



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

EVALUACIÓN DE SERVICIOS AMBIENTALES EN UN SISTEMA SILVOPASTORIL

Franco SCHINATO

Magíster en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Vegetales

Agosto 2022

**EVALUACIÓN DE SERVICIOS
AMBIENTALES EN UN SISTEMA
SILVOPASTORIL**

Franco SCHINATO

Magíster en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Vegetales

Agosto 2022

Tesis aprobada por el tribunal integrado por el Ph.D. Miguel Alberto Carriquiry, la Ph.D. Carolina Viñoles Gil, y la M.Sc. María Carolina Munka Moreno el 16 de agosto de 2022.
Autor: Franco Schinato. Directora Dra. Adriana Teresa Bussoni Guitart, co-directora Ph.D. Virginia Morales Olmos.

AGRADECIMIENTOS

En especial:

A la Universidad de la República y a la Facultad de Agronomía, por la posibilidad de realizar esta etapa de mi formación.

A mis directoras de tesis, Adriana Teresa Bussoni Guitart y Virginia Morales Olmos, les agradezco profundamente por guiarme y orientarme con dedicación en cada etapa del desarrollo de esta tesis.

A la Comisión Académica de Posgrado, por la beca recibida durante mi maestría, y a la Unidad de Posgrados y Educación Permanente por la gestión de los procesos administrativos y revisión de este documento de tesis.

Al Departamento Forestal, por el apoyo brindado sin el cual no hubiera sido posible la realización de gran parte de las actividades.

A mis compañeros de departamento, que me motivaron y me auxiliaron con conocimientos, reflexiones y orientaciones en diferentes etapas del estudio.

A mi familia, y en especial a mi madre, Rosani, le agradezco por el incondicional esfuerzo y apoyo durante toda mi vida, a mi hermana Flávia, por el amor y cariño, y a mi compañera de vida, Caroline, por estar a mi lado y apoyarme en todas las etapas de esta caminata.

Al establecimiento agropecuario *Santa Magdalena*, por permitir el desarrollo de las actividades y a sus colaboradores por la ayuda y auxilio operativo.

A todos los demás docentes, otros profesionales y amigos, que de una manera u otra estuvieron involucrados en este proceso, mis sinceros agradecimientos.

¡Muchas gracias!

TABLA DE CONTENIDO

	página
<u>PÁGINA DE APROBACIÓN</u>	I
<u>AGRADECIMIENTOS</u>	II
<u>TABLA DE CONTENIDO</u>	III
<u>LISTA DE ABREVIATURAS</u>	V
<u>RESUMEN</u>	VIII
<u>SUMMARY</u>	IX
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. SISTEMAS SILVOPASTORILES	3
1.2. MICROCLIMA Y BIOMETEOROLOGÍA ANIMAL	5
1.2.1. <u>Temperatura del aire</u>	5
1.2.2. <u>Radiación solar</u>	6
1.2.3. <u>Humedad del aire</u>	7
1.2.4. <u>Vientos</u>	8
1.2.5. <u>Biometeorología animal e indicadores térmicos</u>	9
1.3. SECUESTRO Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO	12
1.4. PREFERENCIAS POR SERVICIOS AMBIENTALES	13
2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	16
2.1. EVALUACIÓN BIOFÍSICA	16
2.1.1. <u>Caracterización del área de estudio</u>	16
2.1.2. <u>Microclima y producción de forraje</u>	19
2.1.2.1. <u>Colecta de datos</u>	19

2.1.2.2. <u>Diseño experimental y análisis estadístico</u>	22
2.1.3. <u>Almacenamiento de carbono</u>	25
2.2. <u>PREFERENCIAS AMBIENTALES-PRODUCTIVAS</u>	28
2.2.1. <u>Experimento de elección discreta</u>	29
2.2.2. <u>Valoración contingente</u>	31
2.2.3. <u>Análisis estadístico</u>	31
3. <u>RESULTADOS</u>	34
3.1. <u>EVALUACIONES BIOFÍSICAS</u>	34
3.1.1. <u>Microclima y biometeorología animal</u>	34
3.1.1.1. <u>Olas de calor</u>	36
3.1.1.2. <u>Radiación fotosintéticamente activa</u>	42
3.1.2. <u>Producción forrajera</u>	49
3.1.3. <u>Almacenamiento de carbono</u>	51
3.2. <u>PREFERENCIAS AMBIENTALES-PRODUCTIVAS</u>	54
3.2.1. <u>Compensaciones entre SA</u>	56
3.2.2. <u>Disposición a adoptar SSP</u>	58
4. <u>DISCUSIÓN</u>	61
5. <u>CONCLUSIONES</u>	79
6. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	81
<u>ANEXOS</u>	102
ANEXO 1. <u>CARACTERÍSTICAS DEL SUELO</u>	102
ANEXO 2. <u>PRODUCCIÓN DE FORRAJE</u>	103
ANEXO 3. <u>ENCUESTA SOBRE SSP</u>	104

LISTA DE ABREVIATURAS

AB: área basal;

ACF: Función de Autocorrelación;

AIC: Criterio de Información de Akaike;

BF: biomasa fustal;

BM: bajo monte;

C_a: carbono arbóreo;

CC: concentración de carbono;

CDN: Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional;

C_f: carbono forrajero;

CJ: callejón;

CN: campo natural;

CO: carbono orgánico;

CO₂: dióxido de carbono;

CO_{2e}: dióxido de carbono equivalente;

C_s: carbono en el suelo;

DAP: densidad aparente del suelo;

DM: densidad básica de la madera;

DPV: déficit de presión de vapor;

ED: elección discreta;

EP: estados de preferencia;

GC: ganadería de cría.

GCC: ganadería de ciclo completo;

GEI: gases de efecto invernadero;

GI: ganadería de invernada;

GRC: ganadería de recría;

HR: humedad relativa del aire;

ICC: Índice de Carga Calórica;

ICI: Índice de Clima Integral;

IPA: ingreso proveniente de fuente agropecuaria;

ITGH: Índice de Temperatura del Globo Negro y Humedad;

ITH: Índice de Temperatura y Humedad;

MLG: modelo lineal generalizado;

MLGM: modelos lineales generalizados mixtos;

MS: materia seca;

MUA: modelos de utilidad aleatoria;

NI: nivel de instrucción;

PNCC: Política Nacional de Cambios Climáticos;

PPB: productividad primaria bruta;

PPN: productividad primaria neta;

PS: pleno sol;

RFA: radiación fotosintéticamente activa;

RFI: recurso forrajero implantado;

RS: radiación solar global;

SA: servicios ambientales;
SSP: sistemas silvopastoriles;
TA: temperatura del aire;
TGN: temperatura del globo negro;
TGNM: temperatura del negro diaria máxima;
TPR: temperatura del punto de rocío;
U: utilidad;
UG: unidades ganaderas;
V: velocidad del viento;
VC: valoración contingente;
VM: velocidad del viento diaria máxima;
Vol: volumen.

RESUMEN

Los sistemas silvopastoriles (SSP) generan simultáneamente productos y servicios ambientales (SA) mediante la integración entre rumiantes, pasturas y árboles. Con el objetivo de evaluar la generación de SA en SSP, este estudio se desarrolló en dos etapas: una biofísica, para obtener indicadores de los SA, y otra basada en encuestas a productores ganaderos locales, para la evaluación de sus preferencias ambientales-productivas. En la primera etapa se evaluó el microclima, la producción forrajera y el almacenamiento de carbono en un SSP y en la condición de campo natural a pleno sol (PS). El SSP fue implantado en 2012, en hileras triples de *Eucalyptus grandis* y callejones de 18 metros, y las evaluaciones fueron realizadas entre junio de 2019 y junio de 2021 en un área silvopastoril con densidad de 425 árboles ha⁻¹. En la segunda etapa, se realizaron 27 encuestas, conteniendo experimentos de elección discreta (ED) y de valoración contingente (VC) para evaluar las preferencias de los productores por los SA y su disposición a incorporar SSP mediante incentivos económicos. Los resultados indicaron mayor confort térmico animal en el SSP, reduciendo los indicadores térmicos durante las olas de calor. La biomasa forrajera anual en el SSP se redujo 20 % con respecto a PS, mientras que el stock de carbono aumentó en 18 Mg ha⁻¹ (18 %). En el experimento de ED, los productores asignaron niveles significativos de utilidad a los SA de regulación térmica y de productividad ganadera. Asimismo, se verificó una disponibilidad a reducir hasta un 20 % de la carga ganadera en los SSP para la obtención de mayor confort animal. En la VC, el 70 % de los encuestados indicó estar dispuesto a participar de un programa de incorporación de SSP. Entre estos, el 42 % ya poseían SSP y el 32 % incorporarían áreas de silvopastoreo aun sin los incentivos. Estos productores indicaron la preferencia de destinar una proporción reducida de los predios, priorizando el uso de áreas de baja productividad ganadera. Los resultados indicaron que los SSP son una modalidad de producción multifuncional que permite atender a demandas ambientales y productivas específicas del sector agropecuario.

Palabras clave: regulación térmica, elección discreta, sistemas agroforestales

Environmental services assessment in a silvopastoral system

SUMMARY

Silvopastoral systems (SPS) allow simultaneous generation of products and environmental services (ES) through the integration of ruminants, pastures and trees. This study aimed the evaluation of ES in SPS and it was developed in two stages: a biophysical one to obtain indicators of ES and a subsequent one based on surveys to local livestock farmers to evaluate their environmental-productive preferences. In the first stage, microclimate, forage production and carbon storage assessments were conducted in a SPS and in the grazed native grassland at full sun (FS) condition. The evaluated SPS was implanted in 2012, in triple rows of *Eucalyptus grandis* and alleys of 18 m, and the evaluations were carried out between June 2019 and June 2021 in a silvopastoral area of 425 trees ha⁻¹. In the second stage, 27 surveys were conducted containing discrete choice (DC) and contingent valuation (CV) experiments to evaluate farmers' preferences among ES and their willingness to incorporate SPS through economic incentives. The results indicated greater animal thermal comfort in the SPS, reducing thermal indicators during heat waves. In the SPS, the annual forage biomass production was reduced approximately 20 %, respect to FS condition, while the total carbon stock estimation was increased in 18 Mg ha⁻¹ (18 %). In the DC experiment, farmers assigned greater utility to ES of animal thermal comfort and livestock productivity, indicating a willingness to reduce up to 20 % of the stocking rate in the SPS in order to obtain greater animal thermal comfort. In the CV experiment, 70 % of surveyed farmers were willing to participate in a program to incorporate silvopastoral production. Among these farmers, 42 % already counted with SPS areas and 32 % would incorporate SPS even without incentives. These farmers indicated the preference to use reduced fractions from their properties, prioritizing areas of lower livestock productivity. The results indicated the SPS as a multifunctional production modality that allows the accomplishment of specific environmental and productive demands from agricultural sector.

Key words: thermal regulation, discrete choice, agroforestry systems

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas silvopastoriles (SSP) se caracterizan por integrar los componentes animal, forrajero y forestal en unidades productivas con el objetivo de promover interacciones positivas entre estos componentes. Las posibilidades de combinación entre las especies, arreglos y manejos permiten la adecuación de estos sistemas a las variaciones ambientales de los sitios y a las condiciones socioculturales del medio social agrario. La multifuncionalidad de los SSP se relaciona con la búsqueda por la diversificación productiva, el uso de los recursos vegetales locales y la promoción de servicios ambientales (SA).

A nivel nacional, los SSP orientados a la producción integrada y equilibrada entre sus componentes ocupan más de 6 mil hectáreas (Sancho et al., 2021). Esta forma de uso y cobertura del suelo ha sido propuesta como una de las estrategias en la gestión de los agroecosistemas del país en el marco de la Política Nacional de Cambio Climático (PNCC). Atendiendo la aprobación nacional del Acuerdo de París, Uruguay publicó la primera Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN), mediante el Decreto N.º 310/017, establecida también como instrumento de aplicación de la PNCC. En la CDN, entre los objetivos propuestos para el sector de «Uso de la Tierra, Cambio de la Tierra y Silvicultura», se verifica el uso de los SSP como forma de contribución a la generación de los SA de sombra y abrigo a los animales y secuestro de carbono.

Debido a los impactos sobre el bienestar y productividad animal, la regulación térmica de las condiciones extremas en la producción ganadera ha sido considerada importante en diferentes regiones climáticas, incluyendo las zonas de clima templado (Van laer et al., 2015, Carabaño et al., 2016, Veissier et al., 2018). El estrés calórico sufrido por los rumiantes genera modificaciones en el metabolismo, con aumento en el costo energético de mantenimiento animal, reducciones de los niveles de fertilidad e impactos sobre la sanidad animal (Daramola et al., 2012, Chen et al., 2015). Por su relevancia en los sistemas de producción ganaderos, la regulación térmica ha sido un tema considerado de alta relevancia entre los productores del sector (Lescourret et al., 2015, Hartel et al., 2017).

En cuanto a las evaluaciones ambientales, estas posibilitan el conocimiento, la determinación y la descripción de los procesos ecológicos y de sus resultados; sin embargo, su vinculación con el componente social permite entender, entre otros aspectos, cómo los valores socio-culturales poseen la capacidad de influenciar en la generación de SA (Bennett et al., 2009, Martín-López et al., 2012). Es en este contexto que se dan las principales motivaciones para realizar esta tesis de maestría. Las hipótesis evaluadas fueron:

- (i) los SSP regulan la condición térmica, reduciendo los umbrales de discomfort térmico de los indicadores de biometeorología animal con respecto a la condición de pleno sol (PS), en campo natural (CN);
- (ii) los SSP aumentan los niveles de carbono almacenados con respecto al PS;
- (iii) los productores ganaderos, y ganaderos-forestales establecen preferencias entre los SA,
- (iv) los productores presentan disposición a incorporar SSP.

Centrada en las dimensiones ambientales y productivas de la producción silvopastoril, el objetivo de esta investigación es evaluar la generación de SA en SSP. Los objetivos específicos de este estudio son:

- (i) evaluar el efecto de la incorporación de un SSP sobre variables de microclima e indicadores de biometeorología animal;
- (ii) estimar los niveles de carbono almacenados en el SSP;
- (iii) establecer relaciones de compensación entre los SA,
- (iv) evaluar la disposición de productores ganaderos a incorporar o expandir áreas con SSP.

El estudio fue desarrollado en dos etapas: la primera, orientada a realizar evaluaciones biofísicas en el SSP objeto de estudio, como forma de obtener referencias e indicadores en las condiciones locales sobre la generación de SA. La segunda, dedicada a la

realización de encuestas de valoración ambiental destinadas a productores ganaderos, en las que se emplearon los indicadores obtenidos en la primera etapa.

Los resultados obtenidos en esta investigación representan las condiciones biofísicas existentes en un SSP utilizado como estudio de caso y la perspectiva de los productores encuestados. Este estudio aporta referencias biofísicas sobre los niveles de confort térmico animal y de almacenamiento de carbono en condiciones de CN y en un SSP, así como presenta las preferencias de los encuestados por los SA en estudio. Con esto, se espera aportar a la comprensión de los efectos resultantes del uso de SSP a nivel local, destacando su rol multifuncional y la posibilidad de obtener resultados ambientales y productivos identificados *a priori* con base en su relevancia para los productores.

En la secuencia de este capítulo se presentan los antecedentes bibliográficos utilizados para la elaboración de este estudio, así como el marco conceptual sobre los SSP (1.1), regulación del microclima (1.2), almacenamiento de carbono (1.3) y sobre los análisis de las preferencias por SA (1.4).

1.1. Sistemas silvopastoriles

El desarrollo de la producción silvopastoril ocurre con la combinación de rumiantes, árboles y especies forrajeras en unidades de manejo, buscando la promoción de interacciones positivas entre estos componentes (Cubbage et al., 2012, Peri et al., 2016, Jose et al., 2017). El silvopastoreo es también una práctica tradicional para un uso eficiente del espacio, del tiempo y de los recursos naturales, siendo una de las categorías más comunes de los sistemas agroforestales (Jose y Bardhan, 2012, Dagar y Tewari, 2017, Gold y Garret, 2022, Pent et al., 2022). Los SSP pueden ser establecidos a partir de áreas con diseño y planificación previa o partiendo de ecosistemas locales manejados (Moreno et al., 2017, Jose et al., 2017, Torralba et al., 2018, Jose et al., 2022). El uso de dichos sistemas permite la expansión de la productividad primaria en suelos de baja a media productividad natural y mantener o incrementar el funcionamiento ecológico, en

comparación con usos del suelo intensivos y homogéneos (Somarriba et al., 2012, Broom et al., 2013, Barton et al., 2016, Peri et al., 2016, Jose et al., 2017).

En América Latina, los SSP representaron históricamente una forma de producción con diferentes estructuras, arreglos y fisonomías, siendo adaptados a las condiciones socio-ambientales locales (Peri et al., 2016). En Uruguay, esto se verificó con el desarrollo histórico de la ganadería tanto en parches de pastizales arbolados como en los ecosistemas de bosque-parque (figura 1a) en la zona suroeste del país y en zonas del este con ecótono entre el bosque serrano y los pastizales (figura 1b).

Desde fines del siglo XIX, y especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XX, el componente forestal fue incluido en los establecimientos ganaderos en forma de bloques pequeños (islas) o como cortinas rompeviento, con predominio de especies de los géneros *Eucalyptus*, *Pinus*, *Populus*, y *Casuarina* (figura 1c). La incorporación de árboles tenía el objetivo de generar sombra y abrigo para los animales y, secundariamente, la obtención de productos forestales para uso en los propios establecimientos (Balmelli y Resquin, 2005, Cabbage et al., 2012).

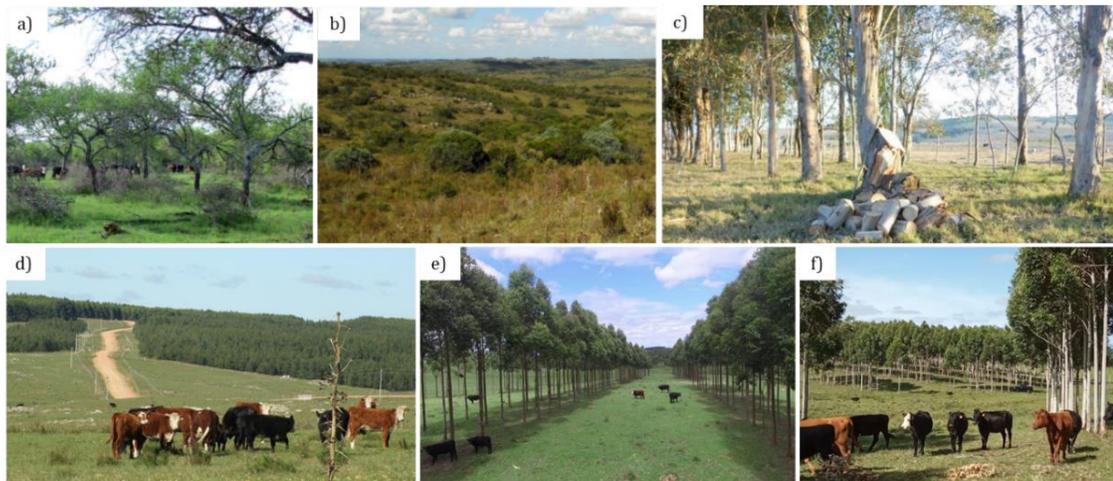


Figura 1. Sistemas silvopastoriles en Uruguay.

Fuentes: a) y b) MGAP (2018) c) Cabrera et al., (2016); d) y e) Adriana Bussoni; f) el autor.

Más recientemente, los SSP en Uruguay pasaron a ser implantados incorporando árboles en arreglos espaciales que permiten la entrada de luz en el sistema, limitando el área de

competencia por agua y nutrientes de árboles y pasturas. Estos diseños buscan mantener los niveles de productividad forrajera y cargas de pastoreo, con productividad forestal en niveles intermedios (figura 1e y f). La última de las categorías de SSP mencionada resulta de las adaptaciones de los sistemas de producción agropecuaria modernos, migrando de aquellos dedicados exclusivamente a la producción animal, agrícola, o forestal hacia el consorcio entre los componentes (Cubbage et al., 2012, Peri et al., 2016). En Uruguay, la superficie estimada para esta modalidad de SSP corresponde a un área de aproximadamente 6 mil hectáreas (Sancho et al., 2021).

1.2. Microclima y biometeorología animal

El término microclima se refiere a las condiciones presentes en la capa superficial de la atmósfera en ambientes con escalas espaciales reducidas, generalmente inferiores a 1 km², y periodicidad de toma de datos inferior a un día (Monteith y Unsworth, 2013, Foken, 2017, Ahmad et al., 2017). En evaluaciones de microclima en agroecosistemas, los principales descriptores ambientales utilizados son la temperatura y humedad relativa del aire, la radiación solar, la incidencia de vientos, la ocurrencia de precipitaciones, la presión atmosférica, la temperatura del punto de rocío, la evapotranspiración, la difusión de vapor de agua en el aire y el déficit de presión de vapor de agua (Brown-Brandl et al., 2005, Arias et al., 2008, DeShazer et al., 2009, Silva y Maia, 2013).

1.2.1. Temperatura del aire

Este es el descriptor primario para caracterizar la condición térmica de un ambiente, siendo el factor preponderante, en el sentido del flujo de energía térmica entre un cuerpo y el medio atmosférico (Ahmad et al., 2017). Es también la variable del medio atmosférico de mayor influencia en gran parte de los procesos biológicos (Foken, 2017, Dusenge et al., 2019).

Las plantas responden de forma diferenciada a las condiciones térmicas, presentando variaciones en sus comportamientos fisiológicos, genéticos y morfológicos. En los pastizales nativos del Uruguay, la temperatura del aire es uno de los principales factores

modeladores de riqueza y abundancia de gramíneas C₄, especialmente durante el período primavera-verano (Ehleringer, 2005, Gibson, 2009, Lezama et al., 2019). Considerando las especies del género *Eucalyptus*, el cual es el más utilizado en los SSP en Uruguay (Sancho et al., 2021), el efecto de la temperatura sobre la tasa fotosintética indica que especies con distribución natural en zonas cálidas poseen puntos térmicos óptimos para la fotosíntesis más altos que especies de zonas de clima frío. Por otro lado, especies con menor rango de distribución natural poseen un ajuste fotosintético más estacional, con mayores eficiencias en condiciones de temperatura más específica (Warren, 2008, Lin, 2012, Aspinwall et al., 2016, Domingues-Junior et al., 2019).

En cuanto a los animales rumiantes, como el ganado vacuno y los ovinos, la temperatura del aire posee alta influencia en su metabolismo y fisiología. Entre las respuestas en los animales, la literatura indica relaciones lineales positivas entre el aumento de la temperatura del aire y el aumento en la frecuencia respiratoria y cardíaca, así como en la temperatura corporal y la sudoración (Brown-Brandl et al., 2005, DeShazer et al., 2009, Taborda et al., 2018, Yan et al., 2021). En este sentido, animales *Bos taurus* pasan a aumentar la frecuencia respiratoria a partir de los 21 °C, con un comienzo de reducción en la ingesta de materia seca (MS) a partir de los 25 °C (DeShazer et al., 2009, Brown-Brandl, 2018). Estos umbrales pueden variar de acuerdo con la condición corporal de los animales, la disponibilidad de acceso a sombra y agua y la velocidad del viento, entre otros.

1.2.2. Radiación solar

Es la transmisión de calor por fotones de energía electromagnética compuesta por distintas longitudes de onda. La densidad del flujo de energía radiante por unidad de superficie es generalmente expresada en watt por metro cuadrado ($W m^{-2}$) (Foken, 2017). La emisión de la radiación solar puede ser asumida con una constante de $1.372 kW m^{-2}$ (Silva y Maia, 2013, Ahmad et al., 2017); sin embargo, la intensidad con la que incide sobre un punto terrestre varía de acuerdo con la latitud, la época del año, la altitud y la hora del día. En la latitud 34° S, correspondiendo al departamento de Florida, lugar donde se realizó el

trabajo de campo de esta tesis, los valores diarios máximos alcanzan a los 1.200 W m^{-2} durante el verano y 650 W m^{-2} en invierno (Silva y Maia, 2013).

En los SSP, la distribución de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) es un aspecto central para entender el comportamiento y la productividad del sistema. La incidencia de la radiación sobre una superficie es proporcional al coseno del ángulo formado entre el zenit y la normal (ángulo cenital), conforme describe la ley de Lambert¹. La variación horaria de la radiación sobre un punto de la cubierta terrestre puede ser descripta con base en el ángulo solar formado a partir de la línea del horizonte (Monteith y Unsworth, 2013, Silva y Maia, 2013, Foken, 2017). En cuanto a sus aspectos cualitativos, la radiación solar está compuesta por un espectro electromagnético con longitudes de onda variando desde, aproximadamente, 0,2 hasta 3,0 nm (onda corta). El rango de la radiación correspondiente a luz visible (0,400-0,780 nm) se conoce como RFA por ser aquella porción absorbida por las plantas en el proceso de fotosíntesis (Rannik et al., 2013, Monson y Baldocchi, 2014).

1.2.3. Humedad del aire

Representa la relación entre la presión de vapor de agua parcial en el aire y la presión de vapor de agua en condición de saturación, ambas a una misma temperatura (Silva y Maia, 2013, Ahmad et al., 2017). La saturación del aire por vapor de agua se da en una condición de equilibrio entre las moléculas de agua que pasan del estado líquido a vapor (evaporación) y las que pasan de vapor de agua a la condición líquida (condensación). A medida que la temperatura del aire aumenta, las moléculas del aire se expanden y aumenta la capacidad de soporte del agua. Con la disminución de la temperatura esta relación se invierte, el aire pierde capacidad de cargarse y las moléculas de agua tienden a condensarse (Silva y Maia, 2013, Ahmad et al., 2017).

¹ $I = I_0 \cos\theta$; $I = I_0 \sin\beta$. Donde: I = radiación incidente sobre una superficie horizontal (W m^{-2}); I_0 = radiación incidente sobre una superficie perpendicular a la fuente de radiación (W m^{-2}); $\cos\theta$ = coseno del ángulo de incidencia solar para una determinada hora (ángulo cenital); $\sin\beta$ = seno del ángulo de elevación solar para una determinada hora.

Relacionado a la temperatura y a la humedad del aire, el déficit de presión de vapor de agua (DPV) es de especial interés agronómico e indica la diferencia entre la presión de vapor de agua parcial y la presión de vapor de agua en saturación. Esta variable posee alta relación con algunas actividades fisiológicas y niveles de productividad vegetal (figura 2), como la conductancia estomática, el potencial hídrico en hojas, los niveles de absorción de CO_2 , la tasa de fotosíntesis neta y la productividad primaria bruta (PPB).

El aumento del DPV está directamente relacionado al incremento en los valores de radiación, lo que se da, generalmente, en días altamente soleados, induciendo al cierre estomático y a la reducción exponencial de la PPB y de la fotosíntesis por unidad de luz absorbida (figura 2a). En el caso de la figura 2b, se puede observar una reducción lineal en el potencial hídrico con el aumento del DPV, indicando una menor capacidad de transporte interno de foto asimilados. En la figura 2c, entre especies de *Eucalyptus* de distintos orígenes (zonas húmedas y subhúmedas) se observa un comportamiento predominante de reducción exponencial del potencial de conductancia estomática con el aumento del DPV.

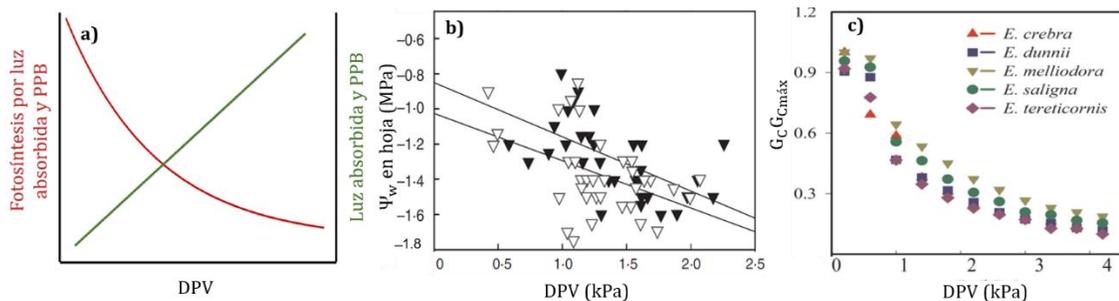


Figura 2. Relaciones entre DPV y variables fisiológicas en plantaciones forestales del género *Eucalyptus*. a) relación del DPV con la eficiencia fotosintética y en la productividad primaria bruta (PPB, en rojo), y con la luz absorbida y la PPB (verde); b) relación del DPV y el potencial hídrico (Ψ_w) en hoja; c) relación del DPV y de la proporción de conductancia estomática del dosel arbóreo.

Fuente: a) Lim et al. (2020); b) Hernandez et al. (2016); c) Bourne et al. (2015).

1.2.4. Vientos

El viento resulta de las diferencias de presión atmosféricas generadas por la energía solar (Silva y Maia, 2013; Ahmad et al., 2017). Como variable medida, el viento posee dos

dimensiones básicas: la velocidad, generalmente expresada en (m s^{-1}) y la dirección, en grados ($^{\circ}$) partiendo del norte geográfico.

En zonas de clima templado, la incidencia del viento resulta, mayoritariamente, en pérdidas de calor en el intercambio de energía térmica animal, generando reducciones en la temperatura corporal. En general, el aumento de la velocidad del viento genera elevaciones de los umbrales mínimo y máximo de la zona termoneutral de animales como el ganado vacuno (DeShazer et al., 2009, Silva y Maia, 2013). El efecto del aumento en la velocidad del viento sobre la disipación de calor generada es descrito mediante una función exponencial, entre los 0 y los 6 m s^{-1} , y una relación lineal a partir de este valor (Mader et al., 2010). Por otro lado, también se verifican efectos de aumento en la sensación térmica a partir del incremento de la velocidad del viento, lo que puede ocurrir en zonas muy cálidas o cuando la temperatura del aire supera el valor de la temperatura corporal (DeShazer et al., 2009, Mader et al., 2010, Silva y Maia, 2013).

La presencia de árboles en una superficie genera cambios en la distribución y velocidad del viento. A medida que este se acerca a la cobertura arbórea, parte del aire se desplaza vertical y horizontalmente. La porción remanente incide y atraviesa la barrera de árboles, con reducción de su velocidad. La magnitud de esta reducción depende de la porosidad del componente arbóreo, la cual es influenciada por características como la superficie ocupada, el arreglo y la densidad de árboles, el volumen de biomasa, el ancho de la barrera, el largo de copa y la altura (Zhu, 2008).

1.2.5. Biometeorología animal e indicadores térmicos

Los animales homeotermos, como el ganado vacuno, poseen la capacidad de mantener la temperatura corporal (termorregulación) en niveles adecuados para el funcionamiento del organismo en un amplio rango de condiciones ambientales. Cuando, sometidos por largos períodos a intensas condiciones adversas, el organismo de los animales homeotermos

puede tener su homeostasis² afectada, generando el estado de estrés (Collier et al., 2008, McManus et al., 2009, Chen et al., 2015). De acuerdo a la intensidad y duración de esta condición, se generan respuestas al estrés coordinadas por los sistemas nervioso y endócrino de los animales, con alteraciones comportamentales, fisiológicas y bioquímicas direccionadas a la recuperación del equilibrio (Goldstein y Kopin, 2007, Sejian, 2012). Como resultado de estos procesos, en bovinos se reportan aumentos del consumo energético y disminuciones en la ingesta de MS, en la capacidad reproductiva y en el peso corporal (Collier et al., 2008, Chen et al., 2015).

El intercambio térmico de calor de los animales con el ambiente es conducido, principalmente, por los siguientes mecanismos físicos: a) conducción, por transferencia de calor entre los tejidos de la dermis y epidermis de los animales y las superficies de contacto, como suelo y agua; b) convección, referente al intercambio de calor entre el aire y los animales, influenciado por sus temperaturas, por la totalidad de la superficie de contacto del animal y por la velocidad de los vientos; c) radiación, que genera aportes calóricos por incidencia de los fotones de energía sobre los animales y d) evaporación, proceso influenciado por la configuración y temperatura del animal, temperatura del aire y presión de vapor de agua y velocidad de los vientos (DeShazer et al., 2009, Soren, 2012; Silva y Maia, 2013). Por ser la fuente de variación en gran parte de los mecanismos mencionados, las variables meteorológicas son utilizadas en evaluaciones de confort térmico animal para la obtención de indicadores que relacionen la condición térmica ambiental y las respuestas en los animales.

