

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CALIBRACIÓN DE DOS MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL ÁREA
FOLIAR EN PASTURAS**

por

**Bryan Nahuel PIRIZ FOGEL
Mahatma BLIXEN LEAO**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2023**

Tesis aprobada por:

Director -----
Ing. Agr. PhD. Pablo Boggiano

Ing. Agr. PhD. Mónica Cadenazzi

Ing. Agr. (MSc.) Daniel Formoso

Fecha: 18 de enero de 2023

Autores: -----
Bryan Nahuel Piriz Fogel

Mahatma Blixen Leao

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Agronomía por permitirnos acceder a nuestra formación académica.

A nuestro director de tesis Ing. Agr. PhD. Pablo Boggiano por permitirnos la oportunidad de elaborar este trabajo de tesis y el apoyo brindado durante la realización de dicho trabajo.

A Mónica Cadenazzi y Daniel Formoso por la ayuda e información brindada.

A nuestras familias por el apoyo brindado durante toda la carrera.

A Sully Toledo, por su guía en los aspectos formales de la presentación de la tesis.

A la barra de la EEMAC y amigos que compartimos a lo largo de la carrera.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. <u>ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR</u>	2
2.2. <u>IMPORTANCIA DEL ÁREA FOLIAR</u>	4
2.3. <u>FACTORES QUE AFECTAN AL IAF</u>	6
2.3.1. <u>Temperatura</u>	7
2.3.2. <u>Régimen hídrico</u>	8
2.3.3. <u>Intensidad lumínica</u>	9
2.3.4. <u>Nutrición mineral</u>	10
2.4. <u>CÁLCULO DEL IAF</u>	11
2.5. <u>MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL ÁREA FOLIAR <i>IN</i></u> <u><i>SITU</i> BASADOS EN LA LUZ INTERCEPTADA</u>	12
2.6. <i>Festuca arundinacea</i>	15
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	18
3.1. <u>LOCALIZACIÓN Y PERÍODO EXPERIMENTAL</u>	18
3.2. <u>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA Y ANTECEDENTES</u>	18
3.2.1. <u>Caracterización del sitio experimental</u>	18
3.2.2. <u>Área experimental</u>	18
3.3. <u>CLIMA</u>	19
3.4. <u>CONDUCCIÓN EXPERIMENTAL</u>	20
3.4.1. <u>Diseño y análisis estadístico</u>	20
3.4.2. <u>Materia seca presente</u>	21
3.4.3. <u>Procesamiento de muestras en el laboratorio</u>	21
3.5. <u>VARIABLES DETERMINADAS</u>	21
3.5.1. <u>Área foliar específica</u>	21
3.5.2. <u>Ceptómetro</u>	22
3.5.3. <u>Altura de la pastura</u>	22
3.6. <u>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</u>	22
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	23
4.1. <u>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA</u>	23

4.1.1. <u>Temperatura</u>	23
4.1.2. <u>Precipitaciones</u>	23
4.1.3. <u>Relación de la altura de la pastura con las diferentes variables</u>	25
4.1.4. <u>Relación entre altura y materia seca de lámina por momento de medición</u>	26
4.1.5 <u>Relación entre altura y materia seca de lámina por parcela en todas las fechas</u>	28
4.1.6 <u>Relación entre altura y materia seca de lámina por parcela por momento de medición</u>	28
4.1.7 <u>Relación entre altura y materia seca total</u>	30
4.1.8 <u>Relación entre altura y materia seca total por momento de medición</u>	30
4.1.9 <u>Relación entre altura y materia seca total por parcela a través de las fechas</u>	31
4.1.10 <u>Relación entre altura y materia seca total por parcela por momento de medición</u>	32
4.1.11 <u>Relación entre altura de la pastura y PAR abs.</u>	33
4.1.12 <u>Relación entre altura y PAR abs. por momento de medición</u>	33
4.1.13 <u>Relación entre altura y PAR abs. por parcela en todas las fechas</u>	35
4.1.14 <u>Relación entre altura de la pastura y PART general</u>	36
4.1.15 <u>Relación entre altura y IAF medido</u>	38
4.1.16 <u>Relación entre altura y IAF cep</u>	39
4.1.17 <u>Relación entre altura y IAF cep. por fecha</u>	39
4.1.18 <u>Relación entre altura y IAF cep. por parcela</u>	40
4.1.19 <u>Relación entre IAF medido y IAF cep. general</u>	40
4.1.20 <u>Relación entre IAF medido y IAF cep. por momento de medición</u>	41
4.1.21 <u>Relación entre IAF medido y IAF cep. por parcela</u>	41
4.1.22 <u>Relación entre IAF medido y IAF cep. por parcela por fecha de medición</u>	42
4.1.23 <u>Relación entre MS lámina y MS total general</u>	43
4.1.24 <u>Relación entre MS lámina y MS total por momento de medición</u>	43
4.1.25 <u>Relación entre MS lámina y MS total por parcela</u>	44
4.1.26 <u>Relación entre MS lámina y MS total por parcela por momento de medición</u>	45
4.1.27 <u>Relación entre MS lámina y IAF medido</u>	46
4.1.28 <u>Relación entre MS lámina y IAF medido por momento de medición</u>	47
4.1.29 <u>Relación entre MS lámina y IAF medido por parcela</u>	47
4.1.30 <u>Relación entre IAF medido y PAR abs. general</u>	48
4.1.31 <u>Relación entre IAF medido y PAR abs. por momento de medición</u>	48
4.1.32 <u>Relación entre IAF medido y PAR abs. por parcela</u>	50
4.1.33 <u>Relación entre IAF medido y PAR abs. por parcela por momento de medición</u>	50

