Within this context, the objective of this experiment was to evaluate the microclimatic variations and forage performance of the *Lolium multiflorum* species sown in 15-meter inter-rows of a *Eucalyptus dunnii* plantation. It was carried out in the “Lomas Bien” establishment, located in the department of Florida, between the months of October 2019 and February 2020. The experimental design used was complete random blocks with three repetitions. The studied treatments were based on the position in relation to the trees and control: 1. Control; 2. Understory in the northwestern position adjacent to the trees; 3. Undergrowth in the central position; and 4 Understory in the southeast position adjacent to the trees. Air and soil temperature and humidity, photosynthetically active radiation, precipitation, and wind speed and direction were determined by means of fixed sensors installed in the different conditions. The determinations made in the forage component included the measurement of grass height, mass of forage and chlorophyll fluorescence and were carried out on November 6th. 2019, December 18th. 2019 and February 20th. 2020. Regarding the arboreal component, on February 20th. 2020, a measurement of the total height, green crown height, crown projection and diameter at chest height (DAP) was made, which were entered into the ShadeMotion software where the percentage was detected. The highest values of RFA were recorded in the control, while the lowest values were recorded in the sensor that was in the northwest position adjacent to the trees. The forage mass followed this trend, having higher values in the control where it obtained higher radiation and lower values in the northwest position of the silvopastoral system, although this value did not differ significantly from those obtained in the other positions of the silvopastoral system. It was detected that the silvopastoral system helped to attenuate the temperature changes, keeping the temperature always lower in the silvopastoral system with respect to the control. The humidity of the air and soil followed a similar behavior, presenting the highest values mainly in the control. For ITH and ITHA, a decrease in hours was observed with ITH and ITHA > = 72 and 80 in the silvopastoral system with respect to the control, which indicates that the adoption of a silvopastoral system helps to reduce thermal discomfort in the animals. The higher ETR max ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) of the center of the silvopastoral system, as well as of the control, compared to the north of the silvopastoral system, was due to a greater interception of the incident radiation.

In turn, between the control and the center of the silvopastoral system, no significant differences were observed in ETR max, this is due to the fact that high incident radiation in the control led to stomatal closure due to stress.

Keywords: Microclimate; Silvopastoral system; *Lolium multiflorum*; *Eucalyptus Durni*; Radiation.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Acevedo, J. L.; Ibarburu, G. 2011. Evaluación del crecimiento de mezclas forrajeras sembradas en montes de *Eucalyptus globulus* ssp *globulus*. (en línea). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 59 p. Consultado 23 mar. 2020. Disponible en <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/1715>
2. Agati, G.; Cerovic, Z. G.; Moya, I. 2000. The effect of decreasing temperature up to chilling values on the in vivo F685/F735 chlorophyll fluorescence ratio in *Phaseolus vulgaris* and *Pisum sativum*: the role of the Photosystem I contribution to the 735 nm fluorescence band. *Photochemistry and Photobiology*. 72:75-84
3. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. 298 p. (FAO. Riego y Drenaje no. 54)
4. Anderson, G. 1977. Productivity of crops and pastures under trees. In: Howes, K. M. W.; Rummery, R. A. eds. *Integrating Agriculture and Forestry*. Perth, CSIRO. Division of Land Resources Management. pp. 58-63.
5. Annunziatto, W.; Petraglia, C.; Tommasino, H. 2016. Los suelos de prioridad forestal y su productividad. *Anuario OPYPA 2016*:527-532.
6. Armstrong, D. V. 1994. Heat stress interaction with shade and cooling. *Journal of Dairy Science*. 77:2044-2050.
7. Baeza, S.; Paruelo, J.; Ayala, W. 2011. Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. (en línea). *Agrociencia (Uruguay)*. 15(2):48-59. Consultado 2 abr. 2020. Disponible en <http://www.scielo.edu.uy/pdf/agro/v15n2/v15n2a06.pdf>
8. Bahamonde, H. A.; Peri, P. L.; Martínez Pastur, G.; Lencinas, M. V. s.f. Variaciones microclimáticas en bosques primarios y bajo uso silvopastoril de *Nothofagus antártica* en dos Clases de Sitio en Patagonia Sur. (en línea). In: Congreso Nacional de Sistemas