Entre los indicadores más reportados en la literatura se encuentra el índice de temperatura-humedad (ITH), desarrollado por Thom (1959). Este indicador relaciona la temperatura y humedad relativa del aire con la disminución en la productividad de vacas en lactación. El índice de temperatura del globo negro y humedad (ITGH), reportado por Buffington et

²Homeostasis: término utilizado para describir el mantenimiento de un organismo dentro de un rango adecuado de funcionamiento con base en un conjunto de variables fisiológicas, tales como glucosa en la sangre, tensión del oxígeno y temperatura interna (Goldstein y Kopin, 2007, Sejian, 2012).

al. (1981), fue generado como una adaptación al indicador previamente mencionado, utilizando la temperatura del globo negro (TGN). Esta variable considera indirectamente los aportes de calor por radiación y pérdidas por convección utilizando esferas de cobre huecas pintadas de color negro mate. En la escala de valores obtenida para este indicador, el valor 79 define el umbral para la generación del estado de estrés térmico (Baêta, 1985, Baêta y Souza, 2010).

A partir de la TGN, Gaughan et al. (2008) desarrollaron el índice de carga calórica (ICC), incorporando la velocidad del viento, además de las variables presentes en el indicador previamente mencionado. Los valores obtenidos para este indicador fueron asociados a respuestas comportamentales de ganado vacuno, como la búsqueda por sombra, cambios en los niveles de ingesta de alimentos y niveles de jadeo. En su interpretación se consideran umbrales específicos de acuerdo a la especie de ganado vacuno, edad, color del cuero, salud y disponibilidad de acceso a sombra. Animales adultos de las razas Aberdeen Angus y Hereford (*Bos taurus* British), se define el valor de 86 para el umbral térmico de estrés para animales sin acceso a sombra.

El índice de clima integral (ICI), desarrollado por Mader et al. (2010), expresa la sensación térmica aparente utilizando la temperatura del aire y ecuaciones de conversión de los valores de humedad relativa del aire, velocidad de los vientos y radiación en temperatura ambiente. Este indicador fue establecido considerando un amplio rango de condiciones ambientales, permitiendo determinar estados de estrés térmico por calor y frío. Los umbrales que definen condiciones de estrés térmico fueron determinados mediante regresiones lineales con base en los valores del ITH y del *wind chill model* para condiciones de estrés por frío. La interpretación del indicador considera diferencias para animales con alta y baja susceptibilidad al estrés térmico, de acuerdo con su etapa de vida, nivel de aclimatación a las condiciones de campo y disponibilidad de abrigo.

1.3. Secuestro y almacenamiento de carbono

El carbono es mayoritariamente incorporado a los ecosistemas terrestres mediante la actividad de las plantas, captando el carbono atmosférico mediante el proceso de fotosíntesis (Di Vita et al., 2017). El secuestro y almacenamiento del carbono se encuentra asociado a la productividad primaria bruta (PPB) y neta (PPN) de los ecosistemas. La primera indica la tasa de carbono fijado en los tejidos vegetales y la segunda indica el balance entre el carbono fijado y el liberado mediante la respiración (Di Vita et al., 2017). En general, en zonas tropicales, subtropicales y templadas, los ecosistemas forestales en una etapa de sucesión ecológica temprana, o juvenil, poseen valores elevados de PPN. La reducción en la PPN ocurre a edades mayores debido al aumento de los niveles de respiración verificados, especialmente para mantenimiento del flujo de savia, y debido a reducciones en la eficiencia fotosintética (He et al., 2012, Yu et al., 2017).

El carbono almacenado en un ecosistema es generalmente expresado en megagramos de carbono por hectárea (Mg ha^{-1}) y se encuentra distribuido en los compartimentos formados por materia orgánica: suelos, biomasa subterránea, biomasa aérea y residuos orgánicos (Nair et al., 2010, UNFCCC, 2012). El suelo es generalmente dividido por horizontes y profundidades y la biomasa vegetal, de acuerdo con su estrato de formación (herbáceo, arbustivo y arbóreo), además de su separación en las fracciones de raíces, fuste, tallos, ramas, hojas y demás. Estos estudios pueden utilizar diferentes métodos de muestreo, definiendo la forma de uso y cobertura del suelo de interés, contando con la instalación de parcelas para la mensura de la biomasa presente y la obtención de muestras para la determinación de sus contenidos de carbono (IPCC, 2006, Nair et al., 2010, UNFCCC, 2012).

Los sistemas agroforestales han sido sugeridos como una categoría de agroecosistema con potencial para promover el secuestro y almacenamiento de carbono (Haile et al., 2010, Nair et al., 2010, Dube et al., 2012, Udawatta y Jose, 2012, Peri et al., 2017). La incorporación de estratos arbóreos y/o arbustivos ha sido indicada como forma de mejorar

el balance de gases de efecto invernadero (GEI) en sistemas de producción caracterizados como emisores, como la ganadería extensiva (Resende et al., 2019).

1.4. Preferencias por servicios ambientales

Los SA son generados a partir de la dinámica ecológica entre los componentes bióticos y abióticos en un ambiente biofísico manejado y resultan en bienes o servicios que satisfacen directa o indirectamente alguna necesidad humana (Muradian et al., 2010, Potschin y Haines-Young, 2011, Zhang et al., 2018). De esta manera, la definición de las formas de uso del suelo y su manejo es un aspecto determinante sobre los niveles de oferta y calidad de los SA en los agroecosistemas. El concepto de SA indica la satisfacción de las necesidades y/o demandas de la sociedad, generando beneficios y niveles de utilidad al medio social (Bennett et al., 2009, Martín-López et al., 2012). Los productores vinculados a los agroecosistemas poseen diferentes motivaciones para mantener o promover formas de uso y cobertura de los suelos. Las características culturales y socioeconómicas de una población influyen directamente sobre sus percepciones del bienestar obtenido a partir de los SA. Además, este proceso cognitivo es influenciado indirectamente por las condiciones y demandas del medio social (Potschin y Haines-Young, 2011, Dade et al., 2019).

La ponderación de los beneficios obtenidos a partir de los SA generados por los agroecosistemas establece un proceso individual de compensación entre ellos. Estas relaciones de compensación pueden ser entendidas como el proceso en el cual a partir de una o más formas de uso y cobertura de los suelos, y sus manejos, un conjunto de servicios son promovidos mientras otros son afectados o disminuidos (Rodríguez et al., 2006, Dade et al., 2019). La incorporación de las perspectivas y preferencias de los actores sociales vinculados al manejo del ambiente biofísico permite entender cuáles SA son relevantes para este medio social, generando información para la gestión territorial (Martín-López et al., 2012, Dade et al., 2019).

Las relaciones de compensación entre los SA pueden ser analizadas mediante diferentes enfoques metodológicos. El abordaje de los estados de preferencia (EP) permite incorporar las perspectivas de los actores sociales a partir del proceso cognitivo de elección entre escenarios ambientales. Estas metodologías generalmente utilizan encuestas estructuradas aplicadas a individuos que deben elegir entre escenarios biofísicos con determinados atributos ambientales. Las elecciones realizadas por las personas indican sus preferencias y reflejan la utilidad asignada a los SA y los niveles de bienestar obtenidos (Hoyos, 2010, Czajkowski et al., 2014, Johnston et al., 2017). En evaluaciones de compensación entre SA, es común que las encuestas presenten una estructura con diferentes formas de uso y cobertura del suelo, una de ellas indicada como línea de base, o control, y las demás con variaciones en la oferta de atributos ambientales y valores económicos (Tietenberg y Lewis., 2018, Zhang et al., 2018, Chiputwa et al., 2020).

Entre los métodos más utilizados de los EP se verifican los experimentos de valoración contingente (VC) y de elección discreta (ED) (Train, 2009). Estas metodologías se basan en la utilización de escenarios ambientales para la creación de mercados hipotéticos, en los cuales los individuos indican sus preferencias. Las elecciones realizadas indican mayores niveles de utilidad, o bienestar, obtenidos frente a los demás escenarios disponibles. Estos abordajes permiten establecer relaciones entre las características de los individuos y sus preferencias (Czajkowski et al., 2014, Johnston et al., 2017, Zhang et al., 2018).

En el método de la VC, se utilizan preguntas dicotómicas, con respuestas de sí o no, para obtener la preferencia de los individuos por escenarios ambientales. Los ED se aplican por medio de encuestas estructuradas con preguntas (tareas de elección), cada una con un conjunto de escenarios (opciones) a seleccionar. Cada opción se compone por atributos (características ambientales) y niveles (valores de referencia que puede asumir) (Street y Burgues, 2007, Lancsar y Louviere, 2008, Rose et al., 2008, Lancsar et al., 2017). De modo general, un ED contiene un conjunto de tareas de elección, y en cada una de ellas la persona encuestada debe seleccionar una opción.

Las respuestas obtenidas tanto en los experimentos de VC como de ED reflejan las preferencias y un mayor nivel de utilidad asignada por los individuos a las opciones seleccionadas frente a las demás. El análisis de los datos de ambas metodologías se realiza mediante modelos econométricos, estimando coeficientes para los atributos ambientales y para las características socioeconómicas de los encuestados. Esto permite establecer una modelación de las preferencias por escenarios ambientales formulados a partir de variables cualitativas y cuantitativas (Lancsar y Louviere, 2008, Rose et al., 2008, Train, 2009, Lancsar et al., 2017).

El análisis de los datos provenientes de las referidas metodologías está fundamentado en dos teorías centrales: i) la teoría de la decisión comportamental (Louviere et al., 2000) y ii) la teoría de la maximización de la utilidad aleatoria (Marschak, 1960, McFadden, 1974). La primera sostiene que las decisiones individuales están basadas en un proceso cognitivo influenciado por diferentes factores (Louviere et al., 2000). Estos factores se construyen de manera propia a cada individuo, resultando de sus experiencias, preferencias y condiciones (género, edad, nivel educacional, renta, lugar de residencia, etc). La segunda teoría, también conocida como modelos de utilidad aleatoria (MUA), está basada en la concepción de que los individuos, al indicar la preferencia por una opción, buscan maximizar la utilidad obtenida (McFadden y Train, 2000). En economía, la utilidad es entendida como el beneficio neto percibido por un individuo a partir de una acción. Además, la vinculación entre las teorías se aplica también en situaciones en que la elección no se determina con base en la maximización de la utilidad, siendo un modelo útil para explicar la relación entre variables explicativas y elecciones (Street y Burgues, 2007, Train, 2009).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología implementada en el presente estudio está dividida en dos partes: i) la evaluación biofísica o ambiental (2.1), que describe la medición de variables biofísicas en un predio agropecuario para la obtención de indicadores y ii) el análisis socio-ambiental (2.2) que contiene la metodología utilizada para analizar las preferencias de los productores mediante la realización de encuestas. Los resultados generados a partir de la etapa de evaluación biofísica fueron utilizados para la formulación de los escenarios ambientales-productivos utilizados en las encuestas.

2.1. Evaluación biofísica

2.1.1. Caracterización del área de estudio

Este estudio se desarrolló en un establecimiento agrario ubicado en las coordenadas geográficas 34°01'S y 55°67'O, en el departamento de Florida, Uruguay (figura 4a y b). La forma de uso y cobertura del suelo predominante de la zona es del campo natural, correspondiente a la unidad Centro Sur-III (Lezama et al., 2011; Lezama et al., 2019), con alta cobertura de *Paspalum dilatatum* y *Nassella charruana*. Esta tipología de pastizal (figura 3) está formada por un estrato bajo (5 cm), dominado por gramíneas postradas estivales (~40 %), invernales (~50 %) y hierbas (~10 %), con estrato superior (30 cm) formado por gramíneas erectas.



Figura 3. Fisionomía del pastizal en el área de estudio.

En cuanto a las condiciones climáticas, en Uruguay se verifica un predominio de la clasificación Cfa de Köppen (1936), caracterizado como templado moderado húmedo, con

la temperatura promedio del verano superior a los 22 °C. El sitio de estudio se encuentra en una zona con temperatura media anual alrededor de los 17 °C, con máximas y mínimas mensuales de 23 °C y 12 °C, respectivamente (Castaño et al., 2011). La precipitación anual promedio verificada en la zona de estudio es de 1300 mm, con promedio de 80 y 120 mm para los meses de enero y octubre. En cuanto a la incidencia de heladas, se verifican entre 30 a 35 por año, concentradas mayoritariamente de junio a agosto. A su vez, la heliofanía varía entre 9,5 h día⁻¹ y 5 h día⁻¹ en enero y julio, respectivamente (Castaño et al., 2011).

La zona del predio de estudio se encuentra en la formación San Gabriel-Guaycurú de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976). Los datos obtenidos para la descripción y caracterización físico-química del suelo en el área de evaluación se encuentran disponibles en el anexo 1. El suelo fue clasificado como Brunosol Subéutrico Típico conteniendo 97 cm de profundidad, horizonte superficial melánico, más de 2 % de materia orgánica en los primeros 20 cm, relación entre el porcentaje de arcilla del horizonte Bt respecto al A mayor a 1,2 y textura franco-arcillosa y arcillosa en los horizontes A y Bt, respectivamente. El área de estudio se encuentra en la parte media a baja de una ladera convexa con exposición norte. La declividad verificada está entre 3 % y 4 %. En conjunto, el área de estudio integra al grupo 5.02b de la clasificación de los grupos CONEAT.

Sistema productivo

El establecimiento presenta una historia productiva de pastoreo sobre CN, en sistema ganadero de ciclo completo abierto, además de cría y recría de ganado vacuno de las razas Hereford y Aberdeen Angus, y ovinos Corriedale. La tabla 1 presenta las formas de uso y cobertura del suelo del referido establecimiento. Del área destinada a los SSP, 95,10 ha fueron establecidas en el año de 2012, 18 ha, en el año de 2014 y 32,50 ha, en 2019. Estas áreas están compuestas por unidades de manejo (rodales), formadas por individuos arbóreos de *Eucalyptus grandis* dispuestos en arreglo de filas triples, con 3 m en las entre filas, 2 m en las filas y callejones de 18 m, resultando en densidad inicial de,

aproximadamente, 625 árb. ha⁻¹. Las plantaciones del año 2012 tuvieron un raleo selectivo a los 2 y 7 años de edad y redujeron la densidad promedio a 425 y 150 árb. ha⁻¹, respectivamente. Se realizaron podas a los 2 y 4 años, manteniendo los fustes libres de ramas hasta los 3 y 5 m, respectivamente.

Tabla 1. Formas de uso y cobertura del suelo en el predio de estudio.

Coberturas	Superficie (ha)	Proporción (%)
Pastizal	1.045,85	84,0
Sistema silvopastoril	145,60	11,7
Cortinas rompe viento	36,60	2,9
Cultivos forrajeros	13,60	1,1
Bosque nativo	0,55	< 1
Áreas con infra estructura	1,80	< 1
Total	1.244	100

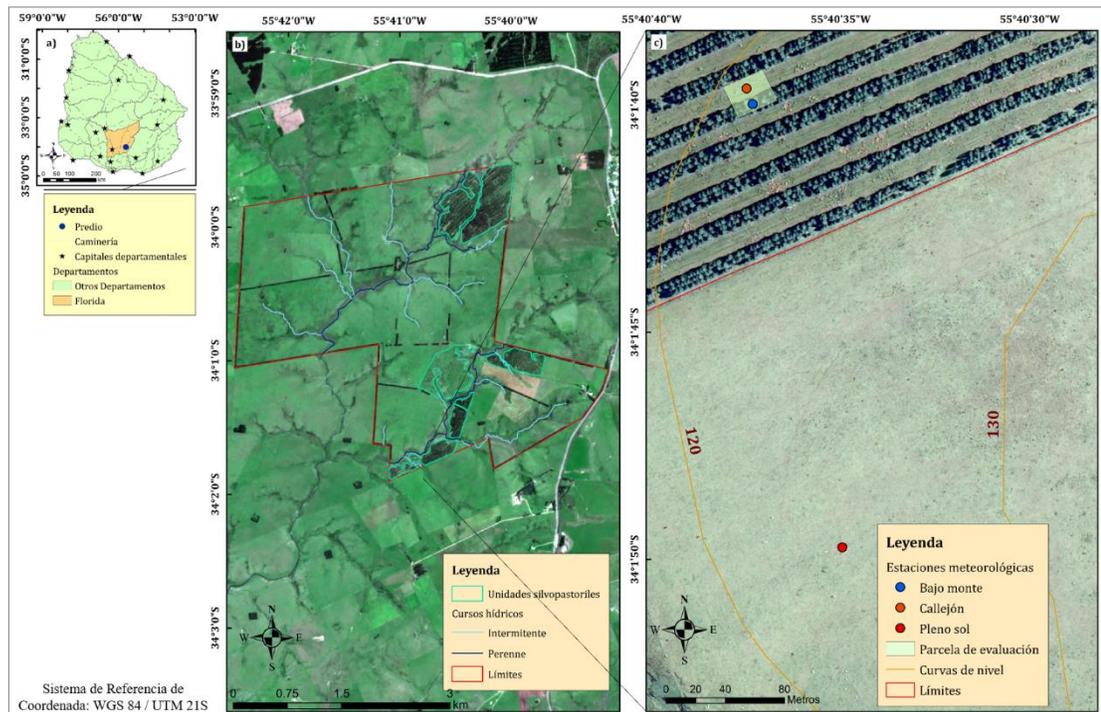


Figura 4. Ubicación del predio de estudio y de las posiciones de evaluación.

Fuente: a) elaborado a partir de datos publicados por el MVOTMA; b) imagen del satélite Sentinel-2; c) imagen publicada en la plataforma de Infraestructura de Datos Espaciales del Uruguay.

2.1.2. Microclima y producción de forraje

Estas evaluaciones fueron realizadas en el SSP y en la condición de PS, en CN sin árboles, mediante la instalación de estaciones de toma de datos meteorológicos y jaulas de exclusión de pastoreo para la obtención de producción de forraje. En la secuencia se describen los procesos de colecta de los datos.

2.1.2.1. Colecta de datos

Se definieron los siguientes tratamientos: a) PS en parcela ubicada sobre CN, 200 m al sur del SSP; b) callejón (CJ) de la zona central de una unidad de manejo silvopastoril, con superficie total de 10,90 ha, formada por 425 árb. ha⁻¹, en orientación este-oeste y Azimut (Az) = 80°; y c) bajo monte (BM) al centro de la triple hilera de árboles al lado de la parcela del CJ (figuras 4c y 5). Para esta evaluación se utilizó un diseño experimental completamente al azar con medidas repetidas en el tiempo. El análisis estadístico de los datos se presenta con mayor detalle en el punto 2.1.2.2. Las estaciones meteorológicas fueron instaladas el 26/06/2019 y la toma de datos se extendió hasta el 30/06/2021.



Figura 5. Estaciones meteorológicas en a) PS; b) CJ y c) BM.

A continuación, se presentan las variables de microclima evaluadas en el estudio, las cuales serán nombradas de ahora en adelante por sus abreviaturas. Las variables fueron: temperatura del aire (TA, °C), humedad relativa del aire (HR, %), temperatura del punto de rocío (TPR, °C), déficit de presión de vapor (DPV, kPa), temperatura del globo negro (TGN, °C), velocidad del viento (V, m s⁻¹), y radiación solar global (RS, W m⁻²). Además, para el análisis de los datos se consideraron también la temperatura del aire diaria máxima (TAM, °C), temperatura del aire diaria mínima (TAm, °C), humedad relativa del aire diaria

máxima (HRM, %), humedad relativa del aire diaria mínima (HRm, %), velocidad del viento diaria máxima (VM, m s⁻¹) y temperatura del globo negro diaria máxima (TGNM, °C). Los sensores fueron programados para tomar datos a cada 30 min, los cuales fueron posteriormente promediados en valores horarios. A partir de estas variables se calcularon los siguientes índices de biometeorología animal: a) índice de clima integral (ICI, Mader et al., 2010) obtenido a partir de las ecuaciones (ec.) 1, 2, 3 y 4; b) índice de temperatura y humedad (ITH, Thom, 1959), con la ec. 5; c) índice de carga calórica (ICC, Gaughan et al., 2008) con las ec. 6 y 7; d) índice de temperatura del globo negro y humedad (ITGH, Buffington et al., 1981) a partir de la ec. 8.

$$ICI = TA + a + b + c \quad \text{Ec. 1}$$

$$a = e^{(0,00182 \times HR + 1,8 \times 10^{-5} \times TA \times HR)} \times (0,000054 \times TA^2 + 0,00192 \times TA - 0,0246) \times (HR - 30) \quad \text{Ec. 2}$$

$$b = \left[\frac{-6,56}{\left\{ e^{(2,26 \times V + 0,23)^{0,45} \times (2,9 + 1,14 \times 10^{-6} \times V^{2,5} - \log_{0,3}(2,26 \times V + 0,33)^{-2})} \right\}} \right] - 0,0056 \times V^2 + 3,33 \quad \text{Ec. 3}$$

$$c = 0,0076 \times RS - 0,00002 \times RS \times TA + 0,00005 \times TA^2 \times \sqrt{RS} + 0,1 \times TA - 2 \quad \text{Ec. 4}$$

$$ITH = 0,8 \times TA + \left(\frac{HR}{100} \times (TA - 14,3) \right) + 46,4 \quad \text{Ec. 5}$$

$$ICC_{TGN>25} = 8,62 + 0,38 \times HR + 1,55 \times TGN - 0,5 \times V + e^{(2,4-V)} \quad \text{Ec. 6}$$

$$ICC_{TGN>25} = 10,66 + 0,28 \times HR + 1,3 \times TGN - V \quad \text{Ec. 7}$$

$$ITGH = TGN + 0,36 \times TPR + 41,5 \quad \text{Ec. 8}$$

La RFA incidente y su transmisión en el SSP se evaluó de forma independiente de las demás variables de microclima previamente mencionadas. Para esto se utilizó un diseño experimental completamente al azar y las mediciones fueron realizadas con un ceptómetro AccuPAR LP-80. La referida variable fue evaluada en una parcela rectangular de 240 m² (10 x 24 m), entre las 08:00 h y las 17:00 h en días completamente despejados al momento central, entre la 6.^a y 7.^a semana de cada estación del año. Las evaluaciones fueron

realizadas en las siguientes posiciones: en el CJ, en dos posiciones centrales a los 9 m de la triple hilera de árboles, a los 6 y 3 m de al norte y al sur de los árboles y debajo de cada fila de árboles de la triple hilera, totalizando, así, 9 posiciones (figura 6).

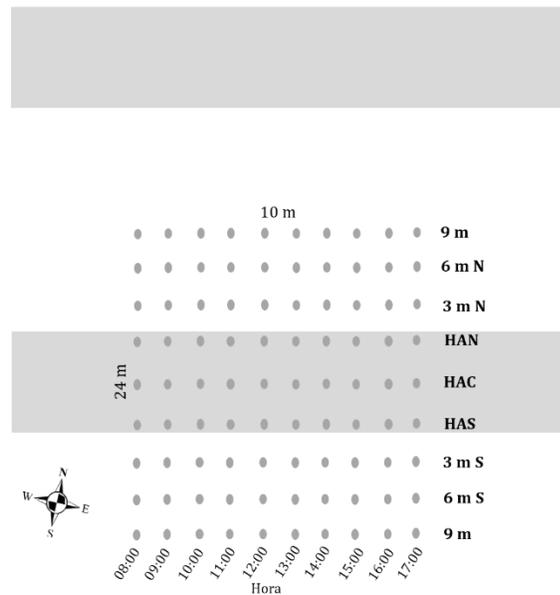


Figura 6. Esquema de la distribución espacio temporal para las evaluaciones de RFA en el SSP. Las fajas grises indican las triples hileras de árboles. 9 m = al centro del CJ; 6 m N, 3 m N = a los 6 y 3 m al norte de los árboles, respectivamente; HAN = hilera de árboles al norte; HAC = hilera de árboles central; HAS = hilera de árboles al sur; 6 m S, 3 m S = a los 6 y 3 m al sur de los árboles, respectivamente.

En cada posición y hora del día fueron registrados 30 datos, separados en 3 repeticiones con 10 réplicas, totalizando 270 datos para cada hora, además de otras 30 medidas por hora en ambiente a PS. Así, en cada fecha de evaluación se recolectó un total de 3.000 registros. A partir de estos valores, fueron calculados los porcentajes horarios de transmisión de RFA para las posiciones del SSP, respecto a la radiación incidente a PS. Las mediciones fueron realizadas durante el período de la primavera de 2019 hasta el invierno de 2020.

Los promedios de transmisión de RFA para cada posición y hora del día fueron asignados a una grilla de 90 puntos (figura 6) formada por 9 líneas, indicando cada posición evaluada, y 10 columnas con las horas entre las 8:00 h y las 17:00 h. Utilizando el método de interpolación de datos de la distancia inversa ponderada (Bartier y Keller, 1996, Wu y

Hung, 2016, Majumder et al., 2019) fueron generados esquemas de distribución espacio temporal de RFA para cada estación del año. Los procedimientos fueron realizados en el software ArcGIS® versión 10.1. A su vez, el análisis estadístico de los niveles de transmisión de RFA fue realizado utilizando los datos recolectados en las posiciones del CJ, sin incorporar la zona bajo el dosel arbóreo, debido a los elevados y constantes niveles de sombra obtenidos.

En cuanto al componente forrajero, fueron realizadas evaluaciones de la producción de forraje para cada estación del año en las condiciones a PS y en el CJ del SSP con cortes cada 45 días, mediante la instalación de 6 jaulas de exclusión de pastoreo de 1 m². Para esto, se utilizó un diseño completamente al azar con 3 repeticiones para cada condición en cada estación del año, en donde cada repetición resulta del corte de 4 cuadrantes de 0,2 x 0,4 m realizados en cada jaula de exclusión. La biomasa obtenida fue posteriormente secada en estufa de circulación de aire, a 60 °C, por 48 h, para la obtención de la MS.

2.1.2.2. Diseño experimental y análisis estadístico

El análisis de los datos de microclima e índices de biometeorología animal colectados en las estaciones meteorológicas fue realizado en tres niveles:

- i) En el primer nivel de análisis fueron utilizados los promedios diarios de las referidas variables, con las estaciones del año y posiciones (PS, CJ y BM) como efectos fijos, y las fechas (medidas repetidas) como efectos aleatorios del modelo (ec. 9).
- ii) Para el segundo nivel de análisis se utilizaron los promedios diarios de datos registrados durante olas de calor, definidas como los períodos de al menos tres días seguidos con promedios superiores a los 30 °C para el ICI y al valor de 72 de ITH (adaptado de Valtorta et al., 2004 y Saravia et al., 2011). El modelo (ec. 10) empleado en este análisis contiene el efecto fijo de las posiciones y de las olas de calor y fechas como efectos aleatorios.
- iii) Por último, en el tercer nivel de análisis se utilizaron los mismos datos de las olas de calor, agregando al modelo estadístico anterior el efecto fijo de las horas del día,

las cuales fueron agrupadas cada dos horas, generando un nuevo factor con 12 niveles, indicado en el modelo de la ec. 11.

Los tres niveles de análisis mencionados fueron realizados con modelos lineales generalizados mixtos (MLGM). Estos modelos son definidos en 3 etapas: (i) la selección de una familia de distribución de probabilidad para la variable de respuesta, (ii) la especificación del componente explicativo (predictor lineal) con variables independientes y (iii) la determinación de la función de enlace entre la variable de respuesta y el componente explicativo (Zuur et al., 2009). El uso de un MLGM se justifica debido a la posibilidad de superar algunas de las restricciones existentes en la naturaleza de los datos del experimento: i) la falta de normalidad en la distribución de los residuos del modelo (Zuur et al., 2009, Harrison et al., 2018) y ii) la autocorrelación existente entre las observaciones, superada con la incorporación del efecto aleatorio para las medidas repetidas en el tiempo (Balzarini et al., 2005, Carrero et al., 2008, Zuur et al., 2009).

$$Y_{ijm} = e^{\mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + t_m} + \varepsilon_{ijm} \quad \text{Ec. 9}$$

$$Y_{jmc} = e^{\mu + \beta_j + t_m + o_c} + \varepsilon_{jmc} \quad \text{Ec. 10}$$

$$Y_{jfmc} = e^{\mu + \beta_j + \gamma_f + (\beta\gamma)_{jf} + t_m + o_c} + \varepsilon_{jfmc} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde Y es la variable de respuesta, μ , el promedio general, α_i , el efecto de la estación del año (i), β_j , el efecto de la posición (j), $(\alpha\beta)_{ij}$, el efecto fijo entre estación del año y posición, t_m , el efecto aleatorio del tiempo, o_c , el efecto de la ola de calor, γ_f , el efecto fijo de la hora del día, $(\beta\gamma)_{jf}$, el efecto fijo de la interacción entre posición y hora del día, y ε , el error experimental.

Los valores de transmisión de la RFA en las posiciones del CJ del SSP fueron analizados mediante un modelo lineal generalizado (MLG, ec. 12) que contiene las estaciones del año, las horas del día y las posiciones como efectos fijos. Las posiciones consideradas fueron las presentes en el CJ, al centro de este (a 9 m de los árboles), a los 6 y 3 m al norte y al sur de los árboles, resultando en 5 posiciones.

$$Y_{ijf} = e^{\mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_f + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{if} + (\beta\gamma)_{jf} + (\alpha\beta\gamma)_{ijf}} + \varepsilon_{ijf} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde Y_{ijf} es la variable respuesta, μ , el promedio general, α_i , el efecto fijo de la estación del año (i), β_j , el efecto fijo de la hora del día (j), γ_f , el efecto fijo de la posiciones (f), $(\alpha\beta)_{ij}$, el efecto fijo de la interacción entre estación del año y hora del día, $(\alpha\gamma)_{if}$, el efecto fijo de la interacción entre estación del año y posición, $(\beta\gamma)_{jf}$, el efecto fijo de la interacción entre horas del día y posición, $(\alpha\beta\gamma)_{ijf}$, el efecto fijo de la triple interacción entre estación del año, hora del día y posición, y ε_{ijf} , el error experimental.

Los procedimientos realizados para todos los modelos anteriormente mencionados consideraron ajustes para las distribuciones de probabilidad Gamma y gaussiana inversa, con funciones de enlace del tipo *log*. La selección del modelo con mejor ajuste para cada variable fue realizada con base en los valores del criterio de información de Akaike (AIC) y en la evaluación de los gráficos de las funciones de autocorrelación (ACF) y dispersión de los residuos (Balzarini et al., 2005, Di Rienzo et al., 2012).

El análisis de los datos recolectados para la determinación de la producción estacional de forraje fue realizado mediante un análisis de varianza (ANOVA, ec. 13), considerando las estaciones del año y las posiciones, PS y CJ del SSP, como efectos fijos.

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde Y_{ijf} es la variable de respuesta, μ , el promedio general, α_i , el efecto fijo de la estación del año (i), β_j , el efecto fijo de posiciones (j), $(\alpha\beta)_{ij}$, el efecto fijo de la interacción entre la estación del año y la posición y ε_{ijf} , el error experimental.

En el ajuste del modelo presentado en la ec. 13 se consideró la verificación de los siguientes supuestos: (i) normalidad en la distribución de los residuos, verificada mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov; (ii) homogeneidad de varianza, mediante la prueba de Breusch-Pagan e (iii) independencia de los residuos, mediante la prueba de Durbin-Watson. Además, la verificación del modelo ajustado fue corroborada por análisis gráfico

de la dispersión de los residuos estandarizados de Pearson vs. los valores predichos por el modelo y del gráfico de ACF (Balzarini et al., 2005, Di Rienzo et al., 2012).

Las variables producción estacional de MS forragera (kg ha^{-1}) y RFA incidente acumulada ($\text{mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) fueron utilizadas como dependiente e independiente, respectivamente, en el ajuste de un modelo lineal generalizado (MLG, ec. 14) con distribución de probabilidad Gamma y enlace *log*. La bondad del ajuste fue evaluada mediante el Pseudo R^2 de McFadden. Además, el ajuste del modelo fue corroborado con el análisis del gráfico de dispersión de los residuos estandarizados de Pearson vs. los valores predichos por el modelo (Zuur et al., 2009).

$$Y_i = e^{\mu + \alpha_i} + \varepsilon_i \quad \text{Ec. 14}$$

Donde Y_i es la variable de respuesta, μ , el promedio general, α_i , el efecto fijo de la RFA incidente acumulada y ε_i , el error experimental.