5. <u>CONCLUSIONES</u>	55
6. <u>RESUMEN</u>	56
7. <u>SUMMARY</u>	57
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	58
9. <u>ANEXOS</u>	70

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Figura No.	Página
1. Croquis del área experimental	19
2. Temperatura máxima, mínima y media entre julio y setiembre de 2019 y las medias de los mismos meses del período 1969-2019.....	23
3. Precipitaciones de julio a setiembre de 2019 y promedios históricos del período 1970-2020.....	24
4. Evolución del almacenaje de agua en el suelo (alm.) y evapotranspiración real (ETR) con respecto al 40% del agua potencialmente disponible neta (APDN 40%), y períodos de déficits-excesos hídricos entre el 20 de junio y 30 de setiembre.....	25
5. Materia seca de lámina en función de la altura período (jul.-set. 2019)	32
6. Correlaciones entre variables en el total de parcelas y momentos de medición.....	52
7. Correlaciones entre variables en el total de parcelas y momentos de medición.....	53

Tabla No.

1. Coeficiente de correlación de Pearson entre altura (cm) y las variables MS total, MSL, PAR abs., PART, IAF cep. e IAF medido en todas las parcelas y fechas de medición, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	26
2. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y MS lámina, por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	27
3. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y MS lámina, por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	28
4. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y MS total., por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	30
5. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y MS total, por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	31
6. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y PAR abs., por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	34
7. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y PAR abs., por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	35
8. Altura (cm) y PAR abs., por parcela, PAR/KgMSL y KgMSL/cm.....	36
9. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y PART, por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	37
10. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y PART, por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	38
11. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y IAF cep., por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	40
12. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) e IAF cep. Por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	40

13. Coeficientes de correlación de Pearson entre IAF medido y IAF cep., general, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	41
14. Coeficientes correlación de Pearson entre IAF medido y IAF cep., por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	42
15. Coeficientes correlación de Pearson entre IAF medido y IAF cep., por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia	42
16. Coeficientes correlación de Pearson entre MS lámina y MS total general, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	44
17. Coeficientes correlación de Pearson entre MS lámina y MS total por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	44
18. Coeficientes correlación de Pearson entre MS lámina y MS total por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	45
19. Coeficientes correlación de Pearson entre MS lámina y IAF medido general, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	47
20. Coeficientes correlación de Pearson entre MS lámina y IAF medido por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	47
21. Coeficientes correlación de Pearson entre MS lámina y IAF medido por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia	48
22. Coeficientes correlación de Pearson entre IAF medido y PAR abs. general, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	48
23. Coeficientes correlación de Pearson entre IAF medido y PAR abs. por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	49
24. Coeficientes correlación de Pearson entre IAF medido y PAR abs. por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia.....	50

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay, la producción animal ha sido históricamente a base pastoril. En las últimas décadas se ha incrementado el uso de pasturas sembradas como forma de incrementar la producción.

Las pasturas son la fuente más económica de alimentación para los rumiantes, por lo que aumentar la productividad y la calidad de éstas permite así aumentar la producción animal sin descuidar el aspecto económico.

En estos casos, la estimación de la oferta forrajera se basa principalmente en muestreos de forraje disponible en campo. Estas estimaciones deben ser dinámicas ya que son necesarias para ajustar la carga animal a la cantidad de forraje presente.

Actualmente, con la disponibilidad de herramientas que permiten estimar de forma indirecta la biomasa de las pasturas, pasa a ser importante el recabar datos a modo de generar información, como también confianza en cuanto a los mismos.

En este marco, el trabajo de investigación tuvo como objetivo realizar la calibración de un método para la estimación del área foliar en pasturas, basándose en una de las variables más importante en la medición del forraje disponible en un determinado momento, que es el índice de área foliar (IAF).