Silvopastoriles (1º., 2015, Santa Cruz). Aspectos relacionados al componente forestal arbóreo, forestales. Santa Cruz, INTA. s.p. Consultado 2 abr. 2020. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/scripttmpvariaciones_microclimaticas_en_bosques_primarios.pdf

9. Baret, F.; Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 35:161-173.
10. Barnes, B. V.; Zak, D. R.; Denton, S R.; Spurr, S. H. 1998. *Forest ecology*. 4th. ed. New York, USA, Wiley.774 p.
11. Beer, J.; Lucas, C.; Kapp, G. 1994. Reforestación con sistemas agrosilviculturales permanentes vs. plantaciones puras. *Agroforestería en las Américas*. 1(3):21-25.
12. Boland, D. J.; Brooker, M. I. H.; Chippendale, G. M.; Hall, N.; Hyland, B. P. M.; Johnston, R. D.; Kleinig, D. A.; McDonald M. W.; Turner, J. D. 2006. *Forest Trees of Australia*. Sidney, CSIRO. 736 p.
13. Bonino, L.; da Rosa, E. 2016. Evaluación de la producción de tres mezclas forrajeras bajo un dosel arbóreo de *Pinus taeda*. (en línea). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 103 p. Consultado 2 abr. 2020. Disponible en https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/19651/1/TTS_BoninoFern%c3%a1ndezLeandro_RosaRodr%c3%adguezEmigydiada.pdf
14. Brussa, C. 1994. *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Montevideo, Hemisferio Sur. 328 p.
15. Cabrera, G.; Rachetti, M.; Condon, R.; Olivera, B.; Artigalás, A.; Martínez, J.; Inzaurrealde, S.; Garrone, I.; Sánchez, A.; Bentancor, L.; Bussoni, A.; Munka, C.; Boscana, M.; Álvarez, J.; Fernández, E. 2016. La integración de forestaciones en predios familiares: resultados de un estudio participativo. (en línea). Fray Bentos, s.e. 46 p. Consultado 7 abr. 2020. Disponible en http://www.cnfr.org.uy/uploads/files/Integracin_de_forestaciones_e_n_predios_familiares_Resultados_de_un_estudio_participativo.pdf

16. Campbell, J. 2007. Introduction to remote sensing. 4th.ed. New York, Guilford. 626 p.
17. Carámbula, M. 2002. Pasturas y forrajes: potenciales y alternativas para producir forraje. Montevideo, Hemisferio Sur. t.1, 357 p.
18. _____.; Piñeiro D. 2006. La forestación en Uruguay: cambio demográfico y empleo en tres localidades. *Agrociencia* (Uruguay). 10(2):63 - 73.
19. Carvalho, M. 1998. Arborização de pastagens cultivadas. (en línea). Juiz de Fora, EMBRAPA. 37 p. Consultado 2 abr. 2020. Disponible en <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/89425/1/CNPGL-DOCUMENTOS-64-ARBORIZACAO-DE-PASTAGENS-CULTIVADAS-FL-08648.pdf>
20. _____.; Xavier, D. F. 2005. Sistemas silvipastoris para recuperação e desenvolvimento de pastagens. (en línea). In: Maria de Aquino, A.; Linhares de Assis, R. eds. *Agroecologia, princípios e técnicas para uma Agricultura orgânica sustentável*. Brasília, EMBRAPA Informação Tecnológica. pp. 498-517. Consultado 2 abr. 2020. Disponible en <https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/zootecnia/anac্লাudiarugqieri/6.-sistemas-silvipastoris.pdf>
21. Ceacero, C.; Díaz, J.; Del Campo, A.; Navarro, R. 2012. Evaluación temprana de técnicas de restauración forestal mediante fluorescencia de la clorofila y diagnóstico de vitalidad de brinzales de encina (*Quercus ilex* sub. *ballota*). *Bosque*. 33(2):191-202.
22. Cerezuela, A. L.; Monserrat, L.; Palacios, J. V.; Carrascosa, I.; Galán, F. 2008. Efecto de diferentes tratamientos silvícolas sobre la temperatura del suelo en un pinar de Carrasco. In: Reunión sobre Suelos Forestales (2a., 2008, Valencia, España). *Actas. Nuevas Perspectivas en las Relaciones Suelo-Árbol*. no. 25:261-266.
23. Cabbage, 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.