Los procedimientos estadísticos para análisis de los modelos de las ec. 9, 10, 11, 12, 13 y 14 fueron realizados en el *software* R 4.0.3, mediante la interfaz Rstudio. Las comparaciones de media entre las combinaciones de factores de los análisis se realizaron por el método de las medias marginales estimadas (MME), con ($\alpha = 0,05$), agregando correcciones de Tukey. Se utilizó la función *glmer* para la generación de los MLGM, *glm* para el MLG, ambas disponibles en el paquete *lme4*, la función *lm* para el análisis de varianza, disponible en el paquete *Stats*, y la función *emmeans* del paquete de mismo nombre para las comparaciones de media.

2.1.3. Almacenamiento de carbono

Para estimar las cantidades de carbono orgánico almacenadas en el SSP fueron considerados los componentes presentes en la ec. 15:

$$\text{CO}_T = C_s + C_f + C_a \quad \text{Ec. 15}$$

Donde CO_T es el carbono orgánico total estimado, C_s es el carbono contenido en el componente suelo, C_f es el carbono presente en la biomasa forrajera y C_a es el carbono alojado en la biomasa arbórea.

La estimación de C_s se realizó con base en la ec. 16, considerando los estratos de profundidad de 0-5, 5-10, 10-15, 15-30, 30-60 cm, en las posiciones del SSP al centro del CJ y en la fila central de la triple hilera de árboles (BM) y en CN (ver figura 4c).

$$\sum_E C_s = DAP \times P \times CC \quad \text{Ec. 16}$$

Donde \sum_E es la suma para los estratos evaluados, C_s es el valor de carbono en el suelo ($Mg\ ha^{-1}$), DAP es la densidad aparente del suelo ($Mg\ m^{-3}$), P es la profundidad del estrato (cm) y C es la concentración de carbono (%).

Para la evaluación, se realizó inicialmente un muestreo para la descripción y caracterización del tipo de suelo en el área de evaluación. Los resultados se encuentran disponibles en el anexo 1. El suelo fue clasificado como Brunosol Subéutrico Típico. La evaluación del carbono orgánico total presente en las profundidades y posiciones anteriormente mencionadas fue realizada considerando un diseño experimental completamente al azar, con 3 repeticiones para cada profundidad y posición, cada una formada por 20 muestras de suelo obtenidas con uso de calador.

La determinación de la concentración de carbono orgánico de las muestras fue realizada por digestión ácida y titulación, utilizando el método de Walkley-Black descrito por Nelson y Sommers (1996). La determinación de la densidad aparente del suelo se realizó para las mismas profundidades y posiciones mencionadas anteriormente, considerando 3 repeticiones obtenidas con uso de muestreador de densidad aparente del suelo. De cada muestra de los estratos se determinó la relación entre la masa seca de suelo y su volumen. El análisis del carbono almacenado en CN y en el SSP, de los valores de densidad aparente del suelo y de la concentración de carbono fueron realizados mediante un ANOVA (ec. 17).

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde Y_{ijf} es la variable de respuesta, μ , el promedio general, α_i , el efecto fijo de la profundidad (i), β_j , el efecto fijo de posiciones (j), $(\alpha\beta)_{ij}$, el efecto fijo de la interacción entre la estación del año y la posición y ε_{ijf} , el error experimental.

En cuanto al carbono alojado en el componente forrajero (C_f), este fue determinado considerando la biomasa forrajera obtenida para las posiciones en el CJ del SSP y en CN. Para esto, fueron realizadas 5 determinaciones de la concentración de carbono por vía húmeda y colorimetría (Nelson y Sommers, 1996), formadas por material vegetal de todas las estaciones del año.

Para la estimación del carbono presente en el estrato arbóreo (C_a), se consideró la biomasa fustal de los árboles. Para esto, fue realizado inicialmente un inventario forestal, mediante la instalación de 5 parcelas de 400 m² y la medición de altura y de diámetro de los árboles a 1,3 m del suelo. Esta evaluación fue realizada en la primavera de 2020, cuando los árboles tenían 8 años de edad. En cada parcela de inventario se colectaron muestras de madera obtenidas con calador de Pressler a 1,3 metros de altura del árbol, provenientes de 5 individuos, con 2 muestras por individuo. Las determinaciones de la densidad básica de la madera y del contenido de carbono fueron realizadas para 5 muestras compuestas, cada una, por el material de 5 individuos, mediante los métodos de desplazamiento de volumen y por vía húmeda y colorimetría (Nelson y Sommers, 1996), respectivamente.

Los valores de área basal (m² ha⁻¹), volumen (m³ ha⁻¹), biomasa fustal (Mg ha⁻¹) y carbono fustal (Mg ha⁻¹) fueron calculados a partir de las ec. 18, 19, 20 y 21, respectivamente. Se obtuvieron estas variables para cada parcela del inventario forestal y los promedios de estas fueron asumidos como estimaciones para el SSP.

$$\sum_p AB_i = \frac{(\pi \times D_i^2)}{4} \quad \text{Ec. 18}$$

$$\sum_p Vol_i = AB_i \times A_i \times f \quad \text{Ec. 19}$$

$$\sum_p BF_i = Vol_i \times DM \quad \text{Ec. 20}$$

$$\sum_p CF_i = BF_i \times CC$$

Ec. 21

Donde \sum_p es la sumatoria para la parcela de inventario, AB_i es el área basal individual (m^2 árbol $^{-1}$), D_i es el diámetro (cm) individual a 1,3 m de altura, Vol_i es el volumen individual (m^3 árbol $^{-1}$), A_i es la altura individual (m), f es el factor de forma de la especie, BF_i es la biomasa fustal individual (Mg árbol $^{-1}$), DM es la densidad básica madera (Mg m^{-3}), CF_i es el carbono fustal individual (Mg árbol $^{-1}$) y CC es la concentración de carbono de la madera (%).

La diferencia entre el carbono almacenado en la condición de PS y en el SSP fue transformado en valores de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) utilizando el factor de conversión de 3,67 (IPCC, 2006).

2.2. Preferencias ambientales-productivas

Esta etapa fue desarrollada con base en los resultados e indicadores obtenidos para los SA de regulación del microclima, producción de forraje y almacenamiento de carbono, los cuales fueron utilizados en la estructuración de encuestas direccionadas a productores ganaderos. A partir de estas encuestas se evaluaron: a) las relaciones de compensación entre los SA, mediante un experimento de elección discreta (ED) y b) la disposición para incorporar SSP, a partir de la realización de un experimento de valoración contingente (VC).

Para la realización de las encuestas, se utilizó el método de muestreo de referencia en cadena, también conocido como “bola de nieve”. Este método es comúnmente utilizado cuando la población objetivo es difícil de identificar y se encuentra dispersa geográficamente o es de difícil abordaje (Coleman, 1958, Goodman, 1961, Heckathorn, 2011, Handcock y Gile, 2011, Cohen y Arieli, 2011). En estos casos, es difícil establecer un proceso de muestreo convencional, como el aleatorio o estratificado, en los cuales se requiere un listado de toda la población para que se pueda diseñar el muestreo. Para realizar el muestreo, se partió de un número inicial de 5 individuos seleccionados de forma aleatoria entre un grupo. Con estos individuos se realizó una versión piloto de la encuesta,

permitiendo realizar ajustes sobre esta. Los individuos participantes de esta etapa inicial fueron, además, fuente de reclutamiento para nuevos participantes. En cada nuevo grupo de individuos incorporado, se tomó una muestra aleatoria (Kaplan et al., 1987, Johnson, 2005), como forma de controlar los niveles de similitud entre los sujetos de una misma fuente. Las encuestas fueron realizadas tanto en forma personal (8 encuestas) como por teléfono (13 encuestas) y por correo electrónico (6 encuestas). Los productores involucrados en este proceso poseían algún conocimiento previo sobre el tema de los SSP o tenían interés en conocerlo. La encuesta se adjunta en el anexo 3.

La encuesta fue dividida en cuatro partes: inicialmente, se presentó una introducción al tema, con conceptos generales sobre los SSP, confort térmico animal y almacenamiento de carbono. El objetivo de esta etapa fue el de nivelar el conocimiento mínimo de los encuestados sobre la temática. La segunda etapa consistió en 12 preguntas acerca de las características socioeconómicas de los encuestados y de las características biofísicas de los establecimientos agropecuarios manejados. La tercera etapa contenía el experimento de ED, formado por 6 preguntas (tareas de elección). En la cuarta etapa se presentó el experimento de disposición a la incorporación de SSP, mediante el abordaje de VC.

2.2.1. Experimento de elección discreta

Este experimento fue realizado para establecer relaciones de compensación entre los SA. El experimento consistió en presentar 6 preguntas de elección, cada una con 3 opciones de escenarios productivos, en las cuales los encuestados debían responder indicando la opción de sus preferencias para ocupar una superficie equivalente al 10 % del área manejada. El experimento de ED fue estructurado utilizando los siguientes factores y niveles: i) ambiente térmico durante olas de calor, formado por 2 niveles (leve y moderado); ii) aumento en los niveles de carbono orgánico almacenados, con 4 niveles (nulo, bajo, medio y alto) y iii) reducción en la carga ganadera, con 6 niveles (0, 10, 20, 30, 40 y 50 %). Considerando la elevada cantidad de combinaciones, se utilizó un diseño ortogonal (Louviere et al., 2000, Street y Burgues, 2007, Ruto y Garrod, 2009), reduciendo de 48 a 24 las combinaciones de tratamientos.

Las combinaciones de tratamientos obtenidas fueron agrupadas en pares, lo que resultó en 12 conjuntos: cada uno representó una tarea de elección, o sea, formó una pregunta del experimento; los 12 conjuntos fueron separados en 2 grupos (versiones) de 6 pares cada uno, representando cada uno una versión de la encuesta (tabla 2).

Tabla 2. Combinaciones de tratamientos resultantes del diseño ortogonal para el experimento de ED.

Versión 1				Versión 2			
Sistemas	Ambiente térmico durante olas de calor	Aumento en el carbono almacenado	Reducción en la carga ganadera anual (%)	Sistemas	Ambiente térmico durante olas de calor	Aumento en el carbono almacenado	Reducción en la carga ganadera anual (%)
Pastoril	Severo	Nulo	0	Pastoril	Severo	Nulo	0
SSP 1	Moderado	Muy alto	0	SSP 1	Leve	Muy alto	20
SSP 2	Leve	Medio	0	SSP 2	Leve	Alto	0
Pastoril	Severo	Nulo	0	Pastoril	Severo	Nulo	0
SSP 1	Leve	Medio	10	SSP 1	Moderado	Bajo	0
SSP 2	Moderado	Alto	10	SSP 2	Moderado	Muy alto	10
Pastoril	Severo	Nulo	0	Pastoril	Severo	Nulo	0
SSP 1	Moderado	Bajo	40	SSP 1	Leve	Alto	40
SSP 2	Moderado	Alto	50	SSP 2	Leve	Muy alto	50
Pastoril	Severo	Nulo	0	Pastoril	Severo	Nulo	0
SSP 1	Moderado	Medio	50	SSP 1	Moderado	Alto	30
SSP 2	Leve	Bajo	50	SSP 2	Leve	Muy alto	40
Pastoril	Severo	Nulo	0	Pastoril	Severo	Nulo	0
SSP 1	Leve	Bajo	10	SSP 1	Moderado	Medio	20
SSP 2	Leve	Alto	20	SSP 2	Moderado	Alto	30
Pastoril	Severo	Nulo	0	Pastoril	Severo	Nulo	0
SSP 1	Moderado	Bajo	20	SSP 1	Moderado	Medio	40
SSP 2	Leve	Medio	30	SSP 2	Leve	Bajo	30

Así, cada versión de la encuesta contenía 6 preguntas de elección y cada pregunta se constituía por 2 opciones provenientes de las combinaciones de factores y niveles utilizados. A cada pregunta se agregó una tercera opción estándar (*statu quo*), titulada como opción Pastoril-Ganadero. Esta condición poseía los mismos factores que las demás opciones, con los siguientes niveles: i) ambiente térmico severo durante olas de calor, ii)

sin aumento en los niveles de carbono almacenados y iii) sin reducción en la carga y ganadera manejada. Cada individuo respondió a solo una de las versiones generadas.

2.2.2. Valoración contingente

La disposición de los productores ganaderos a adoptar SSP fue evaluada a partir de un experimento de VC. Para alcanzar este objetivo, se formuló un programa hipotético de incentivo a la incorporación o expansión de dichos sistemas en los predios manejados por los encuestados. El Programa de Adherencia Silvopastoril fue presentado con las siguientes características: i) destinado a productores agropecuarios con interés en incorporar y/o expandir áreas de manejo silvopastoril; ii) las áreas implantadas debían estar orientadas a la producción ganadera y forestal integrada, diversificando la obtención de productos; iii) no se considera la implantación de áreas destinadas exclusivamente a la generación de servicios a la ganadería, como cortinas rompeviento o islas de abrigo y sombra; iv) se subsidia un 50 % de los costos de implantación para las actividades del primer año, hasta un máximo de U\$S 200 por hectárea; iv) las superficies silvopastoriles en los predios no deben superar el 25 % de la superficie predial o las 125 hectáreas (ha) por persona física y/o jurídica; v) la participación en el programa es condicionada a la aprobación del *Proyecto de implantación*, conteniendo los documentos de posesión de la tierra una declaración de recursos naturales y croquis del área de implantación y vi) el tiempo mínimo de permanencia del SSP hasta la cosecha de turno final es de 10 años. Con base en este programa, se les preguntó a los encuestados si tenían disposición a incorporar o expandir el área silvopastoril en sus predios. En caso positivo, se les preguntó la superficie sobre la cual tenían interés en destinar a dicha finalidad.

2.2.3. Análisis estadístico

Al realizar una elección, el individuo (n) elige la opción (i) que le proporciona la mayor utilidad (U), siendo esta más grande que la U percibida con las demás opciones (j). En economía, la U es entendida como el beneficio neto percibido por un individuo a partir de una acción (Street y Burgues, 2007, Train, 2009). La U está formada por i) un componente

observado (V), utilizado para explicar las elecciones individuales, que reúne los factores y niveles del diseño experimental del ED y las características socioeconómicas de los individuos y ambiental-productivas de los predios para el experimento de VC, y ii) un componente no observado (ε), que contiene los factores no considerados en V , asumido como error aleatorio (Train, 2009). Esto puede ser expresado como:

$$P_{ni} = P(U_{ni} > U_{nj} \forall j \neq i) \quad \text{Ec. 22}$$

$$= P(V_{ni} + \varepsilon_{ni} > V_{nj} + \varepsilon_{nj} \forall j \neq i) \quad \text{Ec. 23}$$

$$= P(V_{ni} - V_{nj} > \varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni} \forall j \neq i) \quad \text{Ec. 24}$$

Donde P_{ni} es la probabilidad de un individuo n elegir una opción i , U_{ni} es la utilidad percibida por n al elegir una opción i , U_{nj} es la utilidad percibida por n con las demás opciones j , V_{ni} es el componente observado de la opción elegida, V_{nj} es el componente observado de las demás opciones j , ε_{ni} es el componente no observado (estocástico) de la opción elegida y ε_{nj} es el componente no observado de las demás opciones j .

El análisis estadístico de las preferencias fue realizado utilizando un modelo Logit mixto (ec. 25), con distribución de probabilidad binomial. Se utilizó un término aleatorio para los individuos, con el objetivo de flexibilizar el supuesto de independencia de alternativas irrelevantes (i.i.a.), que asume errores independientes entre las opciones (McFadden, 2001, Train, 2009). Las respuestas fueron codificadas de forma binaria, salvo la superficie de interés (ha) para la incorporación de SSP, que asume valores continuos. En el análisis del experimento de VC, las categorías de uso del suelo (ej. campo natural, recursos forrajeros implantados, cortina de abrigo y sombra, etc.) y la orientación ganadera (ganadería de cría, recria, etc.) fueron utilizadas como variables independientes continuas. Estas variables, reflejan la proporción del predio con cada categoría de uso del suelo, así como la proporción del rodeo destinada a cada sistema ganadero en el establecimiento.

La superficie de interés en incorporar SSP, fue analizada mediante un MLGM con una distribución *Gamma* y enlace del tipo *log* (ec. 26). Los análisis fueron realizados en el

software R 4.0.3 utilizando la función *glmer* para la generación de los MLGM, disponible en el paquete *lme4*.

$$P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_j e^{V_{nj}}} \quad \text{Ec. 25}$$

$$y = e^V + \varepsilon \quad \text{Ec. 26}$$

Donde P_{ni} es la probabilidad de elección de la alternativa i por el individuo n , V_{ni} es el componente observado de la alternativa i presentada al individuo n , V_{nj} es el componente observado de las demás alternativas j , e es la exponencial y ε , el error. La tabla 3 presenta los factores considerados en el análisis de cada variable de respuesta, así como el efecto hipotetizado para cada una.

Tabla 3. Efectos esperados para los factores utilizados en los modelos de cada variable de respuesta.

Variable	ED		VC	
	Elección de escenario productivo		Disposición a incorporar SSP	Superficie de interés
Ambiente térmico durante olas de calor	Leve	+		
	Moderado	+		
Aumento en el carbono almacenado	Bajo	+		
	Medio	+		
	Alto	+		
	Muy alto	+		
Reducción en la carga ganadera anual (%)	0			
	10	-		
	20	-		
	30	-		
	40	-		
Edad	Edad		-	-
	Nivel de instrucción		+	+
Área	Área		+	+
IPA	(%) Ingreso proveniente de fuente agropecuaria		-	-
GC	(% del rodeo) Ganadería de cría		+	+
GRC	(% del rodeo) Ganadería de recría		-	-
GCC	(% del rodeo) Ganadería de ciclo completo			-
GI	(% del rodeo) Ganadería de invernada			-
RFI	(% del predio) Recursos forrajeros implantados		-	-
SSP	(% del predio) Sistema silvopastoril			+
CT	(% del predio) Cortinas			+
CNSM	(% del predio) Campo natural sin mejoramiento			+
CNCM	(% del predio) Campo natural con mejoramiento			+
FC	(% del predio) Forestación convencional			-

3. RESULTADOS

Los resultados generados en este estudio se presentan separados con base en las temáticas de estudio: i) evaluaciones biofísicas, conteniendo los resultados de microclima, producción de forraje y almacenamiento de carbono y ii) análisis de las preferencias ambientales-productivas, con las relaciones de compensación entre los SA y las disposiciones a adoptar SSP.

3.1. Evaluaciones biofísicas

3.1.1. Microclima y biometeorología animal

En la tabla 4 se presentan las condiciones climáticas generales, considerando los promedios diarios para todo el período de evaluación. Estos valores corresponden a la condición de PS, sin la influencia del SSP.

Tabla 4. Promedios diarios de las variables meteorológicas para todo el período de estudio.

Descriptor	Temperatura del aire promedio (°C)	Temperatura del aire máxima (°C)	Temperatura del aire mínima (°C)	Humedad relativa del aire (%)	Humedad relativa del aire máxima (%)	Humedad relativa del aire mínima (%)
Media	17,45	22,70	12,09	74,77	92,78	54,52
Mediana	17,97	23,13	12,53	76,92	95,45	52,92
1.º cuartil	12,23	17,36	6,94	65,56	90,12	41,76
3.º cuartil	22,59	27,89	17,39	85,32	98,15	65,85
Máximo	33,63	36,35	28,00	99,91	100,00	98,60
Mínimo	3,28	7,92	-2,32	32,38	52,55	18,75
Descriptor	Déficit de presión de vapor (kPa)	Radiación solar (kWh m ⁻²)	Velocidad del viento (m s ⁻¹)	Velocidad del viento máxima (m s ⁻¹)	Temperatura del globo negro (°C)	Temperatura del globo negro máxima(°C)
Media	0,69	4,54	2,13	3,03	21,93	29,15
Mediana	0,48	3,96	2,02	2,87	21,54	30,26
1.º cuartil	0,25	2,50	1,39	2,07	15,03	22,42
3.º cuartil	0,98	6,32	2,77	3,89	27,74	35,74
Máximo	3,57	9,16	6,53	7,94	43,00	46,88
Mínimo	0,00	0,18	0,00	0,00	4,20	9,87

Las condiciones climáticas verificadas en este estudio son características de zonas de clima templado y compatibles con aquellas indicadas por Castaño et al. (2011) para el

centro y centro-este del Uruguay. En la tabla 5 se presentan los resultados del modelo de la ec. 9, con la comparación entre las posiciones de PS, CJ y BM para los promedios diarios estacionales.

Tabla 5. Promedios diarios de las variables de microclima para cada posición y estación del año.

Estación del año	Posición	Temperatura del aire (°C)			Temperatura máxima del aire (°C)			Temperatura mínima del aire (°C)			Humedad relativa del aire (%)		Humedad relativa máxima del aire (%)			
		Media	E. E.	a	Media	E. E.	b	Media	E. E.	a	Media	E. E.	a	Media	E. E.	a
Primavera	PS	17,30	0,24	a	23,40	0,27	b	9,48	0,27	a	73,60	0,69	a	92,90	0,43	a
	CJ	17,26	0,24	a	23,40	0,27	b	9,44	0,27	ab	73,10	0,69	a	92,80	0,43	a
	BM	17,26	0,24	a	23,70	0,28	a	9,42	0,27	b	72,50	0,69	a	89,50	0,43	b
Verano	PS	22,48	0,31	a	28,50	0,33	a	16,06	0,78	a	73,80	0,70	a	92,90	0,43	a
	CJ	22,42	0,31	a	28,50	0,33	a	16,00	0,77	a	72,70	0,70	a	92,60	0,43	a
	BM	22,39	0,31	a	28,70	0,33	a	15,91	0,77	b	69,30	0,70	b	86,80	0,43	b
Otoño	PS	14,30	0,20	b	19,50	0,23	b	8,09	0,19	a	83,20	0,69	a	95,40	0,43	a
	CJ	14,32	0,20	b	19,50	0,23	b	8,12	0,20	a	83,20	0,69	a	95,30	0,43	a
	BM	14,47	0,20	a	20,10	0,23	a	8,13	0,20	a	76,80	0,69	b	87,50	0,43	b
Invierno	PS	9,92	0,14	b	15,10	0,18	b	4,79	0,06	a	82,10	0,70	a	94,00	0,44	a
	CJ	9,95	0,14	ab	15,00	0,18	b	4,81	0,07	a	82,50	0,70	a	94,30	0,44	a
	BM	10,05	0,14	a	15,60	0,19	a	4,80	0,07	a	80,20	0,70	a	90,80	0,44	b

Estación del año	Posición	Humedad relativa mínima del aire (%)			Déficit de presión de vapor (kPa)			Velocidad del viento (m s ⁻¹)			Velocidad máxima del viento (m s ⁻¹)		Temperatura del globo negro (°C)			
		Media	E. E.	a	Media	E. E.	a	Media	E. E.	a	Media	E. E.	a	Media	E. E.	a
Primavera	PS	48,50	2,21	a	0,70	0,04	a	1,85	0,06	a	3,57	0,10	a	19,90	0,49	a
	CJ	48,50	2,17	a	0,72	0,04	a	1,29	0,05	b	2,73	0,08	b	19,50	0,47	b
	BM	47,80	2,21	b	0,72	0,04	a	1,19	0,04	c	2,50	0,08	c	18,30	0,41	c
Verano	PS	47,90	2,19	b	0,92	0,06	a	1,73	0,06	a	3,31	0,10	a	26,00	0,83	a
	CJ	49,10	2,24	a	0,89	0,06	a	1,51	0,05	b	2,91	0,09	b	24,20	0,72	b
	BM	46,40	2,12	c	0,99	0,06	a	1,39	0,05	c	2,68	0,08	c	22,60	0,63	c
Otoño	PS	63,10	2,84	a	0,36	0,01	b	1,87	0,06	a	3,84	0,11	a	15,30	0,29	a
	CJ	63,20	2,84	a	0,36	0,01	b	1,20	0,04	b	2,53	0,08	b	14,50	0,26	c
	BM	58,90	2,65	b	0,48	0,02	a	1,11	0,04	c	2,33	0,07	c	14,80	0,27	b
Invierno	PS	61,90	2,85	a	0,27	0,01	a	1,77	0,06	a	3,59	0,11	a	11,60	0,23	a
	CJ	62,50	2,88	a	0,26	0,01	a	1,20	0,05	b	2,61	0,08	b	11,20	0,23	b
	BM	60,40	2,78	b	0,30	0,01	a	1,11	0,04	c	2,41	0,08	c	11,30	0,22	b

E. E. = Error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas (p-valor < 0,05). PS = pleno sol, CJ = callejón, BM = bajo monte.

Con base en los resultados obtenidos, se verifica un efecto del SSP sobre la V y TGN, reduciendo los valores registrados en todas las estaciones del año con respecto a la condición a PS. Por otro lado, para las variables TAM, HR y HRm se obtuvieron diferencias en algunas estaciones del año, especialmente entre las posiciones BM y PS. La TA fue poco influenciada por el SSP a lo largo de las estaciones del año. Los valores de TAM y TAm se diferenciaron entre las posiciones en la mayoría de las estaciones, aunque con modificaciones inferiores a 1 °C. El DPV no fue influenciado por las posiciones del SSP, salvo durante otoño, cuando el área BM generó valores significativamente superiores a las demás condiciones.

3.1.1.1. Olas de calor

A continuación, la tabla 6 presenta una descripción general de los valores registrados en la posición a PS para las variables de microclima durante las olas de calor.

Tabla 6. Promedios diarios de las variables meteorológicas durante las olas de calor.

Descriptor	Temperatura del aire (°C)	Temperatura del aire máxima (°C)	Temperatura del aire mínima (°C)	Humedad relativa del aire (%)	Humedad relativa del aire máxima (%)	Humedad relativa del aire mínima (%)
Media	25,88	32,87	20,59	67,07	89,70	41,38
Mediana	25,83	33,04	20,60	68,21	91,75	42,35
1.º cuartil	24,81	31,83	19,88	61,78	87,90	32,90
3.º cuartil	26,71	34,08	23,23	71,03	93,95	47,02
Máximo	29,37	36,42	25,14	89,75	99,50	73,55
Mínimo	22,63	27,43	18,41	41,86	68,35	22,60
Descriptor	Déficit de presión de vapor (kPa)	Radiación solar (kWh m ⁻²)	Velocidad del viento (m s ⁻¹)	Velocidad del viento máxima (m s ⁻¹)	Temperatura del globo negro (°C)	Temperatura del globo negro máxima (°C)
Media	1,30	6,58	1,48	3,09	30,50	44,61
Mediana	1,27	6,91	1,41	2,98	30,53	44,88
1.º cuartil	1,12	5,60	1,12	2,47	29,42	42,37
3.º cuartil	1,48	7,62	1,67	3,58	31,60	46,96
Máximo	2,62	8,61	3,53	6,26	34,92	50,48
Mínimo	0,36	2,82	0,61	1,34	26,51	37,49

Durante el período de evaluación fueron registradas 11 olas de calor, con una duración de, aproximadamente, 8 días. En cuanto a las condiciones climáticas, el período presentó TA

diaria promedio alrededor de los 25 °C, con TAM y Tam diaria promedio de 32 °C y 20 °C, respectivamente. El promedio diario de la RS sugiere la ocurrencia de días con poca presencia de nubes y valores de V inferiores a aquellos verificados a lo largo de todo el período de estudio (tabla 4). La tabla 7 presenta los resultados del modelo referente a la ec. 10, con las comparaciones entre las posiciones evaluadas.

Tabla 7. Promedios diarios para las variables de microclima durante las olas de calor.

Variable	Posición	Media	E. E.		Variable	Posición	Media	E. E.	
Temperatura del aire (°C)	PS	25,80	0,16	a	Déficit de presión de vapor (kPa)	PS	1,25	0,04	a
	CJ	25,70	0,14	a		CJ	1,23	0,04	a
	BM	25,70	0,11	a		BM	1,24	0,04	a
Temperatura del aire máxima (°C)	PS	32,80	0,16	a	Radiación solar global (kWh m ⁻²)	PS	6,57	0,43	a
	CJ	32,60	0,15	ab		CJ	3,91	0,26	b
	BM	32,48	0,14	b		BM	0,44	0,03	c
Temperatura del aire mínima (°C)	PS	19,50	0,17	a	Velocidad del viento (m s ⁻¹)	PS	1,42	0,06	a
	CJ	19,40	0,15	ab		CJ	1,38	0,06	a
	BM	19,20	0,16	b		BM	1,21	0,06	b
Humedad relativa del aire (%)	PS	66,20	0,96	a	Velocidad del viento máxima (m s ⁻¹)	PS	2,96	0,10	a
	CJ	66,50	0,97	a		CJ	2,92	0,10	a
	BM	66,00	0,96	a		BM	2,37	0,08	b
Humedad relativa del aire máxima (%)	PS	89,50	6,59	a	Temperatura del globo negro (°C)	PS	30,40	0,17	a
	CJ	89,30	6,57	a		CJ	27,88	0,15	b
	BM	87,60	6,44	b		BM	25,79	0,14	c
Humedad relativa del aire mínima (%)	PS	40,50	1,05	a	Temperatura del globo negro máxima (°C)	PS	44,60	0,37	a
	CJ	39,80	1,04	a		CJ	42,60	0,36	b
	BM	39,60	1,03	a		BM	36,10	0,30	c

E. E. = Error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas (p-valor < 0,05). PS = pleno sol, CJ = callejón, BM = bajo monte.

La RS, V y TGN fueron las variables marcadamente influenciadas por las posiciones del SSP debido a la interferencia directa de la barrera física generada por los árboles. La TAM, Tam y HRM presentaron diferencias significativas entre la posición BM y la de PS, lo

que no fue verificado para el DPV, TA, HR y HRm. La figura 7 presenta los resultados para los indicadores de biometeorología animal.

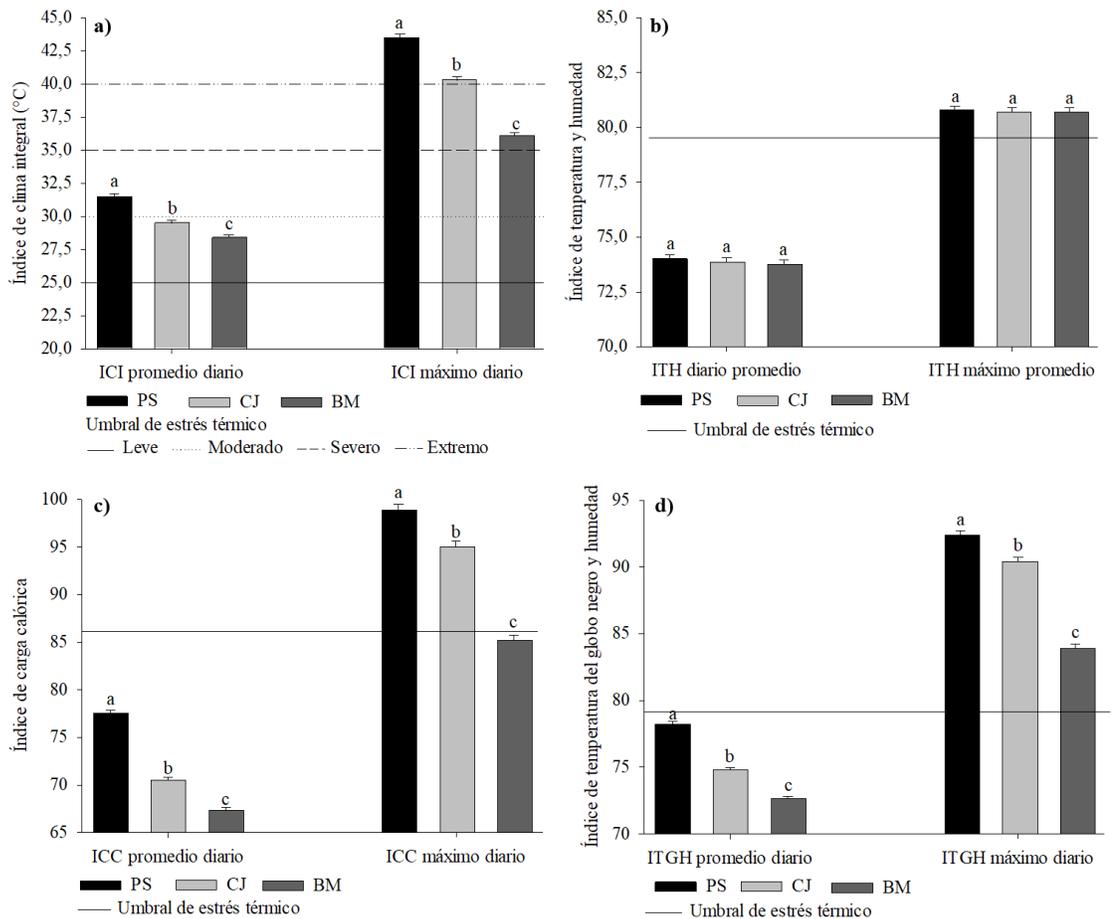


Figura 7. Promedios y máximos diarios para los indicadores de biometeorología animal durante las olas de calor. E. E. = Error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas (p-valor < 0,05). PS = pleno sol, CJ = callejón, BM = bajo monte, ICI = Índice de Clima Integral, ITH = Índice de Temperatura y Humedad; ICC = Índice de Carga Calórica; ITGH = Índice de Temperatura del Globo Negro y Humedad.