Este proporciona información acerca de la cantidad de superficie fotosintética presente en relación con la superficie total del ecosistema o área de estudio y se relaciona con procesos vitales como la fotosíntesis, la respiración y la productividad. Ya que son las estructuras foliares las que interceptan y por tanto regulan la cantidad de luz que va penetrando a través del dosel y la reflejada en última instancia, la cual, en conjunto con la radiación incidente son los parámetros utilizados por el ceptómetro para calcular la fotosíntesis realizada.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para mostrar el conocimiento actual de las variables que son medidas para estimar la oferta de forraje, se realizó la siguiente revisión bibliográfica. En la misma están planteadas las principales variables de interés en la estimación del forraje disponible, las cuales serán nombradas y se profundizarán a continuación.

2.1 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

El IAF (Watson, 1947) es la relación entre el área de hojas y el área cubierta de suelo por éstas, y expresa la densidad de hojas de una determinada pastura en términos de superficie. Williams (1980), por su parte, define el índice de área foliar como la proporción de área de hojas en la superficie que soporta el crecimiento.

Las combinaciones de las variables morfogenéticas elementales (tasa de elongación foliar, tasa de aparición de hojas y vida media de las hojas) explican las tres principales características estructurales de las pasturas: tamaño de hoja, densidad de macollos y hojas/macollo.

Estas últimas en su conjunto definen el IAF ($\text{IAF} = \text{área foliar/hoja} \times \text{número de hojas/macollo} \times \text{densidad de macollos}$) responsable de la intercepción de luz y, por lo tanto, de la producción de carbohidratos (Chapman y Lemaire, 1993).

También se define el IAF óptimo como aquel capaz de interceptar el 95 % de la radiación, donde el crecimiento foliar se torna lineal, y coincide con una tasa máxima de crecimiento de la pastura (Brougham, 1956).

Según Carámbula (1997), el IAF óptimo depende de cada especie y pastura. Es mayor en gramíneas que en leguminosas, y es más bajo en aquellas gramíneas y leguminosas con mayor proporción de hojas horizontales. Luego de alcanzado el IAF óptimo, la pastura crece a su máxima tasa, aumentando el IAF más allá de este valor óptimo. Esto resulta en que algunas especies muestran una disminución de la tasa de crecimiento hasta hacerse nula, no registrándose un aumento posterior en el rendimiento de materia seca por hectárea (Smethan, 1981).

Cuando a una pastura se le permite acumular el máximo de material verde, luego comienza a estabilizar su producción debido a que se igualan la tasa de producción y muerte del material vivo (IAF techo, Hodgson 1990, Carámbula 1997). Afirmando este concepto Chapman y Lemaire (1993) señalan que el rendimiento máximo se alcanza cuando las tasas de producción bruta de los tejidos son igualadas por las tasas de muerte y no hay acumulación neta en términos de biomasa.

Esta producción techo de la pastura o producción máxima depende de la densidad de hojas, del número de hojas vivas por tallo y del tamaño de las hojas. Dichos

parámetros dependen del genotipo y de las condiciones medioambientales (Nabinger, 1997).

De acuerdo con Brougham (1956), en las pasturas formadas por varias especies el valor del IAF varía con el número de especies que componen la pastura y con los porcentajes de aporte de cada una de ellas.

Según Carámbula (1977), la capacidad de intercepción de luz varía entre especies y cultivares. Está más relacionada con la arquitectura (estructuras de crecimiento) que con el área foliar en sí.

Para Williams (1980), la estructura del follaje tiene gran importancia sobre la eficiencia fotosintética de la pastura, producto de que se ha determinado que la estructura de ésta en estado vegetativo es menos eficiente para utilizar la luz que cuando está en estado reproductivo. También, que las hojas jóvenes son más eficientes que las viejas y que las hojas formadas con más luz son más eficientes que las formadas a la sombra. La tasa de crecimiento (TC) se incrementa en la medida que aumenta la cantidad de energía luminosa absorbida por la planta, relacionada directamente con el área foliar presente (Smethan, 1981).

La duración de vida de las hojas permite determinar características esenciales de la dinámica de crecimiento de una pastura sometida a defoliación, al poder estimar el período corte-inicio de senescencia, donde la producción cosechable es equivalente a la producción bruta menos la senescencia, y la máxima cantidad de biomasa viva se hace equivalente al rendimiento “techo” (Chapman y Lemaire, 1993).

En condiciones en las que el crecimiento no es limitante, el potencial de rebrote de una pastura está determinado por la velocidad de emisión de hojas. El tamaño de las hojas es igualmente determinado por la velocidad de aparición. La duración del período de elongación de una hoja es inversamente proporcional a su velocidad de elongación (Nabinger, 1997).

Desde el punto de vista de la pastura, Millot et al. (1987) señalan que el rebrote, luego de una defoliación, será el resultado de dos factores de importancia variable de acuerdo con características de las diferentes especies que la componen: el área foliar remanente y el nivel de sustancias de reserva. Estos factores están íntimamente relacionados entre sí, dado que la acumulación de sustancias de reserva depende del proceso de fotosíntesis y esta depende de la superficie de área foliar de las plantas (Carámbula, 2004). Cuanto mayor sea la proporción del total de la planta que quede después del pastoreo, más rápida será la recuperación de ésta (Smethan, 1981).