24. Dupraz, C.; Blitz-Frayret, C.; Lecomte, I.; Molto, Q. 2018. Influencia de la latitud en la disponibilidad de luz para cultivos intercalados en un sistema agroforestal de cultivos en callejones. (en línea). *Agroforestry Systems*. 92:1019-1033. Consultado 7 may. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0214-x>
25. Eilers, P. H. C.; Peeters, J. C. H. 1988. A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton. *Ecological Modelling*. 42:199-215.
26. Estrada, F.; Escobar, A.; Romero, S.; González, J.; Poblete, C.; Caligari, P.; Lobos, G. 2014. Fluorescence phenotyping in blueberry breeding for genotype selection under drought conditions, with or without heat stress. *Scientia Horticulturae*. 181:147-161.
27. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT). 2006. Estrategias y mecanismos financieros para la conservación y el uso sostenible de los bosques. (en línea). Montevideo, Uruguay. 49 p. Consultado 29 mar. 2020. Disponible en <http://www.fao.org/forestry/11623-09df12c118bf235224e78938fea555141.pdf>
28. Fassbender, H. W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2ª. ed. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 489 p.
29. Fedrigo, J.; Santa Cruz, R.; Benitez, V.; Courdin, V.; Ferreira, G.; Posse, J.; Viñoles, C. 2017. Estado actual de la investigación en sistemas silvopastoriles en Uruguay. (en línea). In: Seminario en Sistemas Silvopastoriles (1º., 2017, Melo). Producción integrada para maximizar la rentabilidad. Integración ganadería forestación. Melo, Polo Agroforestal. pp. 3-23. Consultado 23 mar. 2020. Disponible en <http://www.poloagroforestal.edu.uy/wp-content/uploads/2020/02/Revista-I-Integraci%C3%B3n-Ganader%C3%ADa-Forestaci%C3%B3n.pdf>
30. _____.; _____.; _____.; _____.; _____.; Barro, R. S.; Hernandez, J.; Mantero, C.; Olmos, V.; Silveira, E.D. 2018. Oportunidades y desafíos para los sistemas silvopastoriles en Uruguay. (en línea). *Veterinaria*. 54(209):20-30. Consultado 23 mar. 2020. Disponible en <http://www.scielo.edu.uy/pdf/vet/v54n209/1688-4809-vet-54-209-26.pdf>

31. Feldhake, C. M.; Belesky, D. P. 2009. Photosynthetically active radiation use efficiency of *Dactylis glomerata* and *Schedonorus phoenix* along a hardwood tree-induced light gradient. (en línea). Agroforest Systems. 75:189-196. Consultado 13 abr. 2020. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/43275051_Photosynthetically_active_radiation_use_efficiency_of_Dactylis_glomerata_and_Schedonorus_phoenix_along_a_hardwood_tree-induced_light_gradient
32. González, S.; Perales, H.; Álvarez, M. 2008. La fluorescencia de la clorofila como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. (en línea). Educación Bioquímica. 27(4):119-129. Consultado 13 abr. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/490/49011464003.pdf>
33. Heinz Walz GMBH, DE. 2020. PAM-2500. Portable Chlorophyll Fluorometer: handbook of Operation. (en línea). 3rd. ed. Effeltrich, Germany. 146 p. Consultado 20 jul. 2020. Disponible en https://www.walz.com/downloads/manuals/pam-2500/PAM_2500_07-2.pdf
34. ICRAF (International Council of Research in Agroforestry, CR). 1985. El enfoque agroforestal de los sistemas de finca del ICRAF. In: Seminario Avances en la Investigación Agroforestal (1985, Turrialba, Costa Rica). Trabajos presentados. Turrialba, CATIE. pp. 60-95.
35. Johnson, H. D.; Kibler, H. H.; Ragsdale, A. C.; Berry, I. L.; Shanklin, M. D. 1961. Role of heat tolerance and production level in responses of lactating Holsteins to various temperature-humidity conditions. Journal of Dairy Science. 44:1191.
36. Jose, S.; Allen, S.; Nair, P. K. 2008. Tree–Crop Interactions: lessons from Temperate Alley-Cropping Systems. (en línea). In: Batish, D. R.; Kohli, R. K.; Jose, S.; Singh, H. P.; eds. Ecological basis of agroforestry. London, CRC. pp. 15-32. Consultado 21 abr. 2020. Disponible en <https://agroforestryfarm.unl.edu/publications/2008-ecological-basis-of-agroforestry.pdf#page=32>
37. Karl, T.; Jones, P.; Knight, R.; Kukla, G.; Plummer, N. 1993. A New Perspective on Recent Global Warming: Asymmetric Trends of

Daily Maximum and Minimum Temperature. Bulletin of the American Meteorological Society. 74(6):1007-1023.