De acuerdo a lo verificado para las variables meteorológicas, los indicadores de biometeorología animal que incorporan directa o indirectamente el efecto de la RS y de la V en el intercambio térmico fueron los que presentaron diferencias significativas entre las posiciones. En el promedio diario del ICI hubo una diferencia de 2 °C y 3,1 °C entre la posición de PS y las del CJ y BM, respectivamente. Las diferencias del promedio de los valores máximos de este indicador fueron de 7,4 °C y 3,2 °C para el área BM y del CJ en

comparación con la de PS, respectivamente. En el indicador ICC hubo marcadas diferencias entre las posiciones, aunque ninguna de ellas superó, en el promedio diario, el umbral de estrés térmico de 86 sugerido por Gaughan et al. (2008) para ganado vacuno adulto de razas británicas. Sin embargo, el promedio de las máximas diarias a PS presentó una diferencia de ICC de 12,9 superior al referido umbral, lo que sugiere una elevada variación térmica a lo largo del día. El umbral no fue alcanzado en el promedio de los valores máximos para la posición BM (figura 7c). El ITGH presentó un comportamiento semejante al descrito para el ICC. En contraste con lo verificado para los demás indicadores, los máximos diarios no fueron diferentes entre las posiciones para el ITH.

A continuación, en la figura 8 se presentan los resultados obtenidos para el modelo de la ec. 11, considerando las variaciones horarias para las variables de microclima. Con los resultados obtenidos, considerando las variaciones horarias, se verificó un efecto de las posiciones en el SSP, respecto a la condición de PS, para los promedios diarios de V, RS y TGN (figura 8d, e y f, respectivamente). Así como lo obtenido para los promedios diarios, en cuanto al DPV, TA y HR, no hubo una clara diferencia entre las posiciones evaluadas. Los resultados obtenidos para los índices de biometeorología animal se encuentran en la figura 9.

El ICI (figura 9a) presentó diferencias significativas entre las posiciones evaluadas desde las 6:00 h hasta las 19:00 h. La condición a pleno sol superó el umbral de estrés severo (≥ 35 °C) y extremo (≥ 40 °C) durante 8 h y 4 h, respectivamente. Por otro lado, la posición al centro del CJ en el SSP superó el umbral severo por 4 h y la posición bajo los árboles no generó condiciones severas y extremas, superando el umbral moderado (≥ 30 °C) desde las 10:00 h hasta las 19:00 h. En comparación con los resultados de la condición a PS, se verificó una reducción de, aproximadamente, 2,5 °C y 5 °C en la sensación térmica aparente durante la mayor parte del día en el CJ y BM, respectivamente.

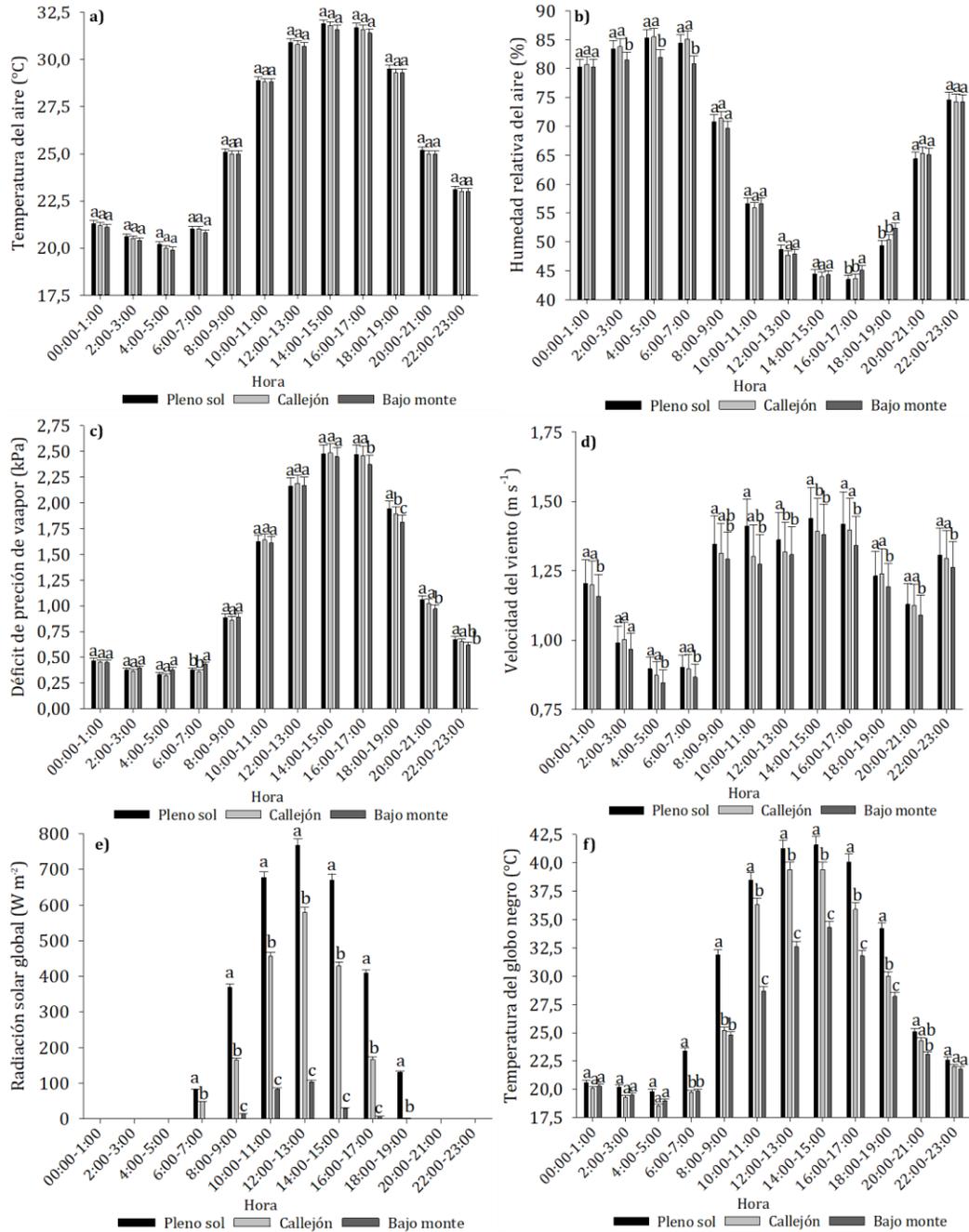


Figura 8. Promedios horarios de las variables de microclima para las olas de calor. Letras diferentes indican diferencias significativas (p -valor $< 0,05$). PS = pleno sol, CJ = callejón, BM = bajo monte.

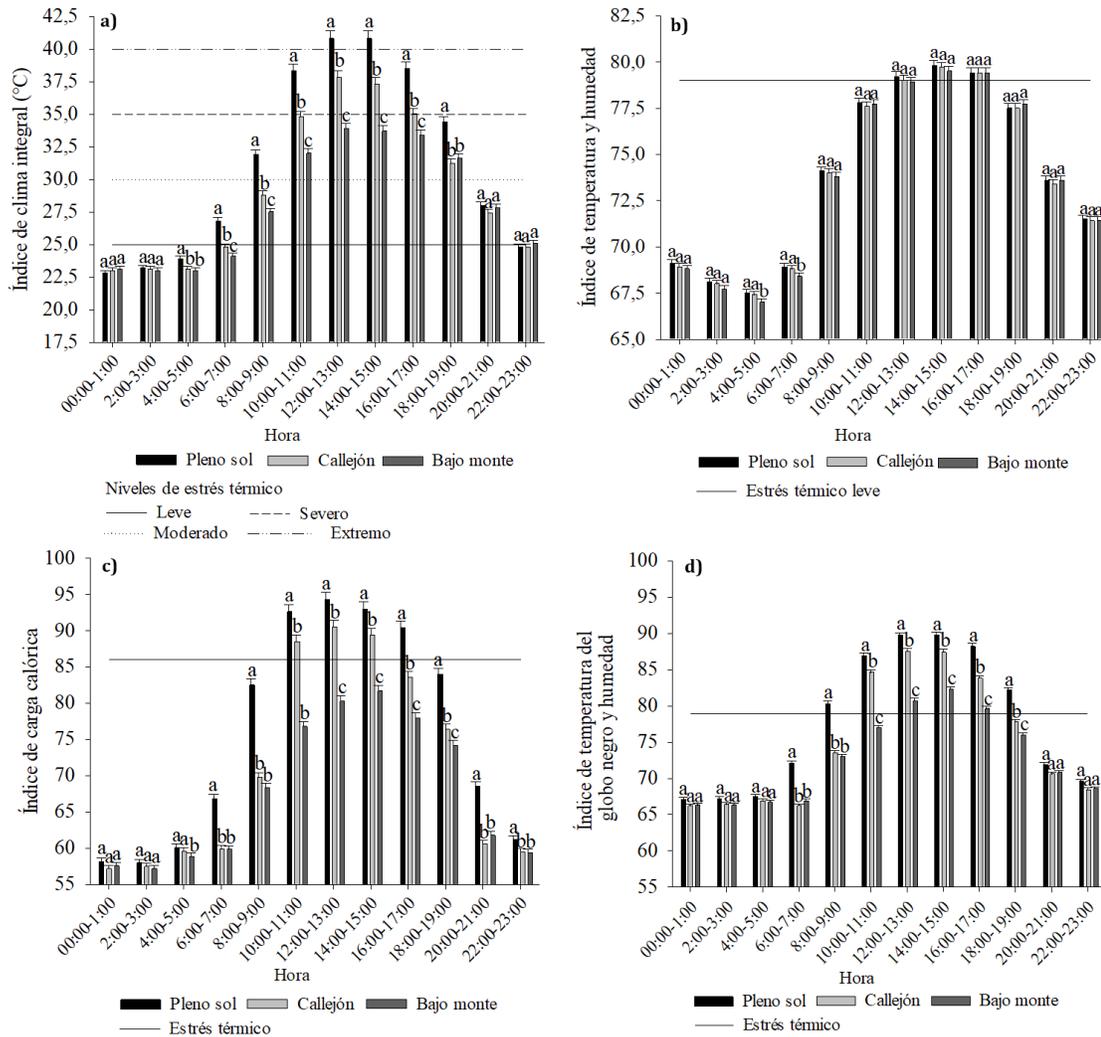


Figura 9. Valores horarios para los índices de biometeorología animal durante las olas de calor. Letras diferentes indican diferencias significativas (p -valor < 0,05).

Con respecto al ITH, en este estudio se asumió el valor de 72 como valor promedio diario crítico en la definición de las olas de calor, además del criterio para el ICI. Sin embargo, considerando las variaciones horarias, la literatura sugiere el uso del umbral 79 (Hahn et al., 2003). Los resultados obtenidos para el ITH (figura 9b) no indicaron diferencias significativas entre las posiciones evaluadas; en todos los casos, el umbral de 79 fue superado en el período desde las 12:00 h a las 17:00 h. El comportamiento del ICC (figura 9c) fue semejante a lo verificado para el ICI, con diferencias entre el SSP respecto al PS

desde las 10:00 h hasta las 19:00 h. Las posiciones de PS y CJ del SSP superaron el umbral de estrés térmico, indicado por el valor 86, lo que no fue verificado en la zona BM. El ITGH (figura 9d) presentó un comportamiento semejante al ICC, con diferencias entre las posiciones desde las 10:00 h a las 19:00 h. El umbral de estrés térmico, indicado por el valor 79 (Baêta, 1985, Baêta y Souza, 2010) fue superado en 12 h, 8 h y 6 h por las condiciones a PS, CJ y BM en el SSP, respectivamente.

3.1.1.2. Radiación fotosintéticamente activa

Los resultados de la RFA se presentan en la tabla 8, donde se observan los valores absolutos de RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y los niveles de transmisión (%) registrados a PS y en el CJ del SSP evaluado.

Tabla 8. Descripción de la incidencia y transmisión de la RFA durante el período de evaluación.

Descriptor	Primavera			Verano		
	PS	CJ		PS	CJ	
	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Transmisión (%)	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Transmisión (%)
Media	1439,82	810,11	56,26	1563,24	1013,03	64,80
Mediana	1483,52	694,29	53,30	1340,67	888,79	67,57
1.º cuartil	1260,65	214,54	15,27	1086,85	404,14	26,33
3.º cuartil	2060,01	1227,11	92,17	1864,28	1685,24	92,76
Máximo	2232,88	1974,23	98,82	2230,85	2176,88	98,71
Mínimo	705,85	48,12	5,96	693,48	43,33	5,76
Descriptor	Otoño			Invierno		
	PS	CJ		PS	CJ	
	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Transmisión (%)	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Transmisión (%)
Media	775,57	218,26	28,14	656,21	148,92	22,69
Mediana	749,84	136,13	22,81	679,48	109,15	17,39
1.º cuartil	561,71	85,68	11,67	461,33	62,05	10,65
3.º cuartil	1020,93	295,90	36,43	873,31	212,39	29,18
Máximo	1165,94	877,53	90,97	1029,69	616,31	63,48
Mínimo	339,40	40,93	5,95	201,86	13,79	4,74

RFA = radiación fotosintéticamente activa, PS = pleno sol, CJ = callejón, BM = bajo monte.

Las estaciones de primavera y verano presentaron valores de RFA incidente máxima superiores a los $2.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que, durante el otoño y el invierno, estos valores fueron cercanos a los $1.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Durante la primavera y verano, se observa que el 3.^{er} cuartil de los niveles de transmisión (%) presentó valores superiores a los 90 % de la RFA incidente. Por otro lado, en otoño e invierno, el mismo descriptor presentó transmisiones alrededor del 35 % y 30 %, respectivamente. A continuación, la figura 10 presenta los esquemas de distribución de la RFA para el arreglo silvopastoril evaluado en las diferentes estaciones del año.

A partir de los esquemas de distribución de RFA, se pudo constatar una heterogeneidad en la distribución de la RFA en el SSP, con variaciones entre las estaciones del año y entre las posiciones evaluadas. La entrada de luz en el SSP presentó una mayor similitud durante las estaciones de primavera y verano (figura 10a y b) y entre otoño e invierno (figura 10c y d). En las dos primeras estaciones mencionadas ocurrieron transmisiones de RFA superiores al 80 % en la zona al norte de los árboles en el CJ y al centro de este (posición a los 9 m). Estos altos niveles de transmisión ocurrieron entre las 09:00 h y las 14:00 h en la parte central del CJ, extendiéndose hasta las 16:00 h en la posición a los 3 m al norte de los árboles. Por otro lado, en las posiciones debajo del dosel arbóreo, así como a los 3 m hacia el sur de este, se verificaron muy bajos niveles de luz, siendo esta la zona del SSP con mayores modificaciones en la entrada de luz. Esta zona corresponde a cerca de 37 % de la superficie del SSP evaluado.

En contraste con lo verificado en las estaciones de primavera y verano, durante el otoño e invierno (figura 10c y d), prácticamente todas las posiciones del SSP presentaron bajos niveles de transmisión de luz. La mayor inclinación solar verificada durante estas estaciones del año hace que la sombra de los árboles sea proyectada por superficies más extensas que aquellas verificadas en primavera y verano. Las zonas con mayores niveles de transmisión durante el otoño y el invierno son las de la hilera de árboles al norte y a los 6 y 3 m al norte de esta, condición que ocurre entre las 9:00 h y las 12:00 h. Además, en

estas estaciones del año, se verificó un predominio de baja disponibilidad lumínica a lo largo del SSP a partir de las 15:00 h.

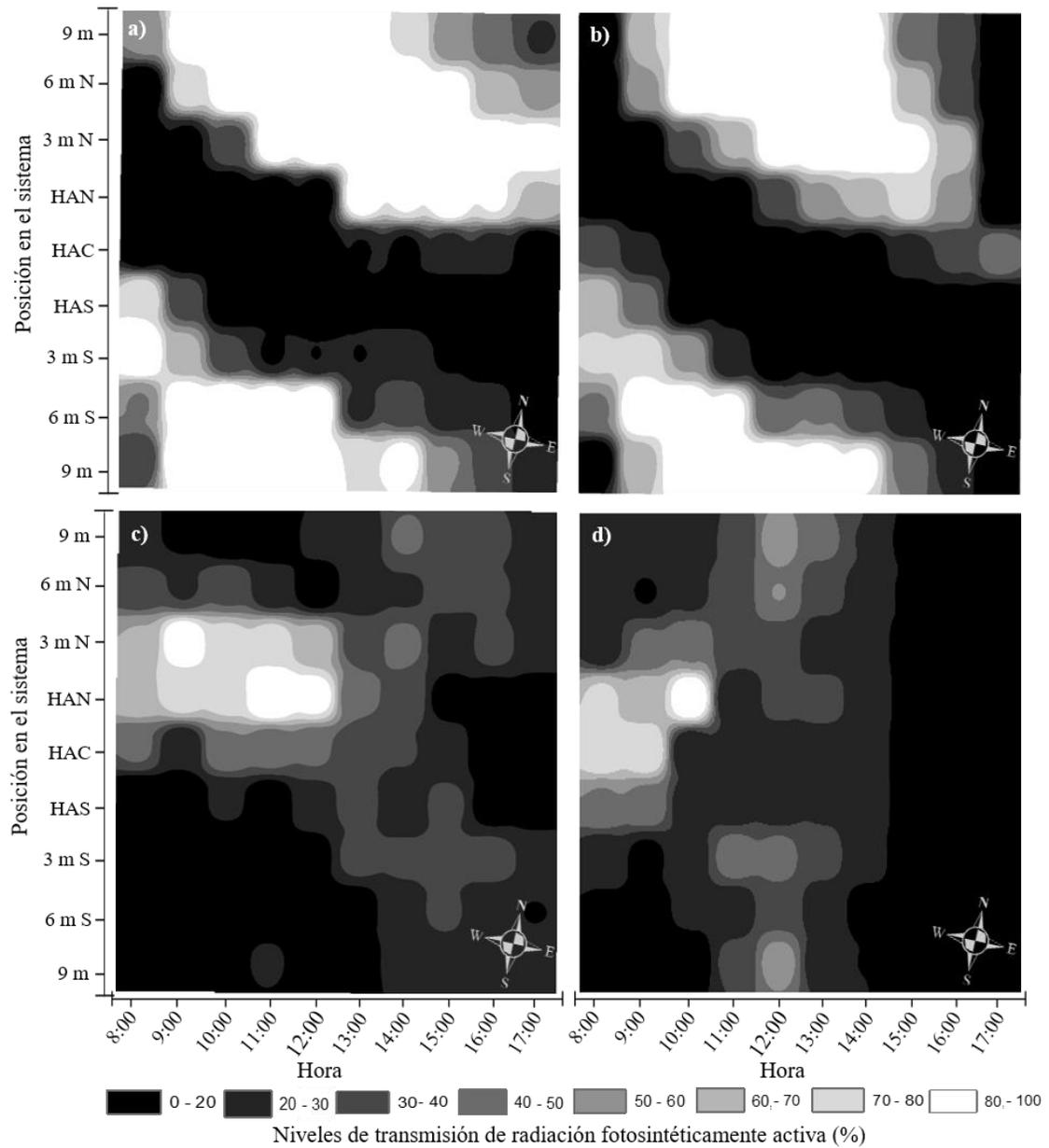


Figura 10. Distribución espacio-temporal de la RFA en el SSP. a) primavera; b) verano; c) otoño; d) invierno. 9 m = al centro del CJ; 6 m N, 3 m N = a los 6 y 3 m al norte de los árboles, respectivamente; HAN = hilera de árboles al norte; HAC = hilera de árboles central; HAS = hilera de árboles al sur; 6 m S, 3 m S = a los 6 y 3 m al sur de los árboles, respectivamente.

La figura 11 presenta el resultado del análisis estadístico, generado a partir del modelo de la ec. 12, entre las posiciones del sistema silvopastoril a cada hora del día durante la primavera.

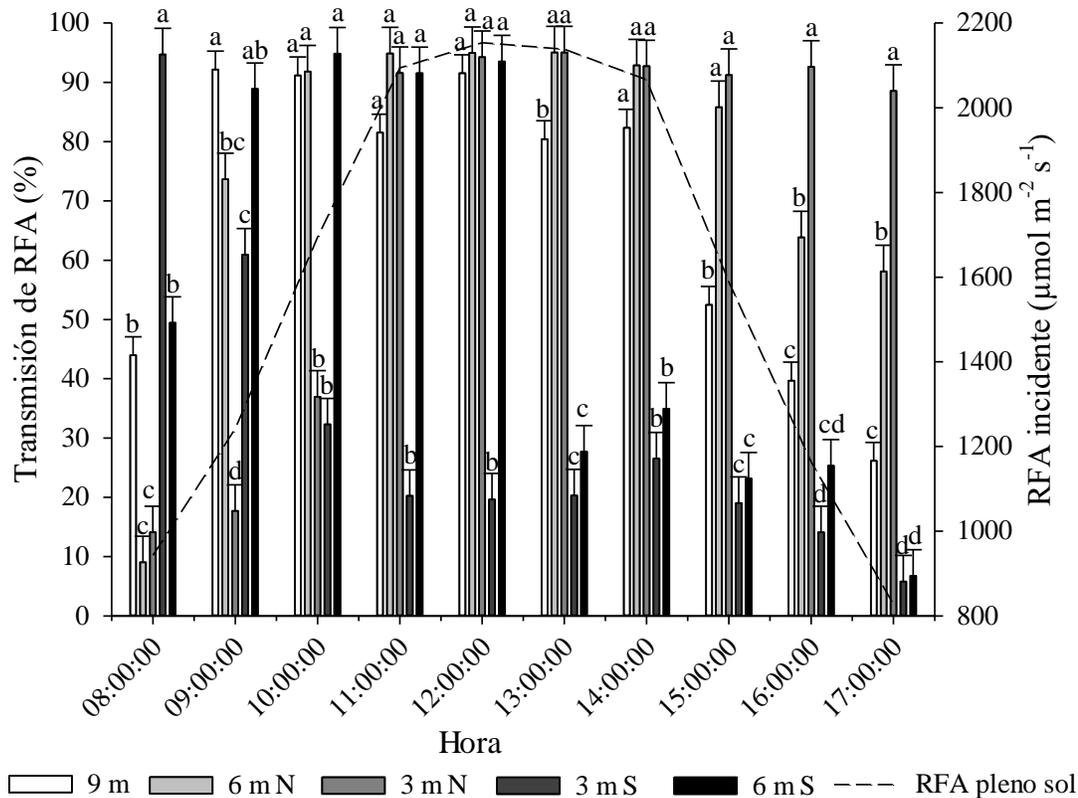


Figura 11. Niveles de transmisión de la RFA en las posiciones del SSP durante la primavera. 9 m = al centro del CJ; 6 m N, 3 m N = a los 6 y 3 m al norte de los árboles, respectivamente; 6 m S, 3 m S = a los 6 y 3 m al sur de los árboles, respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas (p-valor < 0,05).

El análisis estadístico de la distribución de la transmisión de RFA presentó diferencias entre las posiciones del callejón del SSP en todas las horas del día. En el período de mayor intensidad lumínica, entre las 11:00 h y las 14:00 h, las posiciones centro del CJ (9 m) y a los 6 y 3 m al norte de los árboles presentaron niveles de transmisión superiores al 80 %. La última posición mencionada mantuvo estos niveles hasta la última hora evaluada. Por otro lado, el área a los 3 m al sur de los árboles superó el 50 % de transmisión solo al comienzo de la mañana, cuando ocurren bajas intensidades de RFA. La posición a los 6

m al sur de los árboles presentó transmisiones elevadas (> 80 %) entre las 9:00 h y 12:00 h. Sin embargo, durante la tarde el área al sur de los árboles se mantuvo predominantemente sombreada. La figura 12, a continuación, presenta los resultados para el período del verano.

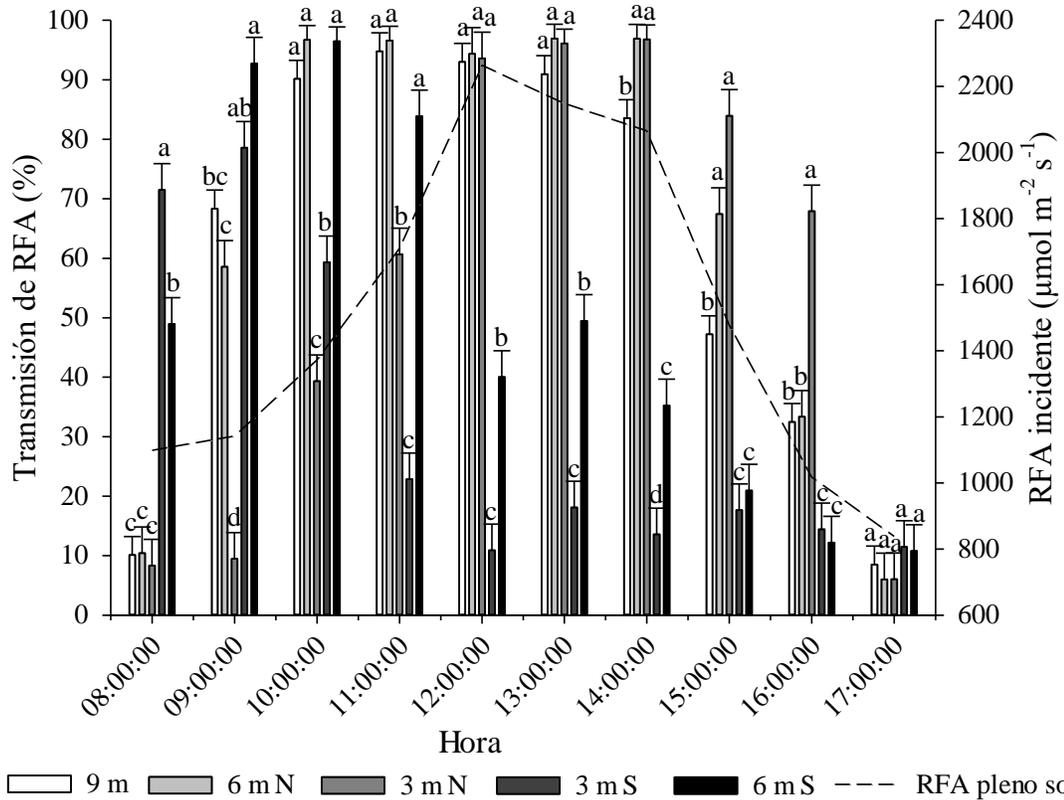


Figura 12. Niveles de transmisión de la RFA en las posiciones del SSP durante el verano. 9 m = al centro del CJ; 6 m N, 3 m N = a los 6 y 3 m al norte de los árboles, respectivamente; 6 m S, 3 m S = a los 6 y 3 m al sur de los árboles, respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas (p-valor < 0,05).

De modo semejante a lo verificado en la primavera, se obtuvieron diferencias significativas entre las posiciones del SSP durante todas las horas del día. Al centro del CJ y a los 6 m al norte de los árboles, ocurrieron mayores niveles de transmisión de luz durante las horas de mayor intensidad lumínica. En la tarde, los niveles más altos de transmisión de luz fueron verificados en la posición a los 3 m al norte de los árboles, con valores por encima del 70 % desde las 12:00 h hasta las 16:00 h. Por otro lado, las

posiciones al sur de los árboles estuvieron predominantemente sombreadas durante la tarde, aunque con niveles intermedios a altos de transmisión de luz desde las 08:00 h hasta próximo del final de la mañana. A continuación, la figura 13 presenta la comparación de los niveles de transmisión de RFA entre las posiciones para el período del otoño.

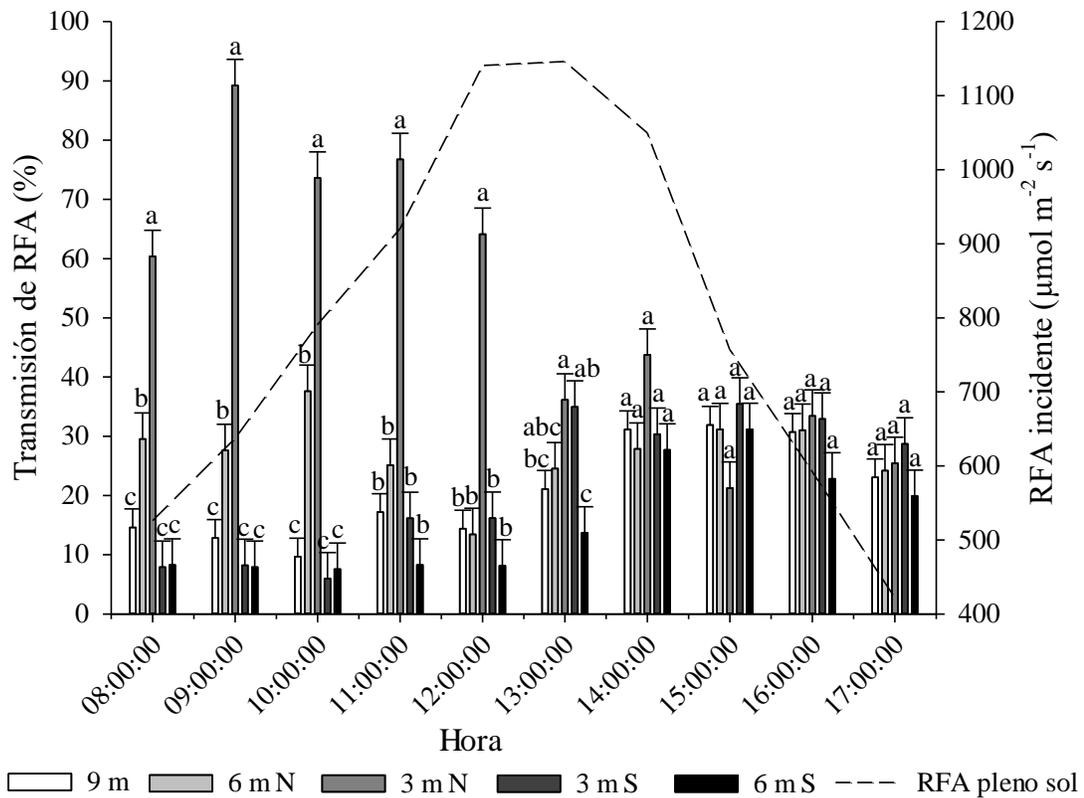


Figura 13. Niveles de transmisión de la RFA en las posiciones del SSP durante el otoño. 9 m = al centro del CJ; 6 m N, 3 m N = a los 6 y 3 m al norte de los árboles, respectivamente; 6 m S, 3 m S = a los 6 y 3 m al sur de los árboles, respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas (p -valor < 0,05).

Durante el otoño, la mayor parte del CJ presentó transmisiones variando entre 10 % y 50 % a lo largo del día, salvo a los 3 m al norte de los árboles, en donde se constataron valores de entre 60 % y 90 % desde las 08:00 h hasta las 12:00 h. Aunque las posiciones al sur de los árboles presentaron niveles de transmisión de luz predominantemente inferiores a las demás, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas en el período entre las 14:00 h y las 17:00 h. La posición a los 3 m al norte de los árboles presentó los mayores niveles de transmisión desde las 08:00 h hasta las 12:00 h. De modo general, se verificó

una mayor intercepción de la RFA por los árboles en el otoño, respecto a lo verificado para la primavera y verano. Finalmente, la figura 14 presenta los resultados obtenidos para el período del invierno.