2.2 IMPORTANCIA DEL ÁREA FOLIAR

El tejido foliar juega un papel clave en procesos de intercambio de energía y gases entre el ecosistema terrestre y la atmósfera. Conocer la cantidad y distribución espacial de dicho tejido es fundamental para poder estimar la interceptación de radiación solar, de agua de lluvia y, por lo tanto, la fotosíntesis, transpiración y respiración de las hojas (Olivas et al., 2013). Como resultado de dichas interacciones, el área foliar variará conforme a procesos hidrológicos, biogeoquímicos y biofísicos (Peduzzi et al., 2012). De la misma manera, el reclutamiento de nuevas plantas en un sitio, su crecimiento, su distribución espacial y temporal se verán afectados directamente por la cantidad de tejido foliar en el dosel que intercepte la luz solar e intercepte y transpire el agua (Moser et al., 2007).

El área foliar, junto con la biomasa, tiene una estrecha relación con la productividad, lo que a su vez se relaciona con el almacenamiento de carbono y el crecimiento de las plantas. Así, este índice es una variable clave en modelos ecológicos regionales y globales (Bonan 1993, Yang et al. 2006).

El IAF es una de las características más importantes de la estructura del dosel, ya que afecta las condiciones micrometeorológicas (luz, agua, temperatura, humedad, etc.) y regula los intercambios de energía y de materia (agua y carbono) entre la vegetación y la atmósfera (Chason et al. 1991, Bréda 2003).

Cualquier cambio en el IAF (por heladas, tormentas, defoliación, sequía, etc.) es acompañado por modificaciones en la productividad de los árboles (Bréda, 2003). Por su parte, la biomasa aérea es definida por FAO (Penman et al., 2003) como todo el tejido vegetal que se encuentra por encima del suelo incluyendo el tronco, el tocón, las ramas, la corteza, las semillas y las hojas. Si bien la biomasa aérea se encuentra más estrechamente relacionada con la producción primaria neta (PPN) y las reservas de carbono que el IAF, su medición directa es mucho más laboriosa, dado que implica la cosecha del individuo completo y su transporte al laboratorio.

Esto requiere de mucho tiempo y recursos, por ende, dificulta obtener medidas repetidas en el espacio y el tiempo. Sin embargo, es posible estimar la biomasa aérea de manera precisa con la utilización de ecuaciones alométricas. La contra parte de dichas ecuaciones está en que su obtención es definitivamente costosa (tanto en tiempo como en recursos monetarios) y destructiva.

Por esto, en la mayoría de los casos los investigadores se ven obligados a utilizar ecuaciones creadas en sitios distintos al que están trabajando, que además suele tener una composición florística distinta, lo que puede derivar en un error importante en la precisión de los valores de biomasa obtenidos. El IAF es una variable que se relaciona con la productividad primaria y cuya medición requiere de menor inversión de tiempo y

presupuesto. Diversos estudios han demostrado que el IAF se encuentra fuertemente ligado a la producción de biomasa, además de ser uno de los mayores controles sobre la producción primaria (Cowling y Field 2003, Pokorný et al. 2008, Vyas et al. 2010, Gao et al. 2013).

Así, el IAF suministra información para poder estimar, de manera indirecta, la PPN, el aumento de biomasa aérea de los individuos y sus implicaciones en los ciclos del carbono y otros nutrientes (Jarlan et al., 2008). Por otra parte, el IAF es más sensible al estrés y responde con mayor rapidez a los cambios en el ambiente, por lo que puede ser utilizado como indicador más temprano que la biomasa aérea, que suele ser más estable a través de las variaciones interanuales, dado que la mayoría se concentra en el tronco.

Bajo régimen de pastoreo, según las especies, las sustancias que se acumularon durante el crecimiento vegetativo van en aumento y, una vez que se produce la defoliación, estas reservas disminuyen al movilizarse hacia partes en crecimiento (desarrollo y crecimiento de nuevas hojas) y también como sustrato para la respiración (Carámbula, 1997).

Las pasturas naturales del Uruguay tienen una composición botánica variable entre regiones, pero con similar distribución entre tipos vegetativos (Rosengurtt, 1946), manifestando particular dominancia de gramíneas. Debido a esta particularidad, el proceso fisiológico del macollaje es de vital importancia para el crecimiento de las pasturas. Dicho proceso comprende tanto el desarrollo de los puntos de crecimiento, como de nuevas hojas encargadas de realizar fotosíntesis.