38. Kendall, P. E.; Nielsen, P. P.; Webster, J. R.; Verkerk, G. A.; Littlejohn, R. P.; Matthews, L. R. 2006. The effects of providing shade to lactating dairy cows in a temperate climate. *Livestock Science*. 103:148-157.
39. Lewis, C. E.; Burton, G. W.; Monson, W. G.; McCormick, W. C. 1983. Integration of pines and pastures for hay and grazing. *Agroforestry Systems*. 2:31-41.
40. Lin, C. H.; McGraw, R. L.; George, M.F.; Garrett, H. E. 2001. Nutritive quality and morphological development under partial shade of some forage species with agroforestry potential. *Agroforestry Systems*. 53:269-281.
41. Mader T. L. 2003. Environmental stress in confined beef cattle. *Journal of Animal Science*. 81:1110-1119
42. Mesa, J.; Rubí, A. 2010. Efecto de tres niveles de sombra y dos edades al corte sobre el rendimiento y la calidad del pasto *Transvala (Digitaria eriantha Steud)* en Zamorano, Honduras. (en línea). Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar al título de Ingenieros Agrónomos en el Grado Académico de Licenciatura, Tegucigalpa, Honduras. Universidad Zamorano. Escuela Agrícola Panamericana. 16 p. Consultado 8 mar. 2021. Disponible en <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/626/1/T3017.pdf>
43. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Estadísticas Agropecuarias, UY). 2020. Anuario estadístico agropecuario 2020. Montevideo. 270 p.
44. _____; RENARE (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales Renovables, UY). 2020. Visualizador: padrón 18615. (en línea). Montevideo s.p. Consultado 23 mar. 2020. Disponible en <http://web.renare.gub.uy/js/visores/coneat>
45. Monteith, J. L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*. 9(3):747-766.

46. _____; Ong, C. K.; Corlett, J. E. 1991. Microclimatic interactions in agroforestry systems. (en línea). *Forest Ecology and Management*. 45:31-44. Consultado 5 jun. 2020. Disponible en [http://oar.icrisat.org/8000/1/Forest%20Ecology%20and%20Management 45 1-4 31-44 1991.pdf](http://oar.icrisat.org/8000/1/Forest%20Ecology%20and%20Management%2045%201-4%2031-44%201991.pdf)
47. Munka, C. 2010. Variación del índice de área foliar y de la evapotranspiración en *Pinus taeda* debido al manejo silvicultural. Tesis de maestría en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 88 p.
48. _____. 2017. Microclima en sistemas silvopastoriles. (en línea) In: Seminario en Sistemas Silvopastoriles (1°. 2016, Melo). Producción integrada para maximizar la rentabilidad. Integración ganadería forestación. Melo, Polo Agroforestal. pp. 63-68.
49. Nair, P. K. R. 1982. Some considerations on soil productivity under agroforestry land use systems. In: International Congress of Soil Science (2nd., 1982, New Delhi). Proceedings. New Delhi, s.e. pp. 16-18.
50. _____. 1993. An Introduction to Agroforestry. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 499 p.
51. Peri, P.; Dube, F.; Varella, A. C. 2016. Silvopastoral Systems in the subtropical and temperate zones of South America: an Overview. (en línea). In: Peri, P.; Dube, F.; Varella, A. eds. Silvopastoral System in Southern South America. New York, Springer. pp. 1-9 (Advances in Agroforestry v. 11). Consultado en dic. 2020. Disponible en https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-24109-8_1
52. _____; Lucas, R.J.; Moot, D.J. 2007. Dry matter production, morphology and nutritive value of *Dactylis glomerata* growing under different light regimes. (en línea). *Agroforestry Systems*. 70:63-79. Consultado 5 abr. 2020. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/225696225_Dry_matter_production_morphology_and_nutritive_value_of_Dactylis_glomerata_growing_under_different_light_regimes