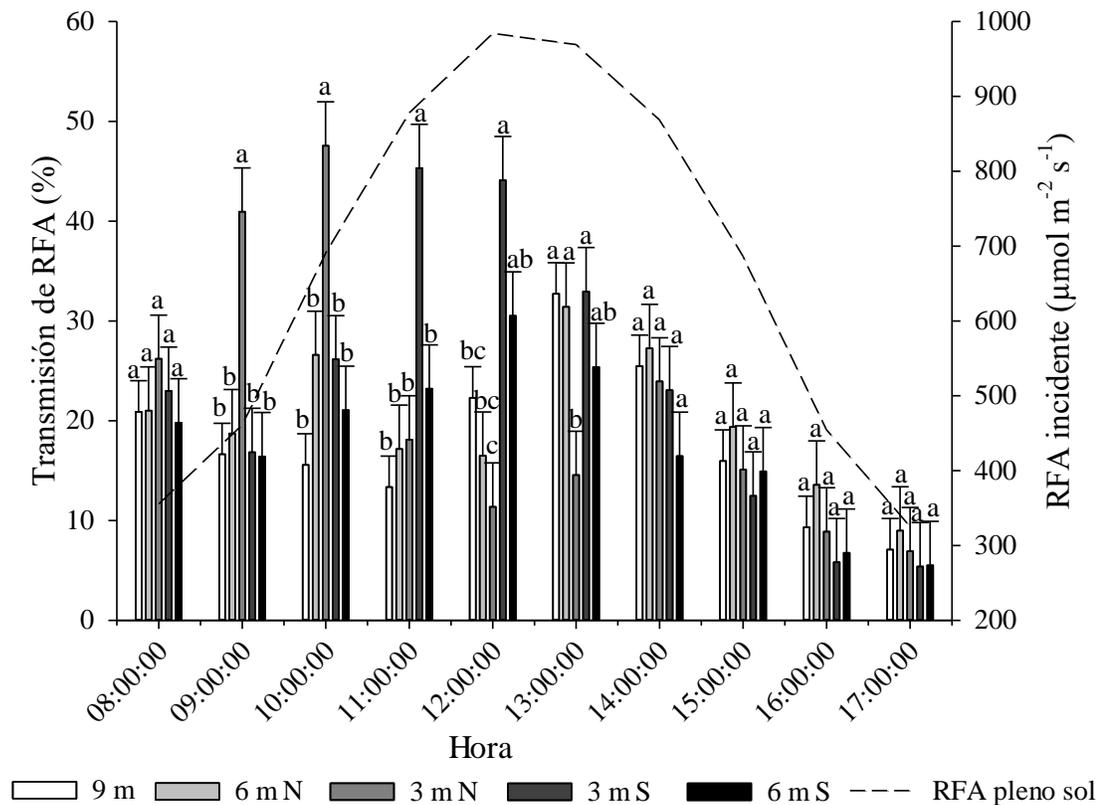


Figura 14. Niveles de transmisión de la RFA en las posiciones del SSP durante el invierno. 9 m = al centro del CJ; 6 m N, 3 m N = a los 6 y 3 m al norte de los árboles, respectivamente; 6 m S, 3 m S = a los 6 y 3 m al sur de los árboles, respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas (p -valor < 0,05).

La evaluación en invierno fue aquella en donde se verificaron los menores niveles de transmisión de luz adentro del SSP. De acuerdo con los resultados obtenidos para el período de otoño, desde las 14:00 h hasta las 17:00 h no fueron verificadas diferencias entre las posiciones evaluadas. Los mayores niveles de transmisión de la RFA estuvieron entre 40 % y 50 %, en las posiciones a los 3 m al norte de los árboles, durante las 09:00 h y 10:00 h, y a los 3 m al sur de los árboles, durante las 11:00 h y 12:00 h. Se destaca que, en invierno, los niveles de radiación incidente fueron inferiores a los de las demás

estaciones y, de esta manera, los también menores niveles de transmisión indican modificaciones importantes en la disponibilidad lumínica en el SSP.

3.1.2. Producción forrajera

Los resultados generados a partir del modelo de la ec. 13 para los datos de producción de MS forrajera se presentan en la figura 15.

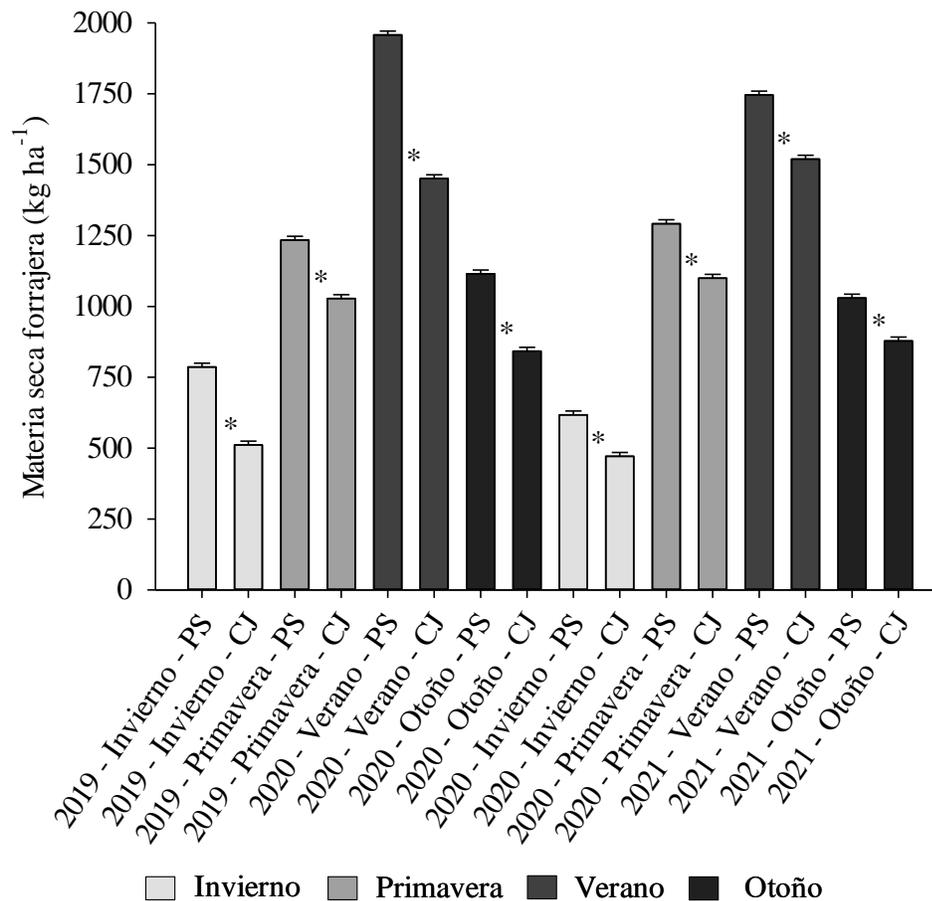


Figura 15. Producción estacional de forraje en CN a PS y en el CJ del SSP. * Indica diferencias significativas entre las posiciones en cada estación y año (p-valor < 0,05). PS = pleno sol, CJ = callejón.

Los resultados del análisis de la producción estacional de biomasa forrajera indicaron diferencias significativas entre las posiciones a PS y en el CJ del SSP en todos los períodos evaluados. La condición a PS generó mayores niveles de producción de forraje, con los valores más altos obtenidos durante los períodos de verano. Conforme a lo esperado, el

invierno fue la estación del año que presentó los menores valores de producción forrajera. La condición silvopastoril presentó una reducción promedio en la producción de forraje de, aproximadamente, 20 % con respecto a la obtenida para la condición de PS. La mayor diferencia registrada fue de 34,9 % durante el invierno de 2019 y la mínima, de 12,9% en el verano de 2021. Considerando la producción de biomasa forrajera acumulada para el año, la posición a PS generó un valor promedio de, aproximadamente, 4.890 kg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que en el CJ el valor fue de 3.900 kg ha⁻¹ año⁻¹. Los valores obtenidos para la producción forrajera se encuentran presentados en detalle en el anexo 2. En cuanto a la relación entre los niveles de RFA disponibles y la producción forrajera, la figura 16 presenta el modelo ajustado para la ec. 14.

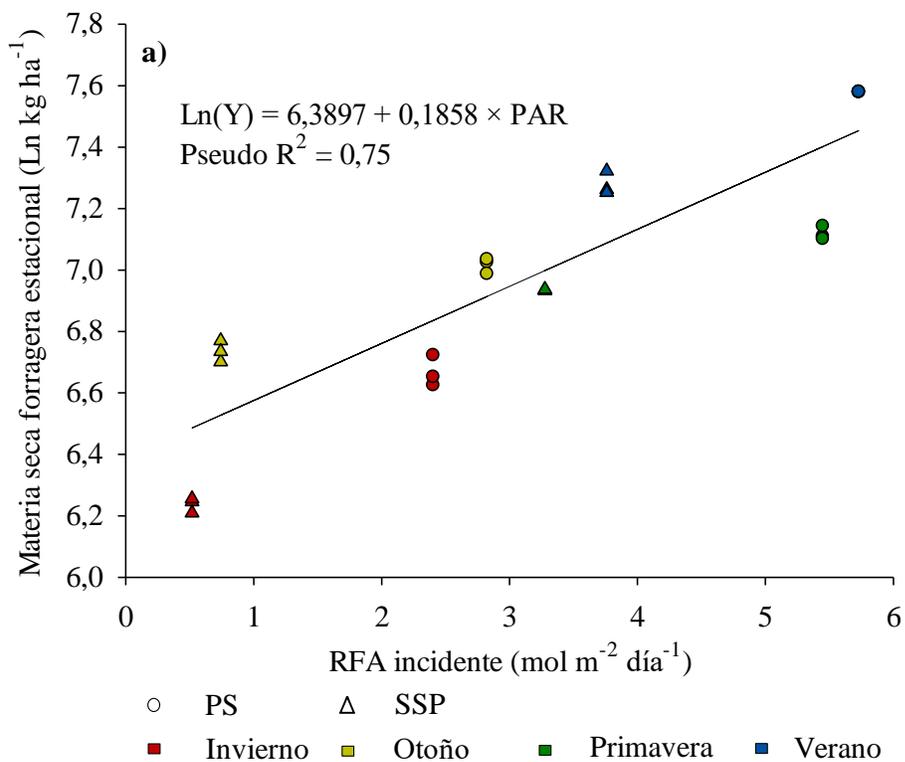


Figura 16. Relación entre la biomasa forrajera y la RFA incidente. PS = pleno sol, SSP = sistema silvopastoril.

El modelo obtenido presentó coeficientes significativos (p -valor $< 0,05$) con un valor de Pseudo $R^2 = 0,75$. El mismo puede ser entendido como un descriptor de las condiciones experimentales, debido al número de datos utilizado, los cuales son provenientes del estudio de caso. Se destaca, también, que los niveles de RFA representan la acumulación de obtenido para el período entre las 8:00 h y las 17:00 h. La reducción en la producción forrajera verificada en el CJ del SSP estuvo directamente relacionada a la disminución de los niveles de RFA. En el SSP, el aumento en la biomasa forrajera verificada entre el otoño e invierno sugiere la existencia de umbrales lumínicos sobre la productividad.

3.1.3. Almacenamiento de carbono

En este subcapítulo se presentan las estimaciones de carbono realizadas para el área de CN y del SSP. La figura 17 presenta los valores obtenidos de carbono orgánico del suelo.

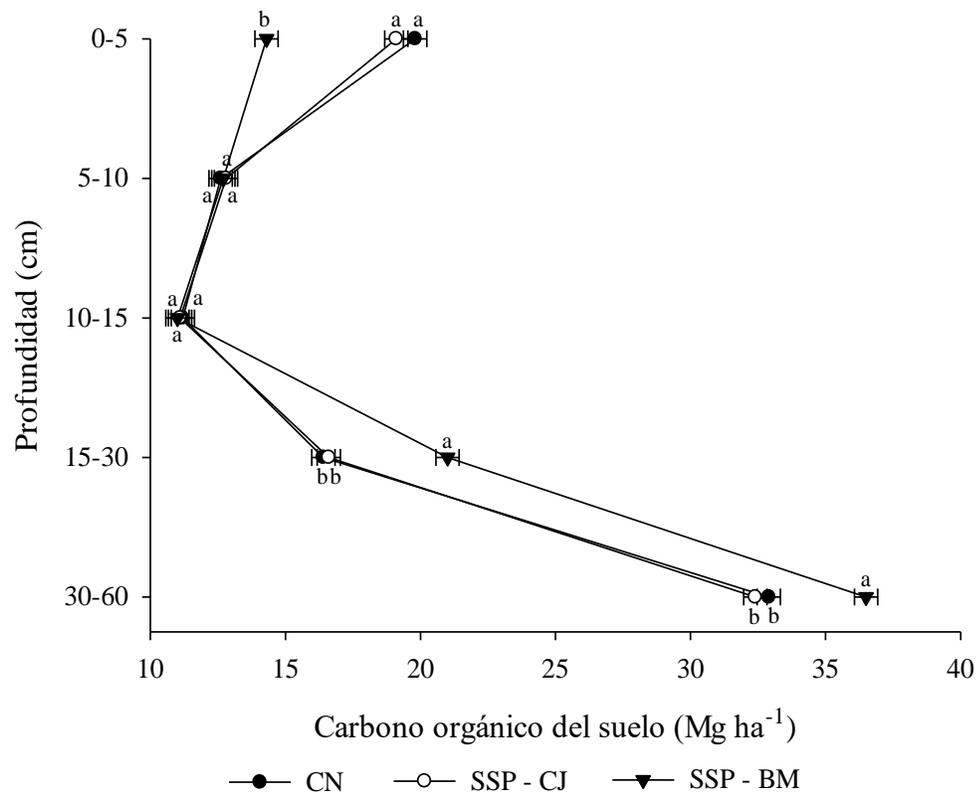


Figura 17. Carbono orgánico del suelo en las posiciones del SSP y en campo natural aledaño. Letras diferentes indican diferencias significativas (p -valor $< 0,05$). CN = campo natural, SSP-CJ = callejón, SSP-BM = bajo monte.

Los resultados indican diferencias significativas entre la posición BM respecto a la de CN y la del CJ del SSP tanto en los primeros 5 cm de suelo como a partir de los 15 cm de profundidad. En los primeros 5 cm, la posición bajo los árboles presentó una reducción significativa de, aproximadamente 26 %, en el stock de carbono respecto al CN. En los estratos de 5-10 cm y 10-15 cm de profundidad, los valores de carbono en el suelo no se diferenciaron entre las posiciones. Sin embargo, en los estratos de 15-30 cm y 30-60 cm de profundidad, los niveles de carbono del suelo en la zona BM fueron mayores en 27 % y 12 %, respectivamente, en comparación con la condición de CN. En cuanto a la totalidad del carbono almacenado, hasta la profundidad de 60 cm, los valores obtenidos fueron de 92,9, 92,0 y 95,5 Mg ha⁻¹ para las posiciones de CN, CJ y BM, respectivamente. Los datos de densidad aparente del suelo y de la concentración de carbono se encuentran presentados en el anexo 1.

El carbono almacenado en el componente forrajero fue estimado con base en los valores de biomasa previamente presentados y en las determinaciones de contenido de carbono en las muestras; los resultados se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Carbono almacenado en el componente forrajero para las condiciones de campo natural y SSP.

Variable	Condición	
	CN	CJ
Biomasa forrajera (kg ha ⁻¹)	4.890	3.900
Concentración de carbono (%)	43,82	44,14
Carbono forrajero (Mg ha ⁻¹)	2,14	1,72

CN = campo natural, CJ = callejón.

Como resultado, la condición de CN presentó, aproximadamente, 20 % más de carbono en forraje, respecto al SSP, lo que representa una diferencia de 0,42 Mg ha⁻¹. A continuación, la tabla 10 presenta los resultados del inventario forestal y de las estimaciones de biomasa y carbono fustal de los árboles en el SSP.

A partir de los resultados generados, se identifica un componente forestal con un bajo coeficiente de variación entre las parcelas (< 5 %). En promedio, se estimó un total de 17,90 Mg ha⁻¹ de carbono almacenado en el fuste de los árboles. Considerando la edad de 8 años de los árboles al momento de la evaluación, el componente forestal presentó una tasa de acumulación de carbono de 2,23 Mg ha⁻¹ año⁻¹. La figura 18 presenta el resultado obtenido para la condición de CN y del SSP, considerando los tres componentes evaluados.

Tabla 10. Resultado del inventario forestal y estimaciones de carbono fustal en el SSP.

Parcela	Diametro a la altura del pecho promedio (cm)	Altura promedio (m)	Número de árboles promedio (N ha ⁻¹)	Área basal promedio (m ² ha ⁻¹)	Volumen promedio (m ³ ha ⁻¹)	Densidad promedio de la madera (kg m ⁻³)	Biomasa fustal (Mg ha ⁻¹)	Carbono promedio (%)	Carbono fustal (Mg ha ⁻¹)
1	19,65	17,41	417	13,29	97,98	425,15	40,95	42,18	17,94
2	19,61	17,93	420	13,07	94,65	401,16	39,56	41,93	17,33
3	19,99	17,92	433	14,03	103,22	425,86	43,14	46,64	18,90
4	19,76	18,12	429	13,16	95,38	415,46	39,86	45,12	17,47
5	20,14	18,02	425	13,53	97,52	421,95	40,76	43,24	17,86
Media	19,83	17,88	425	13,42	97,75	417,92	40,85	43,82	17,90
Desvío Estándar	0,21	0,25	6	0,34	3,01	9,15	1,26	1,80	0,55
Coefficiente de variación (%)	1,06	1,40	1,41	2,53	3,08	2,19	3,08	4,11	3,07

El stock total de carbono estimado fue mayor en el SSP, respecto a la condición de PS, en CN. Este resultado está mayoritariamente explicado por la incorporación de la biomasa y carbono en el componente arbóreo. El SSP también presentó aumento en el stock de carbono en el suelo, mediante la incorporación de carbono en los estratos más profundos entre aquellos evaluados. El CN presentó mayor stock de carbono orgánico en los primeros centímetros del suelo y en el componente forrajero. El total estimado para el carbono almacenado en el SSP fue de 112,09 Mg ha⁻¹, mientras que el valor obtenido en la posición PS fue de 95,04 Mg ha⁻¹.

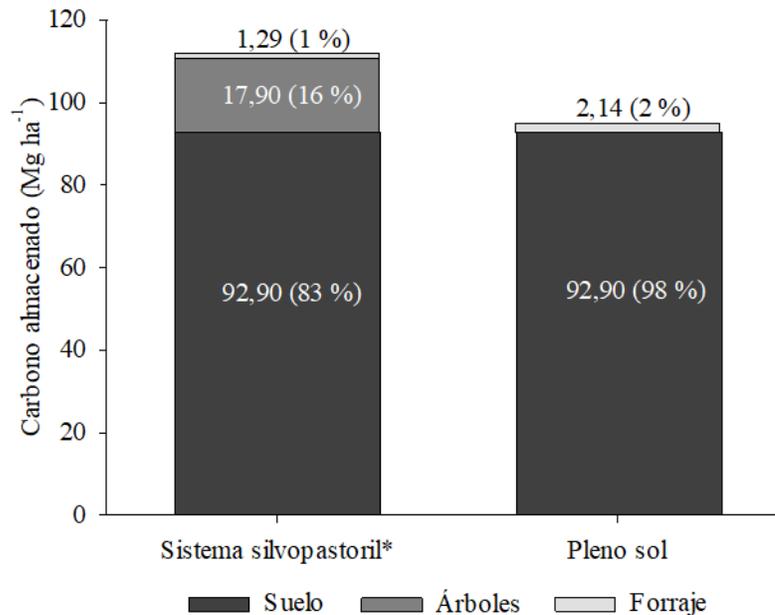


Figura 18. Stock de carbono orgánico (Mg ha⁻¹) en el sistema silvopastoril y en campo natural. *Los valores fueron ponderados con base en las proporciones de 75 % y 25 % para las zonas del CJ y BM, respectivamente.

El aumento de 17,05 Mg ha⁻¹ de carbono verificado en el SSP equivale a 62,57 Mg CO₂e ha⁻¹, lo que resulta en una acumulación anual de 7,82 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹. De acuerdo con Becoña y Wedderburn (2010), en la ganadería de cría sobre CN en Uruguay, se emiten 19,1 kg CO₂e kg de peso vivo animal⁻¹ en un sistema con carga ganadera de 1 unidad ganadera (UG)³ ha⁻¹. Esta condición resulta en una tasa anual de emisión de GEI de 7,26 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹. Asumiendo este escenario para el estudio de caso, la diferencia entre la incorporación de carbono en la biomasa del SSP y la emisión de GEI por los animales resulta en un balance positivo, con absorción de + 0,56 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹.

3.2. Preferencias ambientales-productivas

Con base en las encuestas realizadas, se presentan los resultados de las preferencias de los productores por los escenarios ambientales-productivos, así como los niveles de

³UG: unidad ganadera; representa los requerimientos de alimento para mantener una vaca de cría de 380 kg de peso vivo.

compensación entre los SA y la disposición a adoptar SSP. La tabla 11 presenta una descripción de los sistemas de producción desarrollados en los predios de los 27 encuestados. Los individuos presentaron una edad promedio de 56 años, con un máximo y un mínimo de 72 y 35 años, respectivamente. El 48 % de los participantes poseía formación terciaria y el 26 %, nivel técnico. De los encuestados, 72 % fueron del sexo masculino y 28 %, del femenino, y 17 (63 %) de ellos poseían la producción agropecuaria como principal fuente de renta familiar.

Tabla 11. Descripción de las características prediales observadas de los individuos encuestados.

Descriptor	Superficie (ha)	CNSM (%)	CNCM (%)	RFI			FC (%)	CT (%)	SSP (%)	% del rodeo en cada sistema ganadero				CGA (UG ha ⁻¹)
				PC (%)	FI (%)	FE (%)				GCC (%)	GC (%)	GRC (%)	GI (%)	
Media	778,40	58,00	22,00	8,72	6,30	1,30	1,30	1,00	3,20	20,37	41,30	21,67	11,67	0,94
Mediana	600,00	75,00	10,00	7,50	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	15,00	0,00	0,95
1.º cuartil	191,50	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
3.º cuartil	1372,00	85,00	41,25	10,00	8,25	2,00	0,00	2,00	0,70	25,00	72,50	27,50	20,00	1,03
Máximo	2048,00	95,00	80,00	35,00	17,50	7,50	20,00	4,00	40,00	100,00	100,00	80,00	100,00	1,40
Mínimo	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50

CNSM: campo natural sin mejoramiento; CNCM: campo natural con mejoramiento; RFI: recurso forrajero implantado; PC: praderas convencionales; FI: forrajeras invernales; FE: forrajeras estivales; FC: forestación convencional; CT: cortinas; SSP: sistema silvopastoril; GCC: ganadería de ciclo completo; GC: ganadería de cría; GRC: ganadería de recría; GI: ganadería de invernada; CGA: carga ganadera promedio anual.

El área de los establecimientos agropecuarios varió entre 7 ha y 2048 ha, de los cuales el 40 % dispone de superficies inferiores a las 500 ha. En total, la suma del área predial para los 27 encuestados resultó en, aproximadamente, 21.000 ha. Entre las formas de uso y cobertura de los suelos, la más común es la del CN, con y sin la incorporación de mejoramientos, ocupando, en promedio, 60 % y 20 % de los predios, respectivamente. El uso de recursos forrajeros implantados (RFI), como verdeos y praderas convencionales, estuvo presente en 20 (74 %) de los casos, variando, mayoritariamente, entre 5 % y 25 %

del área total predial. En cuanto a los sistemas de producción ganadera, la mayoría de los encuestados poseía una combinación de modalidades de productivas, con sistemas de ciclo completo, cría, recría, invernada y ovinos, presentes en 9 (33 %), 17 (63 %), 15 (56 %), 10 (37 %) y 9 (33%) establecimientos, respectivamente. En los predios con cría ganadera, cerca del 70 % de los animales del rodeo pertenecían a esta modalidad, mientras que en aquellos donde se realizaban recría ganadera, este sistema abarcaba, aproximadamente, el 40 % del rodeo, siendo estas dos las modalidades de producción ganadera más comunes. El promedio de carga ganadera anual manejada en los predios fue de 0,94 UG ha⁻¹, con valores mínimos y máximos de 0,5 y 1,4 UG ha⁻¹. Entre los predios con menor productividad ganadera, los entrevistados indicaron limitaciones debido a condiciones de suelo, con áreas del predio con predominio de suelos superficiales y puntos de afloramientos rocosos. Las cargas ganaderas más altas estuvieron relacionadas con el uso de zonas del predio con pasturas implantadas y, en algunos casos, con suplementación nutricional para los animales.

Se destaca que 13 (48 %) de los predios presentaban alguna superficie de sus propiedades dedicadas a la modalidad de producción silvopastoril, en su mayoría ocupando superficies inferiores al 5 % del área total. En todos los SSP, la cobertura forrajera correspondió al CN, en su mayoría sin mejoramientos. La producción forestal, en forma convencional, estuvo presente en 5 (18 %) de los predios de los encuestados, alcanzando una proporción máxima de 20 % de la superficie predial. El uso de cortinas de abrigo y sombra para los animales fue mencionado por 12 (44 %) de los productores y la cobertura de estas áreas en los predios varió entre 1 % y 4 %.

3.2.1. Compensaciones entre SA

Esta sección contiene los principales resultados obtenidos para el experimento de ED, en el cual se obtuvieron un total de 162 respuestas, 6 para cada uno de los 27 encuestados. De este total, 110 (68 %) indicaron la selección de alguno de los escenarios silvopastoriles y 52 (32 %), el escenario de ganadería sobre CN. Los coeficientes estimados para el modelo Logit se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Coeficientes estimados para el modelo Logit con datos del experimento de elección discreta.

Efectos	Niveles	Coeficiente estimado	E. E.	p-valor	
Constante		-1,5173	0,7027	0,0308	**
Ambiente térmico durante olas de calor	Leve	3,4192	0,8191	< 0,0001	***
	Moderado	2,9147	0,7600	0,0001	***
Aumento en el carbono almacenado	Nulo	-0,0581	0,4281	0,8921	
	Bajo	0,1397	0,4213	0,7402	
	Medio	0,6725	0,4379	0,1246	
	Alto	0,7921	0,5134	0,1228	
Reducción en la carga ganadera anual (%)	10	-0,6884	0,5737	0,2301	
	20	-0,5757	0,5742	0,3160	
	30	-3,0769	0,6943	< 0,0001	***
	40	-4,8585	0,7273	< 0,0001	***
	50	-7,9296	1,2082	< 0,0001	***

E. E. = error estándar. *** Significativo al 1 %; ** significativo al 5 %; * significativo al 10 %.

El SA de reducción de la condición térmica de niveles severos a moderados o leves durante las olas de calor presentó un efecto positivo sobre las preferencias de los productores. Los dos niveles del mencionado servicio generaron coeficientes positivos y significativos, representando una alta importancia y utilidad asignada por los productores al servicio de regulación térmica. En el sentido opuesto, la reducción en la carga ganadera resultó en una utilidad negativa para los productores, que dejaron de optar por un modelo de producción silvopastoril al observar reducciones mayores al 20 % en este indicador de productividad ganadera. A diferencia de los dos SA mencionados, el aumento del carbono en el sistema productivo no fue un efecto priorizado en las respuestas de los productores,

sin influencia sobre sus preferencias, indicando una menor utilidad asigna a este SA, respecto a los demás incluidos en el experimento de ED.

3.2.2. Disposición a adoptar SSP

Como resultado general del experimento de VC, de los 27 productores, 19 (70 %) respondieron positivamente a la disposición a participar del programa hipotético e incorporación de SSP y otros 8 (30 %) respondieron negativamente. De los productores dispuestos a participar en el programa de incentivo al uso de SSP, 8 (42 %) ya poseían un SSP implantado y apenas 6 (22 %) indicaron poseer disposición a incorporar un SSP sin la participación en un programa de incentivo. La tabla 13 presenta los coeficientes obtenidos para el modelo de la ec. 25.

Tabla 13. Coeficientes estimados de la disposición a adoptar SSP a partir del programa de incentivo.

	Efectos	Coeficiente estimado	E. E.	p-valor
	Constante	7,2037	6,12	0,2390
Edad	Edad	-0,0108	0,56	0,9850
NI	Nivel de instrucción	0,1429	0,72	0,8420
IPA	% de los ingresos provenientes de la producción agropecuaria	-0,3050	0,61	0,6170
ÁreaC	Área	0,0009	0,01	0,4940
GC	Ganadería de cría	0,0532	0,06	0,3560
GRC	Ganadería de recría	-0,1074	0,09	0,2130
RFI	Recurso forrajero implantado	-0,0158	0,04	0,6580

E. E. = error estándar.

Considerando el número de productores encuestados y sus características socio-económicas y prediales-productivas, no se obtuvieron características que indicaran

significativamente una disposición positiva a participar del programa planteado de incentivo a la producción silvopastoril. La tabla 14 presenta los resultados del análisis para el área indicada por los individuos con interés en participar del referido programa.

Tabla 14. Coeficientes estimados para el área de interés en incorporar o expandir los SSP.

	Efectos	Coefficiente estimado	E. E.	p-valor	
	Constante	4,0640	2,8486	0,1537	
Edad	Edad	0,3854	0,2344	0,1002	
NI	Nivel de instrucción	0,0334	0,1227	0,7855	
Área	Área	0,0026	0,0004	< 0,0001	***
IPA	% de los ingresos provenientes de la producción agropecuaria	0,0124	0,0107	0,2494	
CNSM	Campo natural sin mejoramiento	-0,0277	0,0281	0,1596	
CNCM	Campo natural con mejoramiento	-0,0109	0,0260	0,6748	
RFI	Recurso forrajero implantado	-0,2193	0,0364	< 0,0001	***
FC	Forestación convencional	-0,1323	0,0666	0,0469	**
CT	Cortinas de abrigo y sombra	-0,5854	0,3214	0,0686	*
SSP	Sistema silvopastoril	-0,0068	0,0055	0,2170	
GCC	Ganadería de ciclo completo	0,0079	0,0123	0,5187	
GC	Ganadería de cría	0,0337	0,0099	0,0006	***
GRC	Ganadería de recría	-0,0216	0,0131	0,0981	*
GI	Ganadería de invernada	0,0159	0,0234	0,4983	

E. E. = Error estándar. *** Significativo al 1 %; ** significativo al 5 %; * significativo al 10 %.

De los 19 individuos que manifestaron disposición a la incorporación del SSP, el promedio de superficie declarada fue de, aproximadamente, 64 ha \pm 21 ha, con valores máximos y mínimos de 125 ha y 3 ha, respectivamente. En el análisis, se verificó un efecto positivo significativo para el aumento del área predial y de la proporción del rodeo dedicada a la cría ganadera. Por otro lado, las variables área de RFI, área de forestación convencional,

áreas de cortinas y la proporción del rodeo dedicado a la recría ganadera presentaron coeficientes negativos. Esto indica que, a medida que se aumenta la proporción de estas características prediales y productivas, ocurrió una reducción en el área de interés a ser destinada a los SSP.

4. DISCUSIÓN

Este capítulo contiene una profundización en la interpretación y discusión de la información presentada como resultados de esta tesis. Las condiciones biofísicas en la evaluación ambiental, en conjunto con el número de encuestas, y el método de muestreo para obtener la población para la etapa de encuestas a los productores, definen la amplitud de esta investigación, la cual se caracteriza como un estudio de caso.

Evaluación biofísica

Microclima

Las evaluaciones de microclima fueron establecidas con el objetivo de caracterizar y comparar las condiciones de PS y del SSP. De esta manera se comprobó la hipótesis de regulación térmica en el SSP, con reducción en los indicadores de biometeorología animal.

En el primer nivel de análisis, para los datos de todo el período de evaluación, fueron verificadas reducciones significativas de la V y de la TGN en el SSP. A su vez, la TA y HR no fueron claramente influenciadas por las posiciones en el SSP. En comparación con la condición de PS, las posiciones del CJ y BM redujeron el promedio diario de la V en $0,51 \text{ m s}^{-1}$ y $0,61 \text{ m s}^{-1}$, y la TGN en $0,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1,45 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. En un estudio semejante, Bosi et al. (2020) evaluaron el efecto de SSP sobre el microclima y no verificaron diferencias entre posiciones en el SSP y a PS para los promedios estacionales de la TA y HR, aunque hayan verificado una reducción de cerca de 50 % en la V en el SSP. De modo similar, Oliveira et al. (2018) y Neto et al. (2022) verificaron reducciones en la V de entre 20 % y 5 0% en SSP respecto al PS. En esta tesis, el SSP generó una reducción en el promedio diario de la V de alrededor del 30 %, siendo que la magnitud de esta reducción puede variar de acuerdo al ancho, altura y permeabilidad de la barrera de árboles (Zhu, 2008).