La población de macollos por unidad de superficie de una pastura está determinada por la densidad de plantas y por la velocidad de macollaje de éstas. La densidad sería difícilmente manejable en pasturas naturales, en tanto la velocidad de macollaje es exponencial, siempre que ningún factor ambiental o intrínseco a la planta sea limitante (Carámbula, 2002).

Los factores que pueden afectar el macollaje son: carencia de nutrientes, principalmente nitrógeno, desbalance entre la fotosíntesis y la respiración, debido a baja intensidad de luz y temperatura, y baja disponibilidad hídrica (Langer, citado por Carámbula, 1997). Esto varía a lo largo del año estacionalmente (Carámbula, 1997).

La transición de estado vegetativo a reproductivo implica los procesos de alargamiento de entrenudos e iniciación floral (Carámbula, 1997). La iniciación floral indica no solo la finalización del período útil como productor de hojas, sino el comienzo de la dominancia apical, teniendo el mismo un efecto negativo en el proceso de macollaje al inhibir la aparición de macollos. También se produce un porcentaje grande de mortalidad de macollos y una marcada inactividad de las raíces. La importancia

relativa de estos efectos depende de la proporción de macollas fértiles de cada especie y de cada planta individual (Carámbula, 1997).

De acuerdo con Nabinger (1997), factores del medio ambiente que pueden favorecer el macollaje pueden, a su vez, tener un efecto negativo cuando el IAF aumenta y la competencia entre macollas crece. Carámbula (2002) constata, durante el transcurso del año, una competencia muy marcada por metabolitos y nutrientes entre macollaje, formación de hojas y formación de semillas. La predominancia de cada proceso se rige por factores genéticos (sustancias de crecimiento) y factores ambientales (luz, temperatura, fotoperíodo y nutrientes).

2.3 FACTORES QUE AFECTAN AL IAF

El estudio de las pasturas naturales debería analizarse teniendo en cuenta la totalidad de los componentes del ecosistema, entre estos, los herbívoros, las especies vegetales, componentes bióticos del suelo, el ambiente físico que los contiene y su interrelación. Los únicos factores del medio que no pueden ser modificados en la escala agronómica son la radiación y la temperatura. En la ausencia de otras limitaciones, la primera variable representa la oferta del medio y la segunda determina la demanda. Todos los demás factores como nutrientes, agua, etc., son posibles de ser manipulados a través de las prácticas agronómicas (Nabinger, 1997).

Las respuestas de las distintas plantas forrajeras a las variables ambientales no controlables son el primer paso para definir su potencial productivo (Nabinger, 2006). Eso supone una etapa en la que los factores controlables (agua y nutrientes) estén disponibles en niveles óptimos. De esa forma, se podrá modelar las respuestas morfogénicas (tasa de elongación de hoja, tasa de elongación de macollo o estolón y longevidad de la hoja) de diferentes genotipos a variaciones en las condiciones de temperatura, radiación solar y fotoperíodo para explicar las variaciones en la velocidad de acumulación de forraje.

La vegetación de una región es determinada, principalmente, por factores climáticos que abarcan variables de temperatura, régimen pluviométrico, luminosidad y la interacción con el suelo. Uruguay se trata de una región de transición entre los ambientes templado y subtropical, bastante indefinida y con características tan específicas que permite afirmar que no existe un clima concreto, sino simplemente un estado del tiempo (Carámbula, 1997).

Estas condiciones propias de Uruguay son aptas para el crecimiento de un amplio número de plantas forrajeras a lo largo del año, tanto de clima templado como subtropical, conformando así tapices muy complejos en cuanto a diversidad de especies y ciclos productivos.

Los factores ambientales no solamente afectan la producción, sino que hacen que la composición botánica de los campos naturales sea heterogénea y variable de acuerdo con el área geográfica del país (Boggiano et al., 2002), el tipo de suelo (Rosengurtt 1943, 1979, Millot et al. 1987, Boggiano et al. 2002) y las prácticas de manejo de los potreros en los establecimientos (Rosengurtt 1943, 1946, 1979, Millot et al. 1987).

2.3.1 Temperatura

Los cambios estacionales en la temperatura ambiental son resultado de los patrones de movimiento de las grandes masas de aire, pero están determinados localmente por la llegada de radiación a la superficie del cultivo y el suelo. Durante períodos de alta radiación incidente en verano, estas superficies tienen una pequeña ganancia neta de energía mientras que en invierno tienen una pequeña pérdida neta de energía.

Por la inercia térmica de la masa de suelo, los cambios estacionales en la temperatura promedio de la superficie y del aire cercano a ésta ocurren con un poco de retraso con respecto a los cambios estacionales en radiación incidente. Como resultado, las máximas temperaturas debajo del suelo ocurren luego de las máximas temperaturas en superficie. La temperatura mínima para el crecimiento de las gramíneas templadas es de 0 °C, en tanto que las leguminosas producen muy poco por debajo de 5 °C (Escuder, 1993).