53. Pezo, D.; Ibrahim, M. 1998. Sistemas silvopastoriles. Turrialba, Costa Rica, CATIE/GTZ. 258 p.
54. Polla, M. C. 1998. Estrategias de acción en el tema silvopastoreo. In: Taller de Manejo Silvopastoril (2°, 1998, Young)m. Trabajos presentados. Young, Uruguay, s.e. s.p.
55. Renaudeau, D.; Collin, A.; Yahav, S.; de Basilio, V.; Gourdine, J. L.; Collier, R. J. 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production *Animal*. 6:707-728
56. Riella, A.; Ramírez, J. 2008. Población rural y forestación: estudio de la dinámica poblacional en los territorios forestales del Uruguay. (en línea). *Agrociencia (Uruguay)*. 12(2):85-98. Consultado 23 mar. 2020. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/agrociencia/index.php/directorio/article/view/170/111>
57. Rinker, J. N. 1994. Introduction to spectral remote sensing. (en línea). Alexandria, VA, Army Topographic Engineering Center Fort Belvoir. 40 p. Consultado 12 abr. 2020. Disponible en <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a284268.pdf>
58. Silveira, L.; Alonso J.; Martínez, L. 2006. Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 10:75–94.
59. Solangaarachchi, S.; Harper, J. 1987. The effect of canopy filtered light on the growth of white clover *Trifolium repens*. *Oecologia*. 71:372-376.
60. Sorrentino, A. 1994. Manual teórico-práctico del curso de dasometría. Técnicas e instrumentos de medición forestal. Montevideo, Facultad de Agronomía. v.1. 312 p.
61. Sotomayor, A. 1989. Sistemas silvopastorales y su manejo. *Revista Forestal Chile*. 42:8.
62. _____; Teuber, O. 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 e Investigación Forestal. 17(1):23-40.

63. Soust, P. 2012. A 25 años de la aprobación de la ley No. 15.939 (ley forestal). (en línea). Anuario OPYPA 2012:167-172. Consultado 25 mar. 2020. Disponible en <http://www2.mgap.gub.uy/OpypaPublicaciones/ANUARIOS/Anuario2012/material/pdf/14.pdf>
64. Tamosiunas, M. 2015. La integración productiva de árboles y ganado en predios familiares: la visión del productor. (en línea). Agrociencia (Uruguay). 19(1):150-117. Consultado 29 mar. 2020. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/agrociencia/index.php/directorio/article/view/1029/707>
65. Thom, E. C. 1959. The discomfort index. Weatherwise. 12(2):57-61.
66. Varella, A. C. 2008. Escolha e manejo de plantas forrageiras para sistemas de integração floresta-pecuária no sul do Brasil. In: Seminarios de pecuaria de corte (2008, Brasília). Trabalhos apresentados. Bagé, EMBRAPA Pecuária Sul. pp. 67-83.
67. _____. 2012. Características do ambiente luminoso em sistemas silvipastoris e recomendações para o manejo do componente forrageiro nas condições do sul do Brasil. (en línea). In: Congreso Forestal Estadual Do Rio Grande Do Sul (Nova Prata, 2012). Florestas e a sustentabilidade: anais. Nova Prata, EMBRAPA. s.p. Consultado 7 abr. 2020. Disponible en <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/67036/1/7-ALEXANDRE-COSTA-VARELLA-PAINEL.pdf>
68. Veiga, J. B.; Serrão, E. A. S. 1990. Sistemas silvipastoris e produção animal nos trópicos úmidos: a experiência da Amazônia brasileira. Campinas, SBZ/FEALQ. pp. 37-68.
69. 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. (en línea). Journal of the American Society for Horticultural Science. 128 (5):648-655. Consultado 7 abr. 2020. Disponible en <https://journals.ashs.org/jashs/view/journals/jashs/128/5/article-p648.xml>

70. Watson, V. H.; Pearson, H. A.; Knight, W. E.; Hagedorn, C. 1984. Cool season forages for use in Pine forests. In: Linnartz, N.; Johnson, M. eds. Agroforestry in the Southern United States. Louisiana, Louisiana Agricultural Experiment Station. pp. 79-88
71. West, J. 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. (en línea). Journal of Dairy Science. 86:2131-2144. Consultado 8 mar. 2021. Disponible en <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S002203020373803X?token=2B2BE5B81B4903FAFB141585B0EB6C50399F1705C70E4C0BF7C4B56A02AC81DA4FAD27C0C6483883D25B659635F46E60&originRegion=us-east-1&originCreation=20210608133328>