Para el segundo nivel de análisis, considerando los promedios diarios para los períodos de olas de calor, fueron registrados 87 días distribuidos en 11 olas de calor, cada una con, aproximadamente, $8 \text{ días} \pm 2 \text{ días}$. Los promedios para la TA, HR, V y TGN fueron de

25,8 °C, 67 %, 1,48 m s⁻¹ y 30,5 °C, respectivamente. En evaluaciones agrometeorológicas, Saravia et al. (2011) reportaron, para el departamento de Salto, 33 días de olas de calor (10 días en condiciones severas y 23 en leves), representando 57 % del período experimental de 58 días en verano, con promedios de TA y HR de 27,8 °C y 58,5 %, respectivamente. De modo semejante, Taborda et al. (2018) verificó, en el departamento de Paysandú, un total de 68 días (78 %) de olas de calor leve durante el verano, con TA y HR alrededor de los 26 °C y 72 %, y Fedrigo et al. (2019) reportaron, en el departamento de Cerro Largo, 17 días (20 %) de olas de calor en un período experimental de 87 días.

Las comparaciones entre las posiciones del SSP y de PS generadas con el segundo nivel de análisis (tabla 7) corroboran los resultados del primer nivel: los promedios diarios de la TA, HR y DPV no fueron influenciados por el SSP. Asimismo, los promedios diarios máximo y mínimo para la TA y HR fueron reducidos por el SSP en el área BM. A su vez, la TGN y la RS fueron disminuidas en ambas posiciones del SSP respecto a la condición de PS. En el caso de la V, no fueron verificadas diferencias entre las posiciones en SSP durante las olas de calor, lo que puede estar asociado a la menor incidencia de vientos en este período, la cual fue 16 % inferior a lo verificado para todo el período de evaluación.

El segundo nivel de análisis permitió identificar la influencia del SSP sobre los índices de biometeorología animal evaluados (figura 7). En relación con la condición de PS, el ICI en las posiciones BM y CJ presentó reducciones de 3,1 °C y 2 °C en el promedio diario y de 7,4 °C y 3,5 °C en los promedios de las máximas diarias, respectivamente. Los indicadores ICC e ITGH presentaron comportamientos semejantes, con reducciones significativas en las posiciones del SSP, respecto al PS. El promedio diario del ICC fue reducido en 7 y 10,2 unidades del indicador en las posiciones del CJ y BM, en cuanto que, en el promedio de las máximas diarias, las reducciones fueron de 3,9 y 13,7, respectivamente. Además, las máximas diarias del ICC en la condición BM no superaron el umbral de estrés térmico indicado por el valor 86 (Gaughan et al., 2008). En el caso del ITGH, las posiciones del CJ y BM generaron reducciones de 3,4 y 5,6 unidades del

indicador en el promedio diario y 2 y 8,5 unidades en el promedio de las máximas diarias. La reducción verificada para las máximas diarias en los valores máximos registrados para el ICC e ITGH en la posición BM indica una regulación térmica de las condiciones extremas, así como sugiere la existencia de importantes variaciones horarias a lo largo del día. En contraste con los demás indicadores de biometeorología animal considerados, el ITH no presentó diferencias entre las posiciones, sugiriendo la necesidad de incorporar los efectos de las pérdidas y ganancias de calor por convección y radiación en los estudios de confort térmico animal en SSP. El valor de ITH promedio diario fue de 74,01, 73,87 y 73,77 para las posiciones de PS, CJ y BM. Para este indicador, Saravia et al. (2011) reportaron valores promedio de 77,2 y 73,7 para olas de calor severa y leve, respectivamente, en condiciones de PS, y Huertas et al. (2021) obtuvieron un ITH promedio de 72,5 para el período de verano.

A partir del tercer nivel de análisis, considerando las variaciones horarias para los períodos de olas de calor, los resultados indicaron diferencias significativas en la V, RS y TGN (figura 8). Por otro lado, no fueron constatadas modificaciones en la TA, HR y DPV en el SSP. En relación con los indicadores de biometeorología animal, el SSP generó reducciones en 3 de los 4 indicadores calculados. El ICI (figura 9a) entre las 6:00 h y las 19:00 h presentó una reducción de, aproximadamente, 5 °C y 3 °C en las posiciones BM y CJ, respectivamente, en comparación con la condición de PS. Esta última generó condiciones de, aproximadamente, 4 h en cada uno de los umbrales de térmico extremo (> 40 °C), severo (35-40 °C) y moderado (30-35 °C), lo que fue modificado para 8 h en nivel moderado y 2 h en nivel leve (25-30 °C) en la condición BM, y para 4 h, 6 h y 2 h en nivel severo, moderado y leve, respectivamente, en el CJ. En el caso del ICC, fueron constatadas reducciones significativas en las posiciones del SSP. Con base en el umbral de estrés térmico de 86 (Gaughan et al., 2008), la condición BM no superó este umbral, mientras que en las posiciones a PS y CJ esto ocurrió por 8 h y 6 h por día, respectivamente.

A su vez, el ITGH presentó diferencias significativas entre las posiciones del SSP y la de PS desde las 6:00 h hasta las 19:00 h, con reducciones promedio de 5 unidades en la escala del ITGH en la posición BM. De acuerdo al umbral de estrés térmico de 79 (Baêta, 1985, Baêta y Souza, 2010), este fue superado en 12 h, 8 h y 6 h en las posiciones a PS, CJ y BM, respectivamente. En estudios similares, Pezzopane et al. (2017) verificaron valores de ITGH que superaron el umbral de 79 durante, aproximadamente, 7 h, 6 h y 4 h para posiciones de PS, CJ y BM, así como Oliveira et al. (2018) reportaron 8 h y 6 h por encima del referido umbral para condiciones de PS y en SSP durante el verano, respectivamente. Además, Neto et al. (2022) evaluaron el microclima en tres SSP y verificaron reducciones del ITGH durante el verano entre las 10:00 h hasta las 14:00 h en los SSP, respecto al PS, con una reducción promedio de 5 unidades en la escala de este indicador. Contrastando con lo verificado para los indicadores descriptos, los resultados obtenidos a partir del ITH no han presentado diferencias entre las posiciones considerando sus variaciones horarias.

Con respecto a las respuestas de los animales a las condiciones de exceso de calor, Taborda et al. (2018) evaluaron las respuestas fisiológicas de animales adultos Hereford expuestos a los niveles severo, moderado, leve y termoneutro del ICI. Las autoras obtuvieron valores de 70,7, 68,1, 49,5 y 38,6 respiraciones por minuto y 39,1 °C, 38,9 °C, 38,6 °C y 38,6 °C de temperatura rectal, respectivamente, indicando respuestas fisiológicas al estrés térmico marcadas a partir del nivel moderado del ICI. Considerando el ITGH, Li et al. (2009) verificaron relaciones lineales entre el aumento de este indicador y la temperatura de la piel y la tasa respiratoria en animales de diferentes razas incluyendo Angus blanco, colorado y negro. En otro estudio, Valente et al. (2015) verificaron alteraciones sobre la frecuencia respiratoria y cardíaca, la temperatura de la piel y de los ojos y la ingesta diaria de MS con la exposición de animales adultos de Angus a condiciones de estrés térmico leve (ITH entre 72,6 y 76,4) y severo (ITH entre 76,4 y 81,5). De modo similar, Brown-Brandl et al. (2005) evidenciaron, en ganado mestizo (¼ Angus, ¼ Hereford, ¼ Pinzgauer, ¼ Red Poll), el efecto de la sombra en la reducción de la frecuencia respiratoria y la temperatura corporal para condiciones de ITH mayores a

78, y mayor ingesta diaria de alimento en condiciones de ITH superior a 84. Además de las referencias mencionadas, el uso de sombra y abrigo para la reducción del estado de estrés térmico del ganado vacuno, en especial de razas británicas, fue constatado en otras investigaciones, como las de Eigenberg et al. (2005), Gaughan et al. (2008), Brown-Brandl y Jones (2016) y Lees et al. (2018).

Las modificaciones en el microclima verificadas en esta investigación se vinculan a las respuestas al estrés térmico descritas en la literatura, sugiriendo la generación del servicio de confort y mejora en el bienestar animal en el SSP evaluado. En este sentido, se destaca que el sitio del estudio se encuentra en una zona de clima templado, en donde la regulación térmica en el SSP, con mayores niveles de confort térmico animal, ocurrió predominantemente durante olas de calor.

Radiación fotosintéticamente activa

La disponibilidad de la RFA es una variable ambiental de gran influencia sobre la productividad primaria neta, siendo ampliamente reportada en la literatura científica en la predicción de la producción de biomasa forrajera (Pallarés et al., 2005, Piñeiro et al., 2006, Irisarri et al., 2014). La determinación de los patrones de distribución de RFA en SSP permite diseñar sistemas y manejos con el objetivo de minimizar el impacto de la sombra sobre la productividad forrajera y ganadera.

En cuanto a los resultados obtenidos para la distribución de RFA en el SSP (figura 10), se verificaron diferencias entre las posiciones en todas las estaciones del año. Los mayores niveles de transmisión de RFA en el SSP ocurrieron durante la primavera y el verano, especialmente en las posiciones en el área del CJ al norte de los árboles y en su parte central (figura 10a y b). Estas posiciones presentaron transmisiones de RFA superiores al 80 % entre las 10:00 h y las 14:00 h. En el área del CJ al sur de los árboles, en la posición 3 m, se verificaron valores generalmente inferiores al 50 %, mientras que a los 6 m la transmisión de la RFA superó al 80 % entre las 9:00 h y las 12:00 h.

En los períodos de otoño e invierno, el pasaje de luz en el SSP presentó modificaciones definidas, con predominio de niveles intermedios a bajos (< 50 %) en la mayor parte del sistema a lo largo del día. En otoño, apenas la fila norte de árboles y su área cercana en el CJ fueron las posiciones que presentaron niveles de transmisión de RFA superiores al 70 %, lo que ocurrió entre las 9:00 h y 12:00 h (figura 10c). En invierno, las modificaciones fueron todavía más pronunciadas y prácticamente no hubo transmisión de luz directa en el SSP, salvo para las dos posiciones anteriormente mencionadas entre las 8:00 h y las 10:00 h (figura 10d). Conforme a lo esperado, la zona BM se presentó predominantemente sombreada en todas las estaciones del año. Las variaciones en la distribución de la RFA entre las posiciones y estaciones del año se deben a factores como la altura de los árboles, lo que fue alrededor de los 18 m; la densidad arbórea, de 425 árb. ha⁻¹; el área foliar y ángulo de elevación solar de cada momento de evaluación (Silva y Maya, 2013, Pezzopane et al., 2021).

En evaluaciones de transmisión de RFA en SSP, Pezzopane et al. (2019) verificaron bajos niveles de transmisión de RFA durante otoño e invierno. El SSP fue formado por individuos de *E. grandis*, con 20 a 25 m de altura, dispuestos en filas simple en orientación este-oeste y densidad de 333 árb. ha⁻¹. Durante la primavera y el verano, los niveles de transmisión de RFA en el CJ fueron altos (> 80 %) durante la mayor parte del día, aunque la zona al norte de los árboles mantuvo dichos niveles por más horas respecto al área sur del CJ. En un estudio semejante, Oliveira et al. (2018) evaluaron dos SSP establecidos con individuos de *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* x *Eucalyptus urophylla*), establecidos en filas simples con callejones de 14 y 22 m, con orientación este-oeste, lo que resultó en densidades de 357 y 227 árb. ha⁻¹. Los autores reportaron niveles intermedios y bajos de transmisión de RFA durante otoño e invierno en los sistemas de mayor y menor densidad arbórea, respectivamente. Por otro lado, ambos sistemas presentaron altos niveles de transmisión con distribuciones similares durante primavera y verano.

En esta tesis, los valores obtenidos de transmisión de la RFA en el SSP fueron de 43 %, 56 %, 65 %, 28 % y 23 % para el promedio anual, primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente, resultados compatibles con aquellos reportados en la literatura. En este sentido, Oliveira et al. (2018) obtuvieron valores de 55 %, 68 %, 70 %, 43 % y 28 % de transmisión de RFA en SSP para el promedio anual, primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente. De modo semejante, Bosi et al. (2020) obtuvieron promedios de transmisión de RFA, entre diferentes SSP, de 45 %, 56 %, 52 %, 32 % y 40 % para el promedio anual, primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente. En el acumulado de 6 años de evaluación de RFA en SSP, Pezzopane et al. (2021) verificaron promedios anuales de transmisión de RFA variando entre 67 % y 41 % de acuerdo con el crecimiento obtenido por el componente forestal y por la densidad arbórea.

Producción forrajera

La producción estacional de biomasa forrajera en el SSP fue evaluada en la zona del CJ y comparada con la condición de CN. Los resultados presentaron diferencias significativas (p -valor $< 0,05$) en todas las estaciones del año. En promedio, se verificó una reducción de $20 \% \pm 7 \%$ en la MS de forraje, la cual llegó al valor máximo de 35 % en el invierno de 2019 y al mínimo de 13 % en el verano de 2021. La condición de CN a PS presentó promedios de MS forrajera de 1.263, 1.852 y 1.073, 702 kg ha⁻¹ en las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente. El promedio anual en esta condición fue de 4.890 kg ha⁻¹. Por otro lado, el callejón del SSP evaluado presentó valores de 1.064, 1.486, 860, 491 kg ha⁻¹ en las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente. El promedio anual de producción forrajera para el área del CJ del SSP fue de 3.900 kg ha⁻¹. Los resultados obtenidos contemplan una variación interanual; sin embargo, estos valores son influenciados por diferentes factores como: densidad arbórea, índice de área foliar, área de copa y área de sombra proyectada, tipo de suelo, histórico de uso y manejo del área y composición de especies forrajeras (Mazía et al., 2016, Jose et al., 2017, Pezzopane et al., 2017).

Con respecto a la producción forrajera, Bussoni et al. (2015) evaluaron un SSP formado por 555 árb. ha⁻¹ de *Eucalyptus dunnii*, con edad entre 4 y 5 años, ubicado en el departamento de Florida, Uruguay. En el estudio fue obtenida una producción forrajera anual, en MS, de 4.032 kg ha⁻¹ para el SSP y 4.057 kg ha⁻¹ en CN a PS. Considerando las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno, la condición de CN presentó 1.102, 1.724, 885 y 321 kg ha⁻¹, mientras que los valores para el SSP fueron de 1.018, 1.781, 884 y 374 kg ha⁻¹, respectivamente.

En evaluaciones de producción forrajera sobre CN, en la misma zona edafoclimática que la de este estudio, Formoso (2005) verificaron un promedio anual de MS forrajera, para el período de 1984 a 2001, de 4.218 kg ha⁻¹, con máximos y mínimos de 6.061 y 2.314 kg ha⁻¹. En este sentido, los promedios estacionales aproximados reportados por el autor fueron de 670, 1.570, 1.180, 790 kg ha⁻¹ para el invierno, primavera, verano y otoño, respectivamente. A su vez, Formoso y Colucci (2008) reportaron valores de MS de producción forrajera sobre CN, en zonas de basamento cristalino, de alrededor de 4.350 kg ha⁻¹ con aproximadamente 1.560, 1.300, 870 y 620 kg ha⁻¹ durante las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente. Además, diferentes autores han reportado una alta variación interanual en la producción de biomasa forrajera de CN en zonas de basamento cristalino. En este sentido, Risso et al. (2001) han reportado promedios anuales alrededor de los 3.100 kg ha⁻¹, con coeficientes de variación interanual de 29 %, mientras que Ayala et al. (2001) reportaron promedios anuales de, aproximadamente, 3.600 kg ha⁻¹, con proporciones de 29 %, 38 %, 23 % y 10 % para las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente.

En cuanto a la relación entre la producción forrajera y los niveles lumínicos, la interceptación de la radiación por los árboles, presentó influencia directa sobre la productividad de forraje en el SSP. Considerando la predominancia de especies de metabolismo C4 en la zona de estudio, los bajos niveles de radiación disponible se presentan como una limitante para el componente forrajero. La orientación norte-sur para el componente arbóreo, así como diferentes arreglos silvopastoriles, pueden permitir

niveles lumínicos más elevados durante el invierno (Pezzopane et al., 2019, Bosi et al., 2020).

Almacenamiento de carbono

El almacenamiento de carbono en la condición de CN y en el SSP fue evaluado en los componentes suelo, arbóreo y forrajero. Se constató la hipótesis del SSP como promotor de los niveles de carbono almacenados. Las estimaciones de carbono en el suelo indicaron un aumento en el área bajo árboles. Los estratos de profundidad considerados fueron: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-30 cm y 30-60 cm. En el primer estrato, se verificó una reducción de, aproximadamente, 26 % (5,15 Mg ha⁻¹) del carbono en el área BM respecto al promedio del CN en el CJ del SSP y afuera de este. En los estratos de 5-10 cm y 10-15 cm de profundidad, los valores de carbono no fueron diferentes entre las posiciones. En la profundidad de 15-30 cm, el área BM presentó un incremento de, aproximadamente, 27 % en el carbono almacenado, equivalente a 4,5 Mg ha⁻¹, respecto al promedio del CN en el CJ del SSP y en PS. De modo semejante, en el estrato de 30-60 cm de profundidad el área BM presentó un aumento de 12 % (3,85 Mg ha⁻¹) respecto al promedio de las demás posiciones evaluadas. No fueron verificadas diferencias significativas entre la condición de CN en el CJ del SSP y en PS. Los totales de carbono estimado fueron de 95,5, 92,0 y 92,9 Mg ha⁻¹ para las posiciones BM, CJ y de CN a PS, respectivamente.

La reducción del carbono en los primeros centímetros del suelo en el área BM puede ser consecuencia del laboreo en la fila de plantación de árboles, generando mineralización de la materia orgánica. Además, la reducción de la biomasa radicular debido a una menor producción forrajera en el área BM es otro factor que contribuye a la reducción verificada en los niveles de carbono del suelo en el estrato de menor profundidad (Ritchie, 2020). Por otro lado, el aumento del carbono orgánico a mayores profundidades en el área BM puede estar asociado al aporte de biomasa radicular generada por los árboles (Smit y Rethman, 1998, Viera y Rodríguez-Soalleiro et al., 2019).

En evaluación del stock de carbono en suelo con coberturas forestales, Hernández et al. (2016) verificaron aumentos del carbono almacenado en estratos de 48-66 y 66-90 cm de profundidad, en plantaciones de *Eucalyptus sp.* respecto a una condición de CN. En este estudio, los estratos del suelo más superficiales no presentaron modificaciones en la cantidad de carbono entre las coberturas. En una evaluación semejante, Morais et al. (2021) verificaron reducciones en la cantidad de carbono orgánico en los primeros 5 cm del suelo decurrentes del cambio de pastizal nativo a plantaciones *Eucalyptus sp.* Así como lo verificado en esta tesis, en los estratos de 5-10 cm y 10-15 cm de profundidad los referidos autores no constataron diferencias en el stock de carbono con el cambio de cobertura.

En cuanto a la diferencia entre las emisiones de GEI animal y la incorporación de carbono generada en el SSP, se estimó una tasa de absorción de + 0,56 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹. En evaluación similar, Resende et al. (2019) obtuvieron valores en SSP variando entre emisiones de - 2,28 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹ a absorciones de + 7,16 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹. Los valores obtenidos se presentan como aproximaciones, las cuales pueden variar de acuerdo a la metodología de estimación, las condiciones edafoclimáticas, las especies forrajeras, la densidad arbórea y a la productividad primaria neta forrajera y arbórea de los sistemas (IPCC, 2006, UNFCCC, 2012, Resende et al., 2019).

Encuestas ambientales-productivas

Todos los encuestados se dedicaban mayoritariamente a la producción ganadera en forma especializada, en donde las modalidades de cría, recría, invernada y ciclo completo fueron desarrolladas por 63 %, 56 %, 37 % y 33 % de los establecimientos, respectivamente. Considerando las formas de uso y cobertura del suelo, la proporción de áreas con CN, con y sin mejoramiento, presentó un promedio de 80 % ± 17 %. Cerca del 48 % de los productores poseían alguna unidad de producción silvopastoril, las cuales generalmente no superaron el 5 % de la superficie predial. La forestación convencional estuvo presente en 18 % de los casos y el uso de cortinas de sombra y abrigo, en 44 % de los predios, ocupando superficies de 1 % a 4 % del área predial.

Evaluando la disposición de productores ganaderos a incorporar unidades de producción forestal o silvopastoril, Boscana y Varela (2011) realizaron entrevistas a 33 productores, con predios ubicados en los departamentos de Durazno, Florida y Flores. Los entrevistados presentaron un promedio de edad de 55 años, variando entre 34 y 81 años, el 45 % de los entrevistados poseían educación terciaria y el 48 % contaba con la producción agropecuaria como primera fuente de renta. En cuanto a las características de los establecimientos, estos variaron en tamaño desde 163 ha hasta 3.100 ha, de los cuales cerca del 42 % no superaron las 500 ha. El 36 % de los productores realizaban apenas la actividad ganadera, 18 % poseían combinación de ganadería con actividades agrícolas, 12 % realizaba la producción ganadera y forestal y 42 % habían incorporado forestaciones a sus predios. En cuanto a la especialización de los productores ganaderos, cerca de 30 %, 24 %, 3 % y 39 % se dedicaban a la cría, recría, invernada y producción ganadera de ciclo completo, respectivamente. En un estudio similar, Bussoni et al. (2015) entrevistaron a 104 productores, distribuidos en 11 departamentos del Uruguay, los cuales presentaron un promedio de edad de 54 años y el 37 % de ellos poseían educación de nivel terciario. Como perfil de producción ganadera, estos productores, en su mayoría, poseían especialización en alguna etapa del ciclo de producción, mayoritariamente dedicados a la cría y/o recría.

Preferencias entre servicios ambientales

Considerando el ED desarrollado en esta tesis, es pertinente aclarar que el contexto de la elección de los escenarios ambientales-productivos presentados a los productores para elección se refiere a una superficie equivalente al 10 % del área predial. El ajuste del modelo para el análisis de los datos del experimento de ED permitió evaluar y comprobar la hipótesis de la existencia de preferencias de los productores entre los SA y sus niveles de suministro. En este sentido, se verificó un efecto positivo y significativo sobre las elecciones de los productores por los escenarios silvopastoriles a partir de la reducción de las condiciones térmicas y de la oferta de mayor confort térmico animal durante olas de

calor. La oferta de dicho servicio consideró una reducción desde niveles severos, verificados en condiciones de CN, a condiciones moderadas o leves en los SSP.

Es de destacar que reducciones en la carga ganadera mayores al 20 % en los SSP generaron efectos negativos y significativos sobre las elecciones de los productores por estos sistemas de producción. Los resultados obtenidos permitieron identificar una escala de compensación entre un indicador de productividad ganadera y la oferta de un servicio ambiental. Es importante tener en cuenta que una disminución en la carga ganadera no siempre resulta en una reducción en la producción de carne; a su vez, estos resultados están influenciados por otras variables como el manejo del pastoreo y la productividad del sitio. El aumento en el almacenamiento de carbono en el SSP no modificó las elecciones de los productores. Durante las encuestas, parte de los productores indicaron no percibir como un beneficio el aumento de carbono generado por el SSP, debido a que no identifican que este servicio derive en mejores ingresos debido a dificultades de acceso a mercados de carbono. Sin embargo, la utilidad percibida de este SA puede ser modificada a medida que estos productores logren obtener retornos económicos en dichos mercados.

Los resultados obtenidos reflejan la percepción de la utilidad de los productores por los SA. La importancia de la oferta de áreas con destino a sombra y abrigo para los animales, generando regulaciones térmicas durante períodos calurosos y fríos, fue un aspecto mencionado por los productores durante las encuestas. En general, los productores relataron percepciones de cambios en el comportamiento animal, los que consideraron como evidencia del servicio de regulación térmica y mayor confort térmico en áreas silvopastoriles y cortinas. Los productores que no poseían áreas forestadas indicaron considerar relevante la oferta de áreas de sombra y abrigo a los animales. En su estudio, Boscana y Varela (2011) indicaron que 45% de los productores entrevistados consideraban la oferta de sombra y abrigo para la ganadería como una de las principales ventajas de la incorporación de componentes forestales en predios ganaderos. Además, la oferta de zonas de sombra y abrigo, y mejora de los niveles de confort térmico animal, fue un SA señalado como uno de los principales factores para la incorporación de SSP en los

estudios de Pastorini et al. (2011), Cubbage et al. (2012), Bussoni et al. (2015) y Tamosiunas (2015).

De acuerdo a los resultados del experimento de ED, el aumento en los niveles de carbono en el SSP no generó mayores niveles de utilidad para los productores. Aun así, cerca de 20 % de los encuestados indicó considerar relevante el almacenamiento de carbono en sus elecciones. Estos productores indicaron una preocupación por la generación de este servicio; sin embargo, identificaban dificultades para la vinculación de los productores a los mercados de carbono forestal, siendo esta una barrera para el establecimiento de SSP con esta finalidad.

En síntesis, la realización del experimento de ED permitió evidenciar una relación de compensación entre los SA. Los resultados indicaron que los productores se presentan dispuestos a asumir reducciones de hasta 20 % en la carga ganadera manejada en el área silvopastoril para obtener el servicio de mayor confort térmico animal. Este resultado puede representar una referencia para el establecimiento de SSP que sean favorables al ambiente y a las condiciones y necesidades de los productores ganaderos. Además, estos resultados son compatibles con otros estudios del tema. En este sentido, Shrestha y Alavalapati (2004) verificaron, mediante experimentos de ED por escenarios ambientales, relaciones de compensación entre la oferta de SA generados por SSP y valores económicos de disposición a pagar por estos servicios. En este estudio, el aumento en los niveles de oferta de SA incrementó la percepción de utilidad y la elección por SSP, mientras que el aumento en el valor de tributación sobre los bienes agropecuarios producidos generó una disminución en la opción por SSP. De modo semejante, Mastrangelo y Gavin (2012) y Mastrangelo y Laterra (2015) evidenciaron relaciones de compensación entre la oferta de SA generada por el uso de SSP e indicadores de productividad ganadera.

Disposición a adoptar sistemas silvopastoriles

La disposición de productores locales a adoptar áreas de producción silvopastoril fue evaluada mediante el experimento de VC. Este consistió en un programa de participación voluntaria con incentivos económicos para la adopción de SSP. Como resultado, de los 27 productores entrevistados, 19 (70 %) y 8 (30 %) respondieron en forma positiva y negativa, respectivamente, a la participación en el referido programa. De estos 19 productores, 12 (63 %) indicaron el incentivo económico como un factor determinante para la adopción de SSP, sin el cual no estarían dispuestos a incorporar o a aumentar el área silvopastoril en sus predios. De estos productores, 37 % poseían predios menores a las 500 ha. De modo semejante, Boscana y Varela (2011) verificaron, entre productores sin áreas de producción forestal, que el 52 % presentó interés en realizar la incorporación de forestaciones, de los cuales el 34 % tenía predios menores a las 500 ha. A su vez, Bussoni et al. (2015) verificaron que 35 % de los productores entrevistados estuvieron dispuestos a establecer plantaciones forestales, en proporciones equitativas entre los estratos de tamaño predial. La mayor proporción de productores dispuestos a incorporar SSP verificada en esta tesis puede vincularse a que el programa planteado se enfocaba al establecimiento de áreas integrada entre árboles y ganadería, además de la oferta de incentivo económico. En los SSP, la producción ganadera es realizada en forma integrada a la forestal, generando servicios a la ganadería, y con menor impacto sobre la oferta de forraje en comparación a la forestación convencional. Además, no reducir el área de pastoreo es una condición importante para el aumento de la disposición de los productores ganaderos a adoptar sistemas de producción forestal o silvopastoril en sus predios (Boscana y Varela, 2011, Frey et al., 2012, Pastorini et al., 2011, Bussoni et al., 2015).

En el análisis de las decisiones en participar del programa de incentivo económico para la incorporación de áreas de producción silvopastoril, no fue posible obtener coeficientes significativos para las variables incluidas en el predictor lineal del modelo (tabla 13). Este resultado puede estar relacionado con el número de encuestas realizadas para la modelación de la respuesta a la participación en el referido programa. Considerando que

dichas respuestas son de sí o no, estas asumen distribución binaria y, generalmente, demandan un mayor número de datos que el verificado en este estudio para permitir la obtención de coeficientes significativos sobre las decisiones realizadas (Train, 2009, Holmes y Likens, 2016, Boyle, 2017, Dupras et al., 2017).

Considerando las 19 respuestas afirmativas a la participación en el programa de adopción silvopastoril, se realizó la modelación de la superficie de interés declarada para esta finalidad (tabla 14). El área promedio de interés para la incorporación de SSP fue de 64 ha \pm 21 ha, lo que representó, en promedio, 12 % de estos predios, con valor máximo y mínimo de 125 y 3 ha, respectivamente. Este valor es compatible con el obtenido por Bussoni et al. (2015), que verificaron, para productores de mediana escala (> 500 ha), una disposición a forestar de cerca de 46 ha, correspondiendo a 14 % de los predios. A su vez, Boscana y Varela (2011) obtuvieron superficies de 66 ha y 135 ha para productores pequeños (< 500 ha) y medianos a grandes (> 500 ha), respectivamente. Con base en las características prediales-productivas y socio-económicas de los encuestados, fueron verificados coeficientes positivos y significativos para el área predial y para la actividad de cría ganadera. Este resultado indica que, entre los productores con interés en participar del programa hipotético planteado, el aumento del área predial, así como el aumento de la proporción del rodeo destinado a la cría, generó un aumento en el área declarada para la incorporación silvopastoril. Por otro lado, fueron obtenidos coeficientes significativos y negativos para las variables de la porción predial dedicada a áreas con RFI, forestación convencional y cortinas de abrigo y sombra, además del aumento del rodeo dedicado a la recría ganadera. El aumento de superficie de las referidas coberturas y/o el aumento de la proporción del rodeo de recría generaron reducciones en las superficies indicadas para la incorporación silvopastoril.

Durante las encuestas, los productores que optaron por la participación en el programa hipotético indicaron, en su mayoría, el destino de zonas del predio consideradas de menor productividad para la ganadería y con potencial para el establecimiento de árboles. Otro aspecto comúnmente relatado durante las encuestas fueron consideraciones relacionadas

con la necesidad de recibir seguimiento técnico para posibilitar un éxito en las prácticas silvopastoriles. La mayor parte de los entrevistados con disposición a participar del programa de incentivo económico indicó reconocer la posibilidad de utilizar áreas específicas de los predios para cumplir funciones ambientales y productivas específicas. Esta condición fue igualmente verificada por Bussoni et al. (2015), indicando que el uso de SSP o de áreas de producción forestal en predios ganaderos, se vincula a la oferta de SA a la ganadería, así como al aumento de la productividad del suelo en áreas marginales para la producción ganadera.

Así como lo verificado en este estudio, la literatura del tema sugiere relaciones entre los SA ambientales promovidos por los SSP y los resultados productivos y económicos generados. En este sentido, Raes et al. (2017) utilizaron un experimento ED para evaluar la disponibilidad a recibir incentivos para la adopción de SSP. Los autores evidenciaron que las elecciones de los productores fueron influenciadas de forma positiva y significativa por factores como el área predial, el nivel de ingreso proveniente de la producción agropecuaria y la oferta de SA. Además, identificaron que la participación en programas de incentivo al uso de SSP es mayor cuando estos programas son flexibles, permitiendo adaptar los SSP a las realidades socio-económicas de los productores y a las condiciones biofísicas de los predios. Esta condición también fue reportada por Pastorini et al. (2011), Tamosiunas (2015) y Bussoni et al. (2015), indicando que consideraciones sobre la gobernanza del establecimiento, posibles impactos a la ganadería y el manejo y comercialización de la producción forestal son factores que influyen en la disposición a participar de programas de incentivo a la producción silvopastoril.