La temperatura es la señal ambiental primaria que gradúa la demanda del programa morfogénico y la oferta del sistema de asimilación (Gillet, 1984). En regla general, el efecto de la temperatura es más importante sobre la elongación de las hojas (respuesta exponencial) que sobre la velocidad de aparición (respuesta lineal). De esto resulta que el componente total de hojas aumente con la temperatura (Lemaire, citado por Nabinger, 1997).

La temperatura no solo afecta la tasa de aparición de hojas y su senescencia, sino también el tamaño y forma final de esta, incluso su tasa y duración de expansión. Con temperaturas más altas, las hojas se extienden más rápidamente y tienden a ser más largas que anchas, llegando a tener una mejor área específica de lámina, y proporcionalmente más lámina que vaina (Mitchel, citado por Vallentine, 1990). Su mayor largo de lámina puede deberse a la mayor expansión celular y aumento en su tamaño que con respecto al número. El número de macollos por planta o por unidad de área está determinado por la tasa y la estacionalidad de la aparición y muerte de macollos. La tasa de macollos es muy dependiente de la temperatura (Briske, 1991).

La tasa de extensión de la hoja en crecimiento es muy sensible a la temperatura, respondiendo a cambios en el muy corto plazo (minutos). El ancho de la hoja refleja el

número de filas de células, y esto, de hecho, evidencia la base de la circunferencia basal del ápice vegetativo aún en etapas de primordio. El crecimiento radicular tiene un óptimo de temperatura menor que el de macollaje y, por lo tanto, la relación parte aérea/raíz normalmente aumenta con la temperatura (Morley, 1978).

El clima tiene un efecto directo en la vegetación, por la temperatura, e indirecto a través del suelo, por el agua disponible.

2.3.2 Régimen hídrico

La producción de forraje de una pastura depende de la disponibilidad de volúmenes adecuados de agua en el suelo. Estos volúmenes de agua son afectados básicamente por factores climáticos y edáficos, siendo fundamentales para que se cumplan eficientemente la mayoría de los procesos biológicos vitales en las células de las plantas, ya que éstos deben realizarse en un medio acuoso (Kramer, citado por Carámbula, 1997).

Según Wilson (1973), las precipitaciones anuales son el factor más importante en la determinación de los límites de distribución de las plantas. Igualmente, su influencia puede variar en función de factores secundarios como son la distribución estacional e intensidad de la precipitación, la topografía, la velocidad del viento, la permeabilidad y capacidad de retención de agua en el suelo, y la temperatura.

Desde el punto de vista agroclimatológico el régimen hídrico de un territorio no se puede caracterizar solamente con base en la precipitación, ya que depende también de la evaporación, infiltración, escurrimiento y capacidad de almacenaje de agua de los suelos. No obstante, la precipitación es un parámetro esencial del clima, ya que en último término es la fuente de agua más importante para el suelo (Durán, 1985).

En Uruguay, la pluviosidad alcanza valores entre 930 y 1300 mm anuales en el Sur y en el Norte respectivamente, pero con una distribución estacional entre años muy irregular (Corsi, 1984). No toda el agua almacenada en el suelo está disponible para las plantas. Se debe recordar que el agua del suelo está sometida a una serie de campos de fuerza que determinan su potencial y su movimiento en el mismo, ambos determinados por la capilaridad y la adsorción que se oponen a la salida del agua, lo que implica que no toda el agua que un suelo puede almacenar está disponible para las plantas (Sawchik, citado por Carámbula, 1997).

El agua disponible es aquella que se encuentra en un rango de presión tal que las raíces de las plantas son capaces de ejercer una fuerza extractiva mayor a la energía con la que esta es retenida por el suelo, logrando ser absorbida por ellas (Thien, citado por Carámbula, 1997).

Existen diferencias entre especies C3 y C4 en la eficiencia de uso de agua. Las C4 realizan un cierre particular de estomas, para la conservación del agua, pero sin restricción de la fotosíntesis. Esto permite a las plantas producir mayor cantidad de materia seca por unidad de agua transpirada que en las especies templadas. Las deficiencias moderadas de agua derivan en un crecimiento reducido de la pastura, pero el momento de ocurrencia del déficit puede tener efectos más agudos si coincide con el momento de formación de macollos (Morley, 1978).

Sequías prolongadas pueden provocar muerte de plantas y, si es acompañado por pastoreos severos, la cubierta vegetal se puede reducir sensiblemente (Millot et al., 1987).

Según Nabinger (1997) el déficit de agua provoca una disminución del crecimiento del índice foliar, o también se puede decir que determina una disminución de la cantidad de energía interceptada. La actividad fotosintética de una hoja puede ser controlada por la intensidad de intercambio gaseoso entre la atmósfera interna de la hoja y la atmósfera externa. Estos intercambios de gas se efectúan a través de las estomas, cuyo grado de apertura depende, en gran parte, del grado de hidratación de los tejidos foliares.