En el estudio desarrollado por Shrestha y Alavalapati (2004), los autores verificaron coeficientes positivos y significativos, con mayor elección por escenarios silvopastoriles a partir del aumento en la oferta de SA y del nivel de educacional. Por otro lado, el aumento de la edad y el aumento en la tributación sobre la producción, decurrente de la elección por la producción silvopastoril, generaron coeficientes negativos y significativos, indicando reducir la elección por SSP. A su vez, Claytor et al. (2018) evaluaron la

disposición de productores ganaderos por incorporar árboles, en forma silvopastoril, con el objetivo de aumentar el secuestro de carbono. La disposición a participar de programas de incentivo económico para adoptar la producción silvopastoril fue influenciada de forma significativa y positiva por el aumento en los niveles de incentivos económicos brindados por el programa. En contraste, el aumento en los niveles de ingreso y de la renta obtenida con el arrendamiento de la tierra para pastoreo fueron inversamente relacionados con el interés en participar del programa. Los autores relatan que el aumento en el costo de oportunidad de la tierra generó menores intereses en participar del programa para adopción de áreas silvopastoriles, debiendo ser compensando con un aumento en el nivel de incentivo económico.

En los resultados de esta tesis, los productores que desarrollaban mayores áreas con RFI, forestaciones convencionales, cortinas y/o islas de abrigo y sombra, y con mayor especialización en la cría ganadera, poseían interés en desarrollar SSP en superficies más pequeñas en sus predios. En un estudio relacionado, Davis y Rausser (2020) han identificado el costo de oportunidad como una limitante de productores ganaderos en Estados Unidos, para incorporar SSP. En el estudio, los sistemas ganaderos de estos productores se basaban en pasturas implantadas, con alta productividad, lo que elevaba el costo de oportunidad para el cambio en la cobertura y uso del suelo.

Los productores encuestados en esta tesis indicaron poseer preferencias por destinar áreas con menor productividad ganadera para el uso silvopastoril, representando menores costos de oportunidad respecto a las áreas ganaderas más productivas. De acuerdo con esto, se verificó que la superficie de interés para la incorporación de SSP fue aumentada a partir de una mayor superficie predial y una mayor especialización en la ganadería de cría. Esta modalidad se asocia a menores demandas por biomasa forrajera, permitiendo su desarrollo en áreas de menor productividad y de menor costo de oportunidad, respecto a áreas más productivas. Además, fue posible evidenciar la posibilidad de estimular el aumento de la superficie con SSP mediante el uso de incentivos económicos. Asimismo, la flexibilidad de estos programas fue un aspecto relatado como relevante por los productores para

posibilitar la adaptación de los SSP a sus intereses y a la realidad de los sitios en los predios. En general, los productores indicaron el incentivo económico como un motivador de la incorporación de los SSP, los cuales serían utilizados para cumplir funciones ambientales y productivas identificadas *a priori* por los productores.

5. CONCLUSIONES

Las modificaciones de microclima generadas por el SSP resultaron en una mejora de la condición térmica para los animales, especialmente durante los eventos de olas de calor. En estos períodos se verificó una regulación térmica en el SSP, reduciendo los niveles de disconfort y estrés térmico obtenidos para los indicadores de biometeorología animal. Este efecto fue especialmente verificado en el área del SSP bajo cobertura arbórea.

El aumento del carbono en el SSP fue generado especialmente por la incorporación arbórea, aumentando los niveles totales de biomasa y carbono. El stock de carbono en el suelo fue aumentando en el área de la plantación de los árboles del SSP, aunque con modificaciones en su distribución en profundidad. Esta posición presentó reducción del carbono en los primeros centímetros del suelo, la cual fue compensada con aumentos en mayores profundidades, con relación a lo obtenido para el CJ del SSP y en CN. Además, los resultados señalan la obtención de balances de GEI neutros a positivos a partir del uso de SSP, lo que indica la posibilidad de uso de estos sistemas como una estrategia ambiental para la mitigación de las emisiones que produce la actividad ganadera.

En la valoración de los SA, los productores establecieron una escala de compensación entre el servicio de regulación térmica generado por el SSP y reducciones de hasta 20 % en la carga ganadera del área silvopastoril. El resultado obtenido sugiere una asignación de niveles significativos de utilidad a este servicio por parte de los productores, destacando esto como un aspecto ambiental de relevancia en la producción ganadera. Además, la presencia de áreas para sombra y abrigo de los animales fue un aspecto relatado como importante por los encuestados. Los niveles de reducción en la producción forrajera y en la carga ganadera admitidos por los productores sirven como una referencia para el diseño y manejo de SSP en nivel local y para el desarrollo de políticas dirigidas al uso de estos sistemas integrados.

Los productores dispuestos a incorporar o expandir áreas silvopastoriles en sus predios vincularon sus decisiones al cumplimiento de diferentes funciones tanto productivas como

ambientales. La mayoría de estos casos, demostraron poseer objetivos de aumento de la productividad, diversificación de los productos y obtención de mayores niveles de confort térmico en la producción ganadera. En este sentido, el uso de SSP fue generalmente vinculado a fracciones reducidas de los predios y en áreas de menor productividad ganadera con aptitud para el desarrollo forestal. Se identificó la posibilidad de estimular la expansión de áreas silvopastoriles a partir del uso de programas de incentivo económico.

La incorporación de los SSP presenta un gran potencial para el sector agropecuario en el Uruguay y requiere de mayor investigación. A partir de esta tesis, se identifican líneas a considerar en futuros estudios vinculados al tema. La modelación de la regulación térmica y de las respuestas de los animales al estrés térmico a partir de la evaluación de microclima en diferentes arreglos, especies y etapas de desarrollo de SSP se presenta como una herramienta para el diseño de estos sistemas. Sería importante incluir en estos estudios la evaluación del efecto abrigo para los animales durante condiciones de frío, y la relación entre la mitigación térmica y los niveles de confort animal. De modo semejante, es importante profundizar en estudios que vinculen los diseños silvopastoriles, sus regímenes silvícolas y rotaciones con las modificaciones en la transmisión de la radiación solar, la composición de especies y la productividad forrajera. A su vez, la obtención de ecuaciones alométricas para estimación de biomasa y carbono en SSP puede facilitar el monitoreo a nivel predial y el desarrollo de productos ganaderos con balance de GEI neutro. Sería importante profundizar en el diseño de programas de incentivo económico para incorporar la producción silvopastoril; para esto, se precisan evaluaciones con mayor amplitud poblacional, para posibilitar la expansión de los resultados obtenidos en este estudio.

Finalmente, el SSP evaluado se presentó favorable a la oferta de los SA de almacenamiento de carbono y de regulación térmica con mayor confort animal. Los resultados señalan los SSP como una modalidad de producción multifuncional, presentándose como una estrategia para atender a demandas ambientales y productivas específicas del sector agropecuario.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad L, Kanth RH, Parvaze S, Sheraz SM. 2017. Experimental Agrometeorology: A Practical Manual. En: Experimental Agrometeorology: A Practical Manual. Berlin/Heidelberg. Germany. Springer International Publishing AG. 1-109. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69185-5>.
- Altamirano A, Da Silva H, Duran A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Clasificación de Suelos. Montevideo. 1-96.
- Arias RA, Mader TL, Escobar PC. 2008. Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche. Archivos de Medicina Veterinaria. 40(1): 7-22. <https://doi.org/10.4067/s0301-732x2008000100002>.
- Aspinwall MJ, Drake JE, Company C, Varhammar A, Ghannoum O, Tissue DT, Reich P. B, Tjoelker MG. 2016. Convergent acclimation of leaf photosynthesis and respiration to prevailing ambient temperatures under current and warmer climates in *Eucalyptus tereticornis*. The New phytologist. 212(2): 354-367. <https://doi.org/10.1111/nph.14035>.
- Ayala W, Bermúdez R, Carámbula M, Risso D, Terra J. 2001. Tecnologías para la mejora de la producción de forraje en suelos de lomadas del este. En: Risso DF, Berretta E. J. (Eds.). Tecnologías forrajeras para sistemas ganaderos de Uruguay. Montevideo. INIA. Boletín de Divulgación n.º 76. 69-106.
- Baêta FC. 1985. Responses of Lactating Dairy Cows to the Combined Effects of Temperature, Humidity and Wind Velocity in the Warm Season. Ph.D. Thesis. Columbia. University of Missouri. 1-218.
- Baêta FC, Souza C. F. 2010. Ambiência em edificações rurais. Conforto animal. Viçosa. Editora UFV. 2: 1-269.
- Balmelli G, Resquin F. 2005. Comportamiento de especies de *Eucalyptus* para sombra y abrigo en suelos sobre basalto. En: INIA Tacuarembó, Unidad Experimental

- Glencoe. Día de campo. Producción animal, pasturas y forestal. Tacuarembó. Uruguay. 22-27.
- Balzarini M, Macchiavelli R, Casanoves F. 2005. Aplicaciones de Modelos Mixtos en Agricultura y Forestería. Turrialba. Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 1-189.
- Bartier PM, Keller CP. 1996. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW). *Computers and Geosciences*. 22(7): 795-799. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(96\)00021-0](https://doi.org/10.1016/0098-3004(96)00021-0).
- Barton DN, Benjamin T, Cerdán CR, DeClerck F, Madsen AL, Rusch GM, Salazar ÁG, Sanchez D, Villanueva C. 2016. Assessing ecosystem services from multifunctional trees in pastures using Bayesian belief networks. *Ecosystem Services*. 18: 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.03.002>.
- Becoña G, Wedderburn L. 2010. Comparación del impacto ambiental en relación con gases de efecto invernadero en sistemas ganaderos de Uruguay y Nueva Zelanda. Montevideo. AgResearch. Plan Agropecuario. 1-62.
- Bennett EM, Peterson GD, Gordon LJ. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*. 12(12): 1394-1404. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x>.
- Boscana MG, Varela FC. 2011. Factores que influyen en la incorporación del rubro forestal en predios agropecuarios de los departamentos de florida, flores y durazno. Tesis de Maestría. Montevideo. Uruguay. Facultad de Agronomía. Universidad de la República. 1-121.
- Bosi C, Pezzopane JRM, Sentelhas PC. 2020. Silvopastoral system with eucalyptus as a strategy for mitigating the effects of climate change on Brazilian pasturelands. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 92: 1-15. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020180425>.

- Bourne AE, Haigh AM, Ellsworth DS. 2015. Stomatal sensitivity to vapour pressure deficit relates to climate of origin in Eucalyptus species. *Tree Physiology*. 35(3): 266-278. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv014>.
- Boyle KJ. 2017. Contingent Valuation in Practice. En: Champ P, Boyl K, Brown T. (Eds.). *A primer on Nonmarket Valuation. The Economics of Non-Market Goods and Resources*. Dordrecht. Springer. 13: 83-131. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7104-8_4.
- Broom DM, Galindo FA, Murgueitio E. 2013. Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 280(1771): 1-9. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2025>.
- Brown-Brandl TM, Eigenberg RA, Nienaber JA, Hahn GL. 2005. Dynamic response indicators of heat stress in shaded and non-shaded feedlot cattle, part 1: Analyses of indicators. *Biosystems Engineering*. 90(4): 451-462. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.12.006>.
- Brown-Brandl TM, Jones DD. 2016. Characterizing feedlot heifer response to environmental temperature. *Transactions of the ASABE*. 59(2): 673-680. <https://doi.org/10.13031/trans.59.10855>.
- Brown-Brandl TM. 2018. Understanding heat stress in beef cattle. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 47: 1-9. <https://doi.org/10.1590/rbz4720160414>.
- Buffington DE, Canton GH, Pitt D. 1981. Black Globe-Humidity Index (BGHI) as Comfort Equation for Dairy Cows. *Trans. ASAE*. 24: 711-714. [10.13031/2013.34325](https://doi.org/10.13031/2013.34325).
- Bussoni A, Juan C, Fernández E, Boscana M, Cabbage F, Bentancur O. 2015. Integrated beef and wood production in Uruguay: potential and limitations. *Agroforestry Systems*. 89: 1107-1118. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9839-1>.

- 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 intergración de forestaciones en predios familiares: resultados de un estudio participativo. Informe Técnico. Proyecto: “Evaluación de la incorporación de la forestación en productores ganaderos y lecheros familiares: estudio de caso múltiple”. Montevideo: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. 1-48.
- Carabaño MJ, Logar B, Bormann J, Minet J, Vanrobays ML, Díaz C, Tychon B, Gengler N, Hammami H. 2016. Modeling heat stress under different environmental conditions. *Journal of Dairy Science*. 99(5): 3798-3814. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10212>.
- Carrero O, Jerez M, Macchiavelli R. 2008. Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. *Interciencia*. 33(4): 265-272.
- Castaño JP, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Aunchayna R. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Montevideo: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Serie Técnica n.º 193. 1-34.
- Chen Y, Arsenault R, Napper S, Griebel P. (2015). Models and methods to investigate acute stress responses in cattle. *Animals*. 5(4): 1268-1295. <https://doi.org/10.3390/ani5040411>.
- Chiputwa B, Wainaina P, Nakelse T, Makui P, Zougmore RB, Ndiaye O, Minang PA. 2020. Transforming climate science into usable services: The effectiveness of co-production in promoting uptake of climate information by smallholder farmers in Senegal. *Climate Services*. 20. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100203>.
- Clayton HS, Clark CD, Lambert DM, Jensen KL. 2018. Cattle producer willingness to afforest pastureland and sequester carbon. *Forest Policy and Economics*. 92: 43-54.

<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.03.004>.

Cohen N, Arieli T. 2011. Field research in conflict environments: Methodological challenges and snowball sampling. *Journal of Peace Research*. 48(4): 423-435. <https://doi.org/10.1177/0022343311405698>.

Coleman JS. 1958. Field Methods and Techniaues Relational Analysis: The Study of Social Organizations with Survey Methods. *Human Organization*. 17: 28-36.

Collier RJ, Collier JL, Rhoads RP, Baumgard LH. 2008. Invited review: Genes involved in the bovine heat stress response. *Journal of Dairy Science*. 91(2): 445-454. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0540>.

Cubbage F, Balmelli G, Bussoni A, Noellemeyer E, Pachas AN, Fassola H, Colcombet L, Rossner B, Frey G, Dube F, de Silva ML, Stevenson H, Hamilton J, Hubbard W. 2012. Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems*. 86: 303-314. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9482-z>.

Czajkowski M, Bartczak A, Giergiczny M, Navrud S, Zylicz T. 2014. Providing preference-based support for forest ecosystem service management. *Forest Policy and Economics*. 39: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.11.002>.

Dade MC, Mitchell MGE, McAlpine CA, Rhodes JR. 2019. Assessing ecosystem service trade-offs and synergies: The need for a more mechanistic approach. *Ambio*. 48(10): 1116-1128. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1127-7>.

Dagar JC, Tewari VP. 2017. Evolution of agroforestry as a modern science. En: Dagar J C, Tewari VP. (Eds.). *Agroforestry: Anecdotal to Modern Science*. Singapore: Springer Nature. 1: 13-90. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7650-3_2.

Daramola JO, Abioja MO, Onagbesan O. M. 2012. Heat Stress Impact on Livestock Production. En: Sejian V, Naqvi SMK, Ezeji T, Lakritz J, Lal R. (Eds.). *Environmental stress and amelioration in livestock production*. Environmental

- Stress and Amelioration in Livestock Production. Berlin: Springer. 1: 53-73. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29205-7>.
- Davis J, Rausser G. 2020. Amending conservation programs through expanding choice architecture: A case study of forestry and livestock producers. *Agricultural Systems*. 177. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102678>.
- DeShazer JA, Hahn GL, Xin H. 2009. Chapter 1: Basic Principles of the Thermal Environment and Livestock Energetics. En: DeShazer JA. (Eds.). *Livestock Energetics and Thermal Environment Management*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 1-22. <https://doi.org/10.13031/2013.28294>.
- Di Rienzo JA, Macciavelli RE, Casanoves F. 2012. Modelos Lineales Mixtos: aplicaciones en InfoStat. Córdoba. Argentina. 1: 1-240.
- Di Vita G, Pilato M, Pecorino B, Brun F, D'Amico M. 2017. A review of the role of vegetal ecosystems in CO₂ capture. *Sustainability*. 9(10): 1-10. <https://doi.org/10.3390/su9101840>.
- Domingues-Junior AP, Daloso DM, Machado M, Rosado-Souza L, Souza LP, Fernie A R, Mazzafera P. 2019. A cold change: how short low temperature exposure affects primary metabolism in leaves and stems of two eucalyptus species. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*. 31(4): 429-444. <https://doi.org/10.1007/s40626-019-00156-8>.
- Dube F, Espinosa M, Stolpe NB, Zagal E, Thevathasan NV, Gordon AM. 2012. Productivity and carbon storage in silvopastoral systems with *Pinus ponderosa* and *Trifolium* spp., plantations and pasture on an Andisol in Patagonia, Chile. *Agroforestry Systems*. 86(2): 113-128. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9471-7>.
- Dupras J, Laurent-Lucchetti J, Revéret JP, DaSilva L. 2017. Using contingent valuation and choice experiment to value the impacts of agri-environmental practices on landscapes aesthetics. *Landscape Research*. 43(5): 679-695.

<https://doi.org/10.1080/01426397.2017.1332172>.

Dusenge ME, Duarte AG, Way DA. 2019. Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist*. 221(1): 32-49. <https://doi.org/10.1111/nph.15283>.

Ehleringer JR. 2005. The Influence of Atmospheric CO₂, Temperature, and Water on the Abundance of C₃/C₄ Taxa. En: Ehleringer JR, Cerling TE, Dearing MD. (Eds.). *A history of atmospheric CO₂ and its effects on plants, animals, and ecosystems*. New York. Springer. *Ecological Studies*. 177: 214-231. https://doi.org/10.1007/0-387-27048-5_10.

Eigenberg RA, Brown-Brandl TM, Nienaber JA, Hahn GL. 2005. Dynamic response indicators of heat stress in shaded and non-shaded feedlot cattle, part 2: Predictive relationships. *Biosystems Engineering*. 91(1): 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.02.001>.

Fedrigo JK, Santa Cruz R, Baez F, Benítez V, Viñoles C. 2019. Monitoring the vaginal temperature of Hereford, Angus cows and their crosses with Bonsmara during a heat wave in Uruguay. En: Rivera J, Peri PL, Chará J, Díaz M, Colcombet L, Murgueitio E. (Eds.). *X Congreso Internacional en Sistemas Silvopastoriles*. Libros Acta. Cipav. 73-81.

Foken T. 2017. *Micrometeorology*. Berlin. Springer. 2: 1-357. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25440-6>.

Formoso D, Colucci PE. 2008. Productividad de Mejoramientos de Campo Natural en Cristalino Central, Uruguay. En: XXII Reunión del Grupo Técnico en Forrajeras del Cono Sur. INIA. FAO. PROCISUR. Minas. 1-4.

Formoso D. 2005. La investigación en utilización de pasturas naturales sobre cristalino desarrollada por el secretariado uruguayo de lana. En: Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. Montevideo. INIA. Serie Técnica 151: 51-57.

- Frey GE, Fassola HE, Pachas AN, Colcombet L, Lacorte SM, Pérez O, Renkow M, Warren ST, Cubbage FW. 2012. Perceptions of silvopasture systems among adopters in northeast Argentina. *Agricultural Systems*. 105(1): 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.09.001>.
- Gaughan JB, Mader TL, Holt SM, Lisle A. 2008. A new heat load index for feedlot cattle. *Journal of Animal Science*. 86(1): 226-234. <https://doi.org/10.2527/jas.2007-0305>.
- Gold MA, Garrett HE. 2022. Agroforestry Nomenclature, Concepts and Practices. En: Garrett HE, Jose S, Gold MA. (Eds.). *North American Agroforestry*. American Society of Agronomy. 3: 27 – 42.
- Goldstein DS, Kopin IJ. 2007. Evolution of concepts of stress. *Stress*. 10(2): 109-120. <https://doi.org/10.1080/10253890701288935>.
- Goodman LA. 1961. Snowball Sampling. *The Annals of Mathematical Statistics*. 32(1): 148-170. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177705148>.
- Haile SG, Nair VD, Nair PKR. 2010. Contribution of trees to carbon storage in soils of silvopastoral systems in Florida, USA. *Global Change Biology*. 16(1): 427-438. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01981.x>.
- Handcock MS, Gile KJ. 2011. Comment: On the concept of snowball sampling. *Sociological Methodology*. 41(1): 367-371. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9531.2011.01243.x>.
- Harrison XA, Donaldson L, Correa-Cano ME, Evans J, Fisher DN, Goodwin CED, Robinson BS, Hodgson DJ, Inger R. 2018. A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology. *PeerJ*. 6: 1-32. <https://doi.org/10.7717/peerj.4794>.
- Hartel T, Réti KO, Craioveanu C. 2017. Valuing scattered trees from wood-pastures by farmers in a traditional rural region of Eastern Europe. *Agriculture, Ecosystems and*

- Environment. 236: 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.019>.
- He L, Chen JM, Pan Y, Birdsey R, Kattge J. 2012. Relationships between net primary productivity and forest stand age in U.S. forests. *Global Biogeochemical Cycles*. 26(3): 1-19. <https://doi.org/10.1029/2010GB003942>.
- Heckathorn DD. 2011. Comment: Snowball versus respondent-driven sampling. *Sociological Methodology*. 41(1): 355–366. [10.1111/j.1467-9531.2011.01244.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9531.2011.01244.x).
- Hernández J, del Pino A, Vance ED, Califra Á, Del Giorgio F, Martínez L, González-Barrios P. 2016. Eucalyptus and Pinus stand density effects on soil carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*. 368: 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.007>.
- Hernandez MJ, Montes F, Ruiz F, Lopez G, Pita P. 2016. The effect of vapour pressure deficit on stomatal conductance, sap pH and leaf-specific hydraulic conductance in *Eucalyptus globulus* clones grown under two watering regimes. *Annals of Botany*. 117(6): 1063-1071. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw031>.
- Holmes R, Likens G. 2016. *Hubbard Brook: The Story of a Forest Ecosystem*. Yale University Press. 1: 1-286. <https://doi.org/10.12987/9780300220780>.
- Hoyos D. 2010. The state of the art of environmental valuation with discrete choice experiments. *Ecological Economics*. 69(8): 1595-1603. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.04.011>.
- Huertas SM, Bobadilla PE, Alcántara I, Akkermans E, Eerdenburg FJC. M. 2021. Benefits of silvopastoral systems for keeping beef cattle. *Animals*. 11(4): 1-12. <https://doi.org/10.3390/ani11040992>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. En: Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (Eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories

- Programme. Japan. IGES. 4: 1-716.
- Irisarri JGN, Oosterheld M, Golluscio RA, Paruelo JM. 2014. Effects of Animal Husbandry on Secondary Production and Trophic Efficiency at a Regional Scale. *Ecosystems*. 17(4): 738-749. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9756-6>.
- Johnson TP. 2005. Snowball Sampling. *Encyclopedia of Biostatistics*. 12-14. <https://doi.org/10.1002/0470011815.b2a16070>.
- Johnston RJ, Boyle KJ, Bennett J, Brouwer R, Cameron TA, Hanley N, Ryan M, Scarpa R, Tourangeau R. 2017. Contemporary guidance for stated preference studies. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*. 4(2): 319-405. <https://doi.org/10.1086/691697>.
- Jose S, Bardhan S. 2012. Agroforestry for biomass production and carbon sequestration: An overview. *Agroforestry Systems*. 86(2): 105-111. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9573-x>.
- Jose S, Walter D, Kumar M. 2017. Ecological considerations in sustainable silvopasture design and management. *Agroforestry Systems*. 93: 317-331. doi: 10.1007/s10457-016-0065-2.
- Jose S, Garrett HE, Gold MA, Lassoie JP, Buck LE, Current D. 2022. Agroforestry as an Integrated, Multifunctional Land Use Management Strategy. En: Garrett HE, Jose S, Gold MA. (Eds.). *North American Agroforestry*. American Society of Agronomy. 3: 3 – 26.
- Kaplan CD, Korf D, Sterk C. 1987. Temporal and social context of heroin-using populations an illustration of the Snowball Sampling Technique. *The Journal of Nervous and Mental Disease*. 175(9): 566-574. 10.1097/00005053-198709000-00009.
- Köppen W. 1936 *Das geographische System der Klimate*. Gebrüder Borntraeger: Berlin,

Germany. 1–44.

- Lancsar E, Louviere J. 2008. Conducting Discrete Choice Experiment. *Pharmacoeconomics*. 26(8): 661-677. [10.2165/00019053-200826080-00004](https://doi.org/10.2165/00019053-200826080-00004).
- Lancsar E, Fiebig DG, Hole AR. 2017. Discrete Choice Experiments: A Guide to Model Specification, Estimation and Software. *Pharmacoeconomics*. 35(7): 697-716. <https://doi.org/10.1007/s40273-017-0506-4>.
- Lees AM, Lees JC, Lisle AT, Sullivan ML, Gaughan JB. 2018. Effect of heat stress on rumen temperature of three breeds of cattle. *International Journal of Biometeorology*. 62(2): 207-215. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1442-x>.
- Lescourret F, Magda D, Richard G, Adam-Blondon AF, Bardy M, Baudry J, Doussan I, Dumont B, Lefèvre F, Litrico I, Martin-Clouaire R, Montuelle B, Pellerin S, Plantegenest M, Tancoigne E, Thomas A, Guyomard H, Soussana JF. 2015. A social-ecological approach to managing multiple agro-ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 14: 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.04.001>.
- Lezama F, Altesor A, Pereira M, Paruelo JM. 2011. Descripción de la heterogeneidad florística de las principales regiones geomorfológicas de Uruguay. En: Altesor A, Ayala W, Paruelo JM. (Eds.). *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales*. Montevideo. INIA Serie FPTA. 26: 15-32.
- Lezama F, Pereira M, Altesor A, Paruelo JM. 2019. Grasslands of Uruguay: Classification based on vegetation plots. *Phytocoenologia*. 49(3): 211-229. <https://doi.org/10.1127/phyto/2019/0215>.
- Li S, Gebremedhin KG, Lee CN, Collier RJ. 2009. Evaluation of thermal stress indices for cattle. *American Society of Agricultural and Biological Engineers. Annual International Meeting 2009*. 4: 2283-2302. <https://doi.org/10.13031/2013.27441>.

- Lim H, Alvares CA, Ryan MG, Binkley D. 2020. Assessing the cross-site and within-site response of potential production to atmospheric demand for water in Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*. 464. 118068. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118068>.
- Lin YS. 2012. How will Eucalyptus tree species respond to global climate change? A comparison of temperature responses of photosynthesis. Tesis Doctorado. Sydney. Australia. University of Western Sydney. 1-169.
- Louviere JJ, Hensher DA, Swait JD. 2000. Choosing as a way of life. En: Louviere JJ, Hensher DA, Swait JD. (Eds.). *Stated Choice Methods Analysis and Applications*. Cambridge University Press. United Kingdom. 1: 1-399. 10.1017/CBO9780511753831.008
- Mader TL, Johnson LJ, Gaughan JB. 2010. A comprehensive index for assessing environmental stress in animals. *Journal of Animal Science*. 88(6): 2153-2165. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2586>.
- Majumder R, Bhunia GS, Patra P, Mandal AC, Ghosh D, Shit PK. 2019. Assessment of flood hotspot at a village level using GIS-based spatial statistical techniques. *Arabian Journal of Geosciences*. 12. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4558-y>.
- Marschak J. 1960. Binary-Choice Constraints and Random Utility Indicators. En: *Economic Information, Decision, and Prediction*. Theory and Decision Library. 7(1): 218-239. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9276-0_9.
- Martín-López B, Iniesta-Arandia I, García-Llorente M, Palomo I, Casado-Arzuaga I, Del Amo DG, Gómez-Baggethun E, Oteros-Rozas E, Palacios-Agundez I, Willaarts B, González JA, Santos-Martín F, Onaindia M, López-Santiago C, Montes C. 2012. Uncovering ecosystem service bundles through social preferences. *PLoS ONE*. 7(6). e38970. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038970>.
- Mastrangelo ME, Gavin MC. 2012. Trade-Offs between Cattle Production and Bird

- Conservation in an Agricultural Frontier of the Gran Chaco of Argentina. *Conservation Biology*. 26(6): 1040-1051. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01904.x>.
- Mastrangelo ME, Laterra P. 2015. From biophysical to social-ecological trade-offs: Integrating biodiversity conservation and agricultural production in the Argentine Dry Chaco. *Ecology and Society*. 20(1). <https://doi.org/10.5751/ES-07186-200120>.
- Mazía N, Moyano J, Perez L, Aguiar S, Garibaldi LA, Schlichter T. 2016. The sign and magnitude of tree-grass interaction along a global environmental gradient. *Global Ecology and Biogeography*. 25(12): 1510-1519. <https://doi.org/10.1111/geb.12518>.
- McFadden D. 1974. The Measurement of Travel Demand. *Journal of Public Economics*. 3: 303-328. [https://doi.org/10.1016/0047-2727\(74\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0047-2727(74)90003-6).
- McFadden D, Train K. 2000. Mixed MNL for discrete response. *Journal of Applied Econometrics*. 15: 447-470. [https://doi.org/10.1002/1099-1255\(200009/10\)15:5<447::AID-JAE570>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1099-1255(200009/10)15:5<447::AID-JAE570>3.0.CO;2-1).
- McFadden D. 2001. Economic Choices. *American Economic Review*. 91(3): 351-378. <https://doi.org/10.2307/2677869>.
- McManus C, Paludo GR, Louvandini H, Gugel R, Sasaki LCB, Paiva SR. 2009. Heat tolerance in Brazilian sheep: Physiological and blood parameters. *Tropical Animal Health and Production*. 41(1): 95-101. <https://doi.org/10.1007/s11250-008-9162-1>.
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2018. Manual de Manejo de Bosque Nativo en Uruguay. Montevideo. Uruguay. 1: 1-52.
- Monson R, Baldocchi D. 2014. Terrestrial biosphere-atmosphere fluxes. New York. Cambridge University Press. 1: 1-473. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139629218>.
- Monteith J, Unsworth M. 2013. Principles of Environmental Physics: Plants, Animals,

and the Atmosphere. United Kingdom. Oxford. Elsevier. 4: 1-401. 10.1016/B978-0-12-386910-4.00013-5.

Morais JR, Castilhos RMV, Lacerda CL, Pinto LFS, Carlos FS. 2021. Carbon and nitrogen stocks and microbiological attributes of soil under eucalyptus cultivation in the Pampa biome of southern Brazil. *GeodermaRegional*. 25. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00392>.

Moreno G, Aviron S, Berg S, Crous-Duran J, Franca A, de Jalón SG, Hartel T, Mirck J, Pantera A, Palma JHN, Paulo JA, Re GA, Sanna F, Thenail C, Varga A, Viaud V, Burgess PJ. 2017. Agroforestry systems of high nature and cultural value in Europe: provision of commercial goods and other ecosystem services. *Agroforestry Systems*. 92(4): 877-891. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0126-1>.

Muradian R, Corbera E, Pascual U, Kosoy N, May PH. 2010. Reconciling theory and practice: An alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. *Ecological Economics*. 69(6): 1202-1208. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.006>.

Nair RPK, Nair VD, Kumar BM, Showalter JM. 2010. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in Agronomy*. 108: 237-307. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3).

Nelson DW, Sommers LE. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. En: Sparks DL, Page AL, Helmke RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnson CT, Sumner ME. (Eds.). *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*. SSA Book Series. 5: 961-1010. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>.

Neto CFS, da Silva RG, Maranhão SR, Torres AFF, Barbosa Filho JAD, Macedo VHM, Cândido MJD. 2022. Microclimate and animal thermal comfort indexes in different silvopastoral system arrangements in Caatinga. *International Journal of Biometeorology*. 66(3): 449-456. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02182-1>.