2.3.3 Intensidad lumínica

El ambiente lumínico de una cubierta vegetal es normalmente muy heterogéneo. La parte superior de ésta recibe la totalidad de la luz incidente, disminuyendo exponencialmente con la profundidad dentro de los estratos foliares. La intensidad de la luz en una localidad determinada depende de la latitud, de la estación del año y de las variaciones diarias. La capacidad de una planta o cultivo para interceptarla depende del hábito de crecimiento, del ángulo de incidencia de la luz, así como también de la transmisión de la luz a través de la trama de vegetación (Carámbula, 2002).

La producción de materia seca de una pastura en activo crecimiento está limitada por la utilización de la luz, dado que el efecto más importante de su intensidad está relacionado a la tasa fotosintética (Ludlow, 1976).

La base del crecimiento es la fotosíntesis, proceso por el que las plantas forman sus carbohidratos a partir del dióxido de carbono atmosférico y agua en presencia de luz solar; con esto y junto con nutrientes minerales, nitrógeno y agua se forman todos los constituyentes de las plantas. Por esto, la cantidad de energía que recibe la pastura es de gran importancia en la producción de materia seca (Williams, 1980).

La competencia por la intercepción de la luz es importante e intensa durante el crecimiento de la pastura y, por lo tanto, la luz incidente y la capacidad de respuesta de

ésta son uno de los factores más importantes para la producción y estabilidad de la pastura. El manejo del factor lumínico es de vital importancia para el rendimiento y persistencia de la pastura. Un determinado manejo de la defoliación estará, entonces, fijando un valor de luminosidad interceptada y, consecuentemente, determinará condiciones favorables o adversas para expresión del rendimiento, y a largo plazo su estabilidad y persistencia (Leconte, 1986).

Así, para la máxima producción se deben adoptar adecuados sistemas de defoliación, manteniendo el mejor promedio de IAF para la sucesión de defoliaciones bajo condiciones no limitantes de agua y nutrientes. En una pastura, luego de una defoliación, el sombreado entre hojas es mínimo y la fotosíntesis por unidad de área de hoja es máxima, pero el crecimiento es bajo. Algo de la luz solar puede estar incidiendo en el suelo sin ser utilizada. A medida que empieza el crecimiento, aumenta el índice de área foliar y aunque la fotosíntesis por unidad de área de hoja disminuya, producto de un mayor sombreado entre ellas, la eficiencia de utilización de luz y la tasa de crecimiento aumentan (Williams, 1980).

Teóricamente, las máximas tasas de crecimiento y rendimientos ocurren cuando la pastura se mantiene con el IAF óptimo. Sin embargo, las hojas disminuyen en eficiencia con la edad por lo que la pastura debe necesariamente ser cosechada periódicamente para prevenir pérdidas por senescencia. Asimismo, el valor nutritivo también disminuye con el aumento de la edad (Williams, 1980).

2.3.4 Nutrición mineral

El nitrógeno es el nutriente vital que limita la producción de forraje de todas las pasturas. Sin embargo, el fósforo es una de las principales llaves para resolver la disponibilidad de dicho elemento, a través de su efecto beneficioso sobre el crecimiento de las leguminosas. También contribuye a lograr una mejor eficiencia sobre el uso del nitrógeno aportado por ellas a las gramíneas asociadas o por el fertilizante nitrogenado a las gramíneas puras (Carámbula, 2002).

Existen tres fuentes principales para aportar nitrógeno a las pasturas:

1- Reciclaje por mineralización del suelo y residuos vegetales y animales. Este nitrógeno es producido gracias a la actividad de bacterias nitrificadoras sobre residuos vegetales y animales. Con la mineralización y el reciclaje no alcanza para reponer el nitrógeno extraído por las plantas, por lo que es incapaz de promover niveles altos de producción de las pasturas.

2- Aplicación de fertilizantes nitrogenados. Una buena pastura requiere, para alcanzar una alta producción de forraje, la disponibilidad de abundantes cantidades de

nitrógeno. Para producir 10000 kg de materia seca se necesitan 300 kg/N/ha que deben ser provistos de la forma más eficiente y económica posible.

3- Asociación con leguminosas. El nitrógeno logrado mediante el proceso de simbiosis es transferido a la pastura por excreción directa desde los nódulos o por descomposición de raíces o nódulos cuando mueren las plantas. En Uruguay, puede considerarse que por cada tonelada de materia seca producida por una leguminosa se fijan alrededor de 30 kg de nitrógeno (MGAP. Departamento de Microbiología de suelos).