- Oliveira CC, Alves FV, de Almeida RG, Gamarra ÉL, Villela SDJ, Martins PGM. 2018. Thermal comfort indices assessed in integrated production systems in the Brazilian savannah. *Agroforestry Systems*. 92(6): 1659-1672. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0114-5>.
- Pallarés OR, Berretta EJ, Maraschin G. 2005. The South American Campos ecosystem BT - Grasslands of the World. *Grasslands of the World*. 5: 1-49. [papers3://publication/uuid/33F5DF5D-365C-4A56-AABA-F95C1245743C](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3333-3_1).
- Pastorini V, Acosta P, Ligrone A, Polla C, Tamosiunas M, Gravina V, Molina C. 2011. Estudio de los factores que explican la adopción de tecnologías que apuntan a la inclusión del rubro forestal en predios ganaderos. Uruguay. Ministerio de Gandería, Agricultura y Pesa. Informe Final. 1-99.
- Pent GJ, Fike JH, Orefice JN, et al. 2022. Silvopasture Practices En: Garrett HE, Jose S, Gold MA. (Eds.). *North American Agroforestry*. American Society of Agronomy. 3: 127 – 162.
- Peri PL, Dube F, Varella AC. 2016. Silvopastoral Systems in the Subtropical and Temperate Zones of South America: An Overview. En: Peri PL, Dube F, Varella AC. *Silvopastoral Systems in Southern South America*. *Advances in Agroforestry*. Springer. 11: 1-8. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-24109-8>.
- Peri PL, Banegas N, Gasparri I, Carranza CH, Rossner B, Pastur GM, Cavallero L, López DR, Loto D, Fernández P, Powel P, Ledesma M, Pedraza R, Albanesi A, Bahamonde H, Exclesia RP, Piñeiro G. 2017. Carbon sequestration in Temperate Silvopastoral Systems, Argentina. En: Montagnini F. (Eds.). *Integrating Landscapes: Agroforestry for Biodiversity Conservation and Food Sovereignty*. *Advances in Agroforestry*. 12: 454-478. doi: 10.1007/978-3-319-69371-2_19.
- Pezzopane JRM, Bernardi ACC, Bosi C, Oliveira PPA, Marconato MH, Faria Pedroso A, Esteves SN. 2017. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation

in integrated systems. *Agroforestry Systems*. 93(1): 39-49.
<https://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7>.

Pezzopane JRM, Nicodemo MLF, Bosi C, Garcia AR, Lulu J. 2019. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. *Journal of Thermal Biology*. 79: 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>.

Pezzopane JRM, Bosi C, Bernardi AC, Muller MD, Oliveira PPA. 2021. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 312: 107350. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350>.

Piñeiro G, Oesterheld M, Paruelo JM. 2006. Seasonal variation in aboveground production and radiation-use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*. 9(3): 357-373. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0013-x>.

Potschin MB, Haines-Young RH. 2011. Ecosystem services: Exploring a geographical perspective. *Progress in Physical Geography*. 35(5): 575-594. <https://doi.org/10.1177/0309133311423172>.

Raes L, Speelman S, Aguirre N. 2017. Farmers' Preferences for PES Contracts to Adopt Silvopastoral Systems in Southern Ecuador, Revealed Through a Choice Experiment. *Environmental Management*. 60(2): 200-215. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0876-6>.

Resende LO, Müller MD, Kohmann MM, Pinto LFG, Cullen Junior L, de Zen S, Rego LFG. 2019. Silvopastoral management of beef cattle production for neutralizing the environmental impact of enteric methane emission. *Agroforestry Systems*. 94(3): 893-903. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00460-x>.

Risso DF, Berretta EJ, Zarza A. 2001. Tecnologías para la mejora de la producción de forraje en suelos sobre cristalino. En: Risso DF, Berretta EJ. (Eds.). *Tecnologías*

- forrajeras para sistemas ganaderos de Uruguay. Montevideo. INIA. Boletín de Divulgación n.º 76. 39-65.
- Ritchie ME. 2020. Grazing management, forage production and soil carbon dynamics. *Resources*. 9(4): 49. <https://doi.org/10.3390/resources9040049>.
- Rodríguez J, Beard TD, Bennett EM, Cumming GS, Cork SJ, Agard J, Dobson AP, Peterson GD. (2006). Trade-Offs Across Space, Time, and Ecosystem Services. *Ecology and Society*. 11(1): 28. 10.5751/ES-01667-110128.
- Rose JM, Bliemer MCJ, Hensher DA, Collins AT. 2008. Designing efficient stated choice experiments in the presence of reference alternatives. *Transportation Research Part B*. 42(4): 395-406. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2007.09.002>.
- Ruto E, Garrod G. 2009. Investigating farmers' preferences for the design of agri-environment schemes: A choice experiment approach. *Journal of Environmental Planning and Management*. 52(5): 631-647. <https://doi.org/10.1080/09640560902958172>.
- Sancho L, Arocena I, Ordeig L. 2021. Definición, caracterización y cuantificación del área bajo sistemas silvopastoriles, para el seguimiento de las contribuciones establecidas en la Contribución Determinada a nivel Nacional de Uruguay. Proyecto URU/18/G31 «Creación de capacidades institucionales y técnicas para aumentar la transparencia en el marco del Acuerdo de París». Montevideo. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Informe final. 1-64.
- Saravia C, Astigarraga L, Lier EV, Bentancur O. 2011. Impact of Heat Waves on Dairy Cows in Salto (Uruguay). *Agrociencia Uruguay*. 15(1): 93-102. <https://doi.org/10.31285/agro.15.615>.
- Sejian V. 2012. Introduction. En: Sejian V, Naqvi SMK, Ezeji T, Lakritz J, Lal R. (Eds.). *Environmental stress and amelioration in livestock production*. Berlin. Springer. 1: 1-16. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29205-7>.

- Shrestha RK, Alavalapati JRR. 2004. Valuing environmental benefits of silvopasture practice: A case study of the Lake Okeechobee watershed in Florida. *Ecological Economics*. 49(3): 349-359. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.01.015>.
- Silva RG, Maia ASC. 2013. *Principles of Animal Biometeorology*. Dordrecht Springer. 2: 1-259. doi: 10.1007/978-94-007-5733-2.
- Smit GN, Rethman NFG. 1998. Root biomass, depth distribution and relations with leaf biomass of *Colophospermum mopane*. *South African Journal of Botany*. 64(1): 38-43. [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(15\)30825-5](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(15)30825-5).
- Somarriba E, Beer J, Alegre-Orihuela J, Andrade HJ, Cerda R, DeClerck F, Detlefsen G, Escalante M, Giraldo LA, Ibrahim M, Krishnamurthy L, Mena-Mosquera VE, Mora-Delgado JR, Orozco L, Scheelje M, Campo JJ. 2012. Mainstreaming Agroforestry in Latin America. En: Nair P, Garrity D. (Eds.). *Agroforestry - The Future of Global Land Use. Advances in Agroforestry*. Dordrecht. Springer. 9: 429-453. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4676-3_21.
- Soren NM. 2012. Nutritional Manipulations to Optimize Productivity during Environmental Stresses in Livestock. En: Sejian V, Naqvi SMK, Ezeji T, Lakritz J, Lal R. (Eds.). *Environmental stress and amelioration in livestock production*. Berlin. Springer. 1: 181-218. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29205-7_8.
- Street DJ, Burgess L. 2007. *The Construction of Optimal Stated Choice Experiments: Theory and Methods*. John Wiley & Sons. New Jersey. 1: 1-309. <https://doi.org/10.1002/9780470148563>.
- Taborda PAB, Saravia CT, Espasandin AC. 2018. Physiological responses and animal behavior in bonsmara-hereford crosses vs. Hereford purebred on environment stress. *Scientia Agricola*. 75(6): 479-485. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0042>.
- Tamosiunas M. 2015. La integración productiva de árboles y ganado en predios

- familiares: la visión del productor. *Agrociencia Uruguay*. 19(1): 150-157.
- Thom EC. 1959. The Discomfort Index. *Weatherwise*. 12(2): 57-61. <https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>.
- Tietenberg T, Lewis L. 2018. *Environmental and Natural Resource Economics*. Routledge. Taylor & Francis. New York. 11: 1-545. <https://doi.org/10.4324/9781315208343>.
- Torralba M, Fagerholm N, Hartel T, Moreno G, Plieninger T. 2018. A social-ecological analysis of ecosystem services supply and trade-offs in European wood-pastures. *Science Advances*. 4(5): eaar2176. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar2176>.
- Train KE. 2009. *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press. 2: 1-385. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805271>.
- Udawatta RP, Jose S. 2012. Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Practices in Temperate North America. *Agroforestry Systems*. 86: 225-242. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1630-8_2.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2013. Methodological tool Estimation of carbon stocks and change in carbon stocks of trees and shrubs in A / R CDM project activities Version 04.2. 32. United Nations. 1: 1-38. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/tools/ar-am-tool-14-v4.2.pdf>.
- Uruguay. Poder Ejecutivo. 2017. Decreto del Poder Ejecutivo 310/017. Política Nacional de Cambio Climático (PNCC) Primera Contribución Determinada a nivel Nacional al Acuerdo de París (CND) [En línea]. Consultado 3 de julio de 2022. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/310-2017>.
- Valente E, Chizzotti M, Oliveira C, Galvão M, Domingues S, Rodrigues A, Ladeira M. 2015. Intake, physiological parameters and behavior of Angus and Nellore bulls

- subjected to heat stress. *Semina: Ciências Agrárias*. 36(6): 4565-4574. 10.5433/1679-0359.2015v36n6Supl2p4565.
- Valtorta SC, Gallardo MR, Leva PE. 2004. Olas de calor: impacto sobre la producción lechera en la cuenca central de Argentina. X Reunión Argentina y IV latinoamericana de Agrometeorología. Asociación Argentina de Agrometeorología. Mar del Plata. Argentina.
- Van laer E, Moons CPH, Ampe B, Sonck B, Vandaele L, De Campeneere S, Tuytens FAM. 2015. Effect of summer conditions and shade on behavioural indicators of thermal discomfort in Holstein dairy and Belgian Blue beef cattle on pasture. *Animal*. 9(9): 1536-1546. <https://doi.org/10.1017/S1751731115000804>.
- Veissier I, Van laer E, Palme R, Moons CPH, Ampe B, Sonck B, Andanson S, Tuytens FAM. 2018. Heat stress in cows at pasture and benefit of shade in a temperate climate region. *International Journal of Biometeorology*. 62(4): 585-595. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1468-0>.
- Viera M, Rodríguez-Soalleiro R. 2019. A complete assessment of carbon stocks in above and belowground biomass components of a hybrid eucalyptus plantation in southern Brazil. *Forests*. 10(7): 1-12. <https://doi.org/10.3390/f10070536>.
- Warren CR. 2008. Does growth temperature affect the temperature responses of photosynthesis and internal conductance to CO₂? A test with *Eucalyptus regnans*. *Tree Physiology*. 28(1): 11-19. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.1.11>.
- Wu YH, Hung MC. 2016. Comparison of Spatial Interpolation Techniques Using Visualization and Quantitative Assessment. En: Hung MC. (Ed.). *Applications of Spatial Statistics*. Intech Open. 1: 17-34. <https://doi.org/10.5772/65996>.
- Yan G, Li H, Shi Z. 2021. Evaluation of thermal indices as the indicators of heat stress in dairy cows in a temperate climate. *Animals*. 11(8): 1-18. <https://doi.org/10.3390/ani11082459>.

- Yu Y, Chen JM, Yang X, Fan W, Li M, He L. 2017. Influence of site index on the relationship between forest net primary productivity and stand age. PLoS ONE. 12(5): 1-20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177084>.
- Zhang W, Dearing J, Hossain S, Dyke J, Augustyn AM. 2018. The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB). TEEB for Agriculture & Food: Scientific and Economic Foundations Report. Geneva. UN Environment. 1: 1-397.
- Zhu JJ. 2008. Wind Shelterbelts. Encyclopedia of Ecology. 5: 3803-3812. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00366-9>.
- Zuur AF, Ieno EN, Walker N, Saveliev AA, Smith GM. 2009. Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R. Springer. New York. 1: 1-563. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6>.

ANEXOS

Anexo 1. Características del suelo

Tabla 15. Descripción del perfil del suelo.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color	Textura	Estructura	Estructura grado	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Pegajosidad	Plasticidad	Concreciones (Ca)	Concreciones (Ca) - Tamaño
Ap	0-5	Hue 2,5 YR - 5/4	Franco - arcillosa	Bloques subangulares	Débil	Dura	Firme	Débil	Plástico	-	-
A	5-15	Hue 2,5 YR - 5/2	Franco - arcillosa	Bloques subangulares	Moderado	Dura	Firme	Pegajoso	Plástico	-	-
AB	15-27	Hue 2,5 YR - 4/3	Arcillosa a arcillo limosa	Bloques subangulares	Moderado	Muy dura	Muy firme	Pegajoso	Plástico	< 2 %	1-2 mm
Bt	27-55	Hue 2,5 YR - 4/1	Arcillosa	Bloques subangulares	Moderado	Muy dura	Muy firme	Pegajoso	Plástico	< 2 %	1-2 mm
BC	55-68	Hue 2,5 YR - 4/4	Arcillosa - con gravillas	Bloques subangulares	Moderado	Muy dura a extremadamente dura	Muy firme a extremadamente firme	Pegajoso	Plástico	< 2 %	1-2 mm
C	68-97	Hue 2,5 YR - 4/6	Arcillosa - con gravillas	Bloques subangulares	Moderado	Muy dura a extremadamente dura	Muy firme a extremadamente firme	Pegajoso	Plástico	< 2 %	2-5 mm

Tabla 16. Características físico químicas del suelo.

Horizonte	pH en agua	Acidez intercambiable	Acidez titulable	Na	K	Mg	Ca	Suma de bases	CIC pH7	C.O.	M.O.	Arena	Arcilla	Limo	Clase textural
		----- meq/100g -----			-----					----- % -----					
A	5,04	0,37	4,04	0,31	0,25	2,55	4,83	7,93	11,98	2,55	4,40	31,80	35,30	32,90	Franco-arcilloso
Bt	5,56	0,07	4,72	0,82	0,50	6,13	9,83	17,28	22,00	1,31	2,26	22,30	30,00	47,70	Arcilloso

Tabla 17. Densidad aparente del suelo y concentración de carbono en los estratos y posiciones evaluadas.

Profundidad (cm)	Densidad Aparente del Suelo (Mg m ⁻³)								
	CN			CJ			BM		
	Media	E. E.		Media	E. E.		Media	E. E.	
0-5	1,11	0,02	a	1,11	0,02	a	1,04	0,02	b
5-10	1,15	0,02	a	1,14	0,02	a	1,11	0,02	b
10-15	1,22	0,02	a	1,22	0,02	a	1,22	0,02	a
15-30	1,24	0,02	a	1,25	0,02	a	1,26	0,02	a
30-60	1,27	0,02	a	1,28	0,02	a	1,25	0,02	a

Profundidad (cm)	Concentración de carbono (%)								
	CN			CJ			BM		
	Media	E. E.		Media	E. E.		Media	E. E.	
0-5	3,57	0,04	a	3,45	0,04	a	2,73	0,04	b
5-10	2,18	0,04	a	2,25	0,04	a	2,21	0,04	a
10-15	1,82	0,04	a	1,84	0,04	a	1,80	0,04	a
15-30	0,90	0,04	b	0,89	0,04	b	1,11	0,04	a
30-60	0,87	0,04	b	0,84	0,04	b	0,97	0,04	a

E. E. = error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas (p-valor < 0,05).

Anexo 2. Producción de forraje

Tabla 18. Producción estacional de forraje.

Año	Estación	Posición	Media (kg ha ⁻¹)	E. E.	t	p
2019	Invierno	PS	786	13,7	11,35	0,0039*
2019	Invierno	SSP	511	13,7		
2019	Primavera	PS	1234	13,7	12,96	0,0056*
2019	Primavera	SSP	1028	13,7		
2020	Verano	PS	1958	13,7	15,82	0,0039*
2020	Verano	SSP	1451	13,7		
2020	Otoño	PS	1115	13,7	11,79	0,0002*
2020	Otoño	SSP	842	13,7		
2020	Invierno	PS	617	13,7	23,43	0,0002*
2020	Invierno	SSP	471	13,7		
2020	Primavera	PS	1292	13,7	12,30	0,0064*
2020	Primavera	SSP	1100	13,7		
2021	Verano	PS	1746	13,7	14,28	0,0001*
2021	Verano	SSP	1520	13,7		
2021	Otoño	PS	1030	13,7	17,82	< 0,0001*
2021	Otoño	SSP	878	13,7		

E. E. = error estándar. * Indica diferencias significativas (p-valor < 0,05).

Anexo 3. Encuesta sobre SSP

Encuesta sobre silvopastoreo



La presente encuesta es parte de una investigación llevada adelante en Facultad de Agronomía para evaluar los servicios de mitigación del estrés térmico animal y de almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles. Los resultados obtenidos darán herramientas para valorar estos sistemas y establecer medidas para su implementación.

A continuación, se presenta una breve explicación de los conceptos utilizados en este cuestionario, con el objetivo de garantizar su entendimiento.

Sistemas silvopastoriles

Modalidad de producción agraria que integra los componentes arbóreo, forrajero y animal en una misma unidad de manejo productivo.

La integración de los componentes mencionados busca cumplir con un conjunto de objetivos generalmente asociados con:

- Diversificar los productos e ingresos.
- Optimizar el uso del espacio productivo y de sus recursos.
- Generar interacciones positivas entre animales, árboles y pasturas.
- Mantener la diversidad vegetal en el sistema productivo.



Estrés térmico animal

Los animales presentes en los sistemas pastoriles poseen mecanismos de regulación de la temperatura corporal y, así, pueden enfrentar condiciones ambientales adversas. En condiciones de estrés térmico, se generan respuestas mayoritariamente de orden comportamental, fisiológica y productiva. Esta condición aumenta el gasto energético animal, lo que varía de acuerdo con la intensidad y duración del estrés térmico. En niveles moderados y persistentes por varios días, la tasa de ganancia de peso se puede ver afectada, así como la sanidad animal, además de la generación de otros disturbios.

Almacenamiento de carbono

El carbono es el principal componente de la materia orgánica y de la biomasa vegetal, así como de gran parte de los gases de efecto invernadero (GEI) presentes en la atmósfera. A su vez, el almacenamiento de carbono en los ecosistemas naturales o en los sistemas de producción agrarios es, generalmente, expresado en toneladas de carbono por hectárea. Para esto, las evaluaciones consideran la materia orgánica presente en los compartimentos: suelo, biomasa subterránea, biomasa aérea y residuos orgánicos. El aumento de los stocks de carbono en un sistema de producción agrario puede ser promovido a partir de la incorporación de prácticas que aumenten la relación entre el carbono fijado y liberado por la vegetación y suelos.

Cuestionario

1. Sexo:

Femenino

Masculino

2. Edad:

entre 18 y 30 años

entre 31 y 40 años

entre 41 y 50 años

entre 51 y 60 años

entre 61 y 70 años

mayor a 70 años

3. Nivel de instrucción

Universitaria completa

Universitaria incompleta

Técnica completa

Técnica incompleta

Secundaria completa

Secundaria incompleta

Primaria completa

Primaria incompleta

4. Vínculo con el establecimiento de producción agropecuaria (múltiple opción)

Productor

Encargado

Asesor técnico

Administrador

Otra

5. Organización jurídica del establecimiento que usted está vinculado (múltiple opción)

Productor/a persona física

Sociedad familiar

Sociedad anónima/sociedad de responsabilidad limitada/otras sociedades

Fondos de inversión

6. Departamentos de actuación en el/los sistemas de producción: (múltiple opción)

Artigas	Canelones	Cerro Largo	Colonia	Durazno
Flores	Florida	Lavalleja	Maldonado	Montevideo
Paysandú	Río Negro	Rivera	Rocha	Salto
San José	Soriano	Tacuarembó	Treinta y Tres	

7. ¿Cuál es el área total en hectáreas (ha) del conjunto de explotaciones que usted maneja?

*** Atención: la respuesta indicada en esta pregunta será utilizada en preguntas posteriores.**

Hasta 20 ha	Entre 20 y 50 ha	Entre 50 y 100 ha
Entre 100 y 200 ha	Entre 200 y 500 ha	Entre 500 y 1.000 ha
Entre 1.000 y 2.000 ha	Mayor a 2.000 ha	

8. ¿Qué proporción de sus ingresos proviene de la producción agropecuaria?

Entre 0 y 25 %

Entre 25 y 50 %

Entre 50 y 75 %

Entre 75 y 100%

**9. Seleccione los sistemas de producción presentes en el área manejada:
(múltiple opción)**

Producción animal

Ganadería de ciclo completo

Ganadería de cría

Ganadería de recria

Invernada

Lechería

Ovinos

Producción forrajera

Campo natural sin mejoramiento

Campo natural con mejoramiento

Forrajeras estivales

Forrajeras invernales

Praderas convencionales

Cultivos anuales

De verano (secano)

De invierno

Forestal

Forestación convencional con densidad de árboles superior a 1.000 árb./ha

Forestación convencional con densidad de árboles inferior a 1.000 árb./ha

Silvopastoril

Cortinas e islas de abrigo y sombra (servicio a la producción animal)

Árboles en filas simple

Árboles en filas dobles

Árboles en filas triples

Árboles en otros arreglos

En caso de haber respondido “Árboles en otros arreglos” describa este arriba.

10. En la secuencia, indique la proporción ocupada por cada categoría de uso del suelo respecto al área de manejo:

Campo natural-sin mejoramiento: _____

Campo natural-con mejoramiento: _____

Forrajeras estivales: _____

Forrajeras invernales: _____

Praderas convencionales: _____

Forestación convencional: _____

Cortinas de sombra y abrigo: _____

Silvopastoril: _____

11. Considerando las zonas más representativas del área pastoril manejada, ¿cuál es la carga ganadera (UG/ha)* practicada en cada época del año?

*** UG: unidad ganadera, representa los requerimientos de alimento para mantener una vaca de cría de 380 kg de peso vivo.**

Verano: _____

Primavera: _____

Otoño: _____

Invierno: _____

12. ¿Qué porcentaje del rodeo se destina a cada forma de producción ganadera?

Cría: _____

Recría: _____

Ciclo completo: _____

Invernada: _____

13. ¿Cuál es el grado de experiencia que usted tiene con el manejo arbóreo/forestal?

Ninguno.

Preservación del bosque nativo del predio de manejo.

Utilizo y/o recomiendo el uso de cortinas rompeviento e islas de abrigo y sombra.

Actúo con producción forestal convencional.

Actúo con la producción silvopastoril.

14. A continuación, se le presentarán escenarios productivos para responder las preguntas n.º 14 a 19.

Considere una superficie equivalente al 10 % del área que usted maneja.

Se solicita que usted **SELECCIONE la opción (pastoril o silvopastoril) de su preferencia** para ocupar el área de interés.

Cada opción está formada por las siguientes características:

- a) condición térmica del ambiente;
- b) incremento en carbono almacenado;
- c) carga ganadera.

* Considere un **tiempo mínimo de 10 años** para el mantenimiento de la opción elegida.

CARACTERÍSTICAS		OPCIÓN A	OPCIÓN B	OPCIÓN C
		PASTORIL	SILVOPASTORIL 1	SILVOPASTORIL 2
Ambiente térmico	Ola de calor	SEVERO	MODERADO	LEVE
Incremento en carbono almacenado	(toneladas/ha)	NULO	ALTO	BAJO
Carga Ganadera	Reducción en la carga ganadera anual (%)	0%	0%	0%

15. Considere una superficie equivalente al 10 % del área que usted maneja.

Se solicita que usted **SELECCIONE** la opción (pastoril o silvopastoril) de su **preferencia** para ocupar el área de interés.

Cada opción está formada por las siguientes características:

- a) condición térmica del ambiente;
- b) incremento en carbono almacenado;
- c) carga ganadera.

* Considere un **tiempo mínimo de 10 años** para el mantenimiento de la opción elegida.

CARACTERÍSTICAS	OPCIÓN A	OPCIÓN B	OPCIÓN C
	PASTORIL	SILVOPASTORIL 1	SILVOPASTORIL 2
Ambiente térmico durante olas de calor	SEVERO	LEVE	MODERADO
Incremento en carbono almacenado	NULO	BAJO	MEDIO
Reducción en la carga ganadera anual (%)	0 %	10 %	10 %

16. Considere una superficie equivalente al 10 % del área que usted maneja.

Se solicita que usted **SELECCIONE** la opción (pastoril o silvopastoril) de su **preferencia** para ocupar el área de interés.

Cada opción está formada por las siguientes características:

- a) condición térmica del ambiente;
- b) incremento en carbono almacenado;
- c) carga ganadera.

* Considere un **tiempo mínimo de 10 años** para el mantenimiento de la opción elegida.

CARACTERÍSTICAS	OPCIÓN A	OPCIÓN B	OPCIÓN C
	PASTORIL	SILVOPASTORIL 1	SILVOPASTORIL 2
Ambiente térmico durante olas de calor	SEVERO	MODERADO	MODERADO
Incremento en carbono almacenado	NULO	NULO	MEDIO
Reducción en la carga ganadera anual (%)	0 %	40 %	50 %

17. Considere una superficie equivalente al 10 % del área que usted maneja.

Se solicita que usted **SELECCIONE** la opción (pastoril o silvopastoril) de su **preferencia** para ocupar el área de interés.

Cada opción está formada por las siguientes características:

- a) condición térmica del ambiente;
- b) incremento en carbono almacenado;
- c) carga ganadera.

* Considere un **tiempo mínimo de 10 años** para el mantenimiento de la opción elegida.

CARACTERÍSTICAS	OPCIÓN A	OPCIÓN B	OPCIÓN C
	PASTORIL	SILVOPASTORIL 1	SILVOPASTORIL 2
Ambiente térmico durante olas de calor	SEVERO	MODERADO	LEVE
Incremento en carbono almacenado	NULO	BAJO	NULO
Reducción en la carga ganadera anual (%)	0 %	50 %	50 %

18. Considere una superficie equivalente al 10 % del área que usted maneja.

Se solicita que usted **SELECCIONE** la opción (pastoril o silvopastoril) de su **preferencia** para ocupar el área de interés.

Cada opción está formada por las siguientes características:

- a) condición térmica del ambiente;
- b) incremento en carbono almacenado;
- c) carga ganadera.

* Considere un **tiempo mínimo de 10 años** para el mantenimiento de la opción elegida.

CARACTERÍSTICAS	OPCIÓN A	OPCIÓN B	OPCIÓN C
	PASTORIL	SILVOPASTORIL 1	SILVOPASTORIL 2
Ambiente térmico durante olas de calor	SEVERO	LEVE	LEVE
Incremento en carbono almacenado	NULO	NULO	MEDIO
Reducción en la carga ganadera anual (%)	0 %	10 %	20 %

19. Considere una superficie equivalente al 10 % del área que usted maneja.

Se solicita que usted **SELECCIONE** la opción (pastoril o silvopastoril) de su **preferencia** para ocupar el área de interés.

Cada opción está formada por las siguientes características:

- a) condición térmica del ambiente;
- b) incremento en carbono almacenado;
- c) carga ganadera.

* Considere un **tiempo mínimo de 10 años** para el mantenimiento de la opción elegida.

CARACTERÍSTICAS	OPCIÓN A	OPCIÓN B	OPCIÓN C
	PASTORIL	SILVOPASTORIL 1	SILVOPASTORIL 2
Ambiente térmico durante olas de calor	SEVERO	MODERADO	LEVE
Incremento en carbono almacenado	NULO	NULO	BAJO
Reducción en la carga ganadera anual (%)	0 %	20 %	30 %

20. En una escala de 1 a 5, indique cuál de las opciones abajo mejor describe el nivel de importancia que usted atribuye a la mitigación del estrés térmico para los animales presentes en su sistema productivo:

1 - No considero relevante en el manejo productivo.

2 - Poco relevante para el manejo del sistema.

3 - Considero relevante conocer el tema; sin embargo, no lo considero en las decisiones de manejo.

4 - Considero relevante, he incorporado como medida de manejo productivo; sin embargo, es menos prioritario que otros aspectos (ej.: sanidad animal, oferta de forraje, tasa de ganancia de peso, entre otros).

5 - Considero relevante, he incorporado medidas de manejo para la mitigación del estrés térmico debido a su impacto sobre el resultado productivo y al aumento del bienestar animal.

21. En una escala de 1 a 5, indique cuál de las opciones abajo mejor describe el nivel de importancia que usted atribuye al secuestro y balance de carbono en el manejo de sistemas pastoriles y silvopastoriles:

1 - No lo considero relevante en el manejo productivo.

2 - Poco relevante para el manejo del sistema.

3 - Considero relevante conocer el tema; sin embargo, todavía no lo considero en las decisiones de manejo.

4 - Considero relevante, he incorporado medidas para aumentar el carbono secuestrado por el sistema productivo; sin embargo, es menos prioritario que otros aspectos (ej.: sanidad animal, oferta de forraje, tasa de ganancia de peso, entre otros).

5 - Considero relevante, he incorporado medidas para aumentar el carbono secuestrado por el sistema productivo debido a la importancia que atribuyo al tema.

22. En una escala de 1 a 5, indique cuál de las opciones abajo mejor describe el nivel de importancia que usted atribuye a la carga ganadera en el manejo de sistemas pastoriles y silvopastoriles:

1 - No considero relevante en el manejo productivo.

2 - Poco relevante para el manejo del sistema.

3 - Considero relevante conocer; sin embargo, todavía no lo considero en las decisiones de manejo.

4 - Considero relevante y lo utilizado como un indicador para el manejo productivo; sin embargo, es menos prioritario que otros aspectos (ej.: sanidad animal, calidad forrajera, tasa de ganancia de peso, entre otros).

5 - Considero relevante y lo utilizo como uno de los principales indicadores para el manejo productivo.

23. ¿Cuál de las siguientes opciones mejor describe su preferencia por adoptar o aumentar la superficie de manejo silvopastoril? (Usted puede seleccionar solamente una.):

No incorporaría un área silvopastoril, aun cuando fuera rentable.

Estaría dispuesto a incorporar un área silvopastoril aun cuando no generara un aumento de rentabilidad.

Estaría dispuesto a incorporar un área silvopastoril solamente si generara un aumento de rentabilidad.

24. A continuación, se le presenta un PROGRAMA HIPOTÉTICO para la incorporación de sistemas silvopastoriles.

El Programa de Adherencia Silvopastoril está destinado a los productores agropecuarios con interés en incorporar un área de manejo silvopastoril en sus predios. El programa no considera el establecimiento de áreas exclusivas para servicios a la ganadería, como cortinas rompevientos e islas de sombra y abrigo, debiendo las plantaciones estar orientadas a la producción forestal y ganadera de forma integrada.

Por la incorporación del área silvopastoril, se brinda una bonificación del 50 % de los costos de implantación del sistema para las actividades del primer año o, alternativamente, se otorga hasta un máximo de U\$S 200 por hectárea.

*** Se estiman valores de entre U\$S 400 a 600 por hectárea para las actividades del primer año de implantación de un área silvopastoril.**

Las superficies a implantar no deben superar el 25 % de la superficie predial o las 125 hectáreas por persona física y/o jurídica.

La adherencia al programa está condicionada a la aprobación de los Proyectos de Implantación, debiendo este ser presentado individualmente para cada unidad predial conteniendo los documentos de posesión de la tierra, una declaración de recursos naturales y croquis del área de implantación.

*** El uso de los recursos debe estar vinculado directamente con el proceso de implantación de las áreas de manejo silvopastoril, sin abarcar costos extras.**

Con base en esto, responda:

¿Usted estaría dispuesto a convertir una superficie PASTORIL a un SILVOPASTOREO por un período mínimo de 10 años participando del Programa de Adherencia Silvopastoril?

Sí estaría dispuesto a incorporar o expandir el área silvopastoril

No estaría dispuesto a incorporar o expandir el área silvopastoril

25. En caso de haber respondido "Sí, estaría dispuesto a incorporar o expandir el área silvopastoril" en la pregunta anterior, ¿cuál es el área (hectáreas) que usted estaría dispuesto a convertir? (escriba el valor en el campo abajo) - considere un máximo de 125 hectáreas.

26. Con base en la pregunta anterior, indique el nivel de importancia (en una escala de 1 a 5, siendo 1 de menor y 5 de mayor importancia) de cada uno de los siguientes factores en su decisión:

- Bonificación del costo de inversión: _____
- Posibilidad de renta futura con el componente forestal: _____
- Mantenimiento de la carga ganadera en el área silvopastoril: _____
- Tiempo mínimo de permanencia del sistema (10 años): _____
- Experiencia propia en la producción silvopastoril y forestal: _____
- Conocimiento sobre la experiencia de otras personas (productores/as; técnicos/as; entre otros): _____
- Superficie permitida (hasta un 25 % del predio o 125 ha por productor/a):

- Aumento en los niveles de carbono almacenados: _____
- Mitigación del estrés térmico animal: _____
- Otros efectos ambientales no mencionados: _____

En caso de haber respondido "Otros efectos ambientales no mencionados", descríbalos arriba.