La respuesta de las gramíneas frente a distintos niveles de nutrientes se expresa en un mayor tamaño de hoja, aunque el mayor efecto se da en la tasa de macollaje. Existe un mayor número de macollos a altos niveles de nutrientes (fundamentalmente nitrógeno, pero también fósforo y potasio). Por lo que se producen más hojas al determinar un aumento del área foliar de la planta. Las gramíneas estivales (C4) realizan un aprovechamiento del nitrógeno más eficiente (Carámbula, 1997), lo que les confiere ventajas competitivas en situaciones limitantes frente a gramíneas templadas (C3).

2.4 CÁLCULO DEL IAF

El IAF es la expresión numérica adimensional resultado de la división aritmética del área de las hojas de un cultivo expresado en m^2 y el área de suelo sobre el que se encuentra establecido, también expresado en m^2 . El IAF permite estimar la capacidad fotosintética de las plantas y ayuda a entender la relación entre acumulación de biomasa y rendimiento bajo condiciones ambientales imperantes en una región determinada.

A grandes rasgos, existen dos formas para estimar el IAF: directa e indirecta. La forma directa, conocida también como destructiva, consiste en salir al campo y emplear el método de colecta/cosecha de tejido foliar que será utilizado para la obtención del AFE (área foliar específica) y su posterior multiplicación por el material foliar colectado en trampas de hojarasca. Esto, a escalas pequeñas, requiere de personal, tiempo y presupuestos vastos, pero a escalas mayores y en sitios con mayor riqueza de especies representa una tarea titánica que muy rara vez puede llevarse a cabo por limitaciones de presupuesto y personal (Chason et al. 1991, Bréda 2003, Olivas et al. 2013, Sacardi-Biudes et al. 2014). A pesar de ser logísticamente complicados, estos métodos directos son muy precisos, ya que, si el muestreo está bien realizado, se reduce el error al mínimo y la sub o sobreestimación del IAF es prácticamente inexistente (Jonckheere et al., 2004).

Una manera de minimizar tanto el daño al individuo muestreado como el tiempo requerido para el procesamiento de las muestras consiste en utilizar submuestras para la determinación del (AFE), que se define como la relación existente entre el área

que ocupa el tejido foliar fresco y el peso seco de este. Existe una relación directa y positiva entre el AFE de las especies y la productividad del hábitat en donde éstas se encuentran, por ello el AFE es utilizada para convertir el peso seco de la hojarasca (capturada en un área conocida) a unidades de área de superficie fotosintética (Bouriaud, 2003).

Para el cálculo empírico del IAF, se toman dos plantas por unidad de estudio, se debe medir y multiplicar largo por ancho de cada hoja, luego, el resultado multiplicarlo por el factor 0.75 y sumar los valores obtenidos de cada hoja por planta. Después, promediar resultados de cada planta. Posteriormente, determinar el área de suelo ocupada por planta. Para finalizar, el IAF será determinado dividiendo el área foliar de la planta entre el área de suelo ocupada por esta.

$$IAF = \left(\frac{(\text{Área Foliar})(\text{Densidad Población})}{\text{Área Sembrada}} \right)$$

En cuanto a los métodos no destructivos, el ceptómetro lineal estima el IAF in situ. Estos equipos pueden calcular el IAF con alto coeficiente de correlación con el rendimiento ($R^2 = 0.9$) para condiciones de riego. El principio del funcionamiento de estos equipos es medir la intensidad lumínica sobre y debajo del dosel del cultivo, para el empleo de estos aparatos debe además considerarse: ángulo solar y cielo despejado.

2.5 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL ÁREA FOLIAR (*IN SITU* BASADOS EN LA LUZ INTERCEPTADA)

El ceptómetro es un instrumento que calcula el IAF con base en las medidas de PAR (radiación fotosintéticamente activa), por encima y debajo del dosel vegetal, junto con otras variables relacionadas con la arquitectura de la cubierta y la posición del sol. El IAF es uno de los parámetros más útiles para caracterizar la vegetación, siendo una medida muy valiosa para ayudar a evaluar la densidad y biomasa de la cubierta.

En muchos ecosistemas los estudios funcionales se basan en el monitoreo temporal dinámico del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), un índice espectral asociado con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por los tejidos verdes (Potter et al., 1993).

El IVN muestra una relación estrecha, positiva y lineal con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación verde y por tanto con la productividad (Gallo et al., 1985).

Numerosos estudios han vinculado el IVN derivado de satélite con la PPN de diferentes regiones y ecosistemas del mundo, encontrando una fuerte correlación entre el comportamiento espectral y el funcionamiento de la vegetación (Paruelo et al., 1997).

Actualmente se están evaluando nuevas tecnologías de información, como sensores remotos e información geográfica satelital como herramientas para estimar la cobertura de forraje en tiempo real en grandes extensiones de territorio y a bajo costo. Esta estimación se basa en índices espectrales que captan el desempeño fotosintético de la vegetación o irradiancia espectral reflejada por la cubierta verde de las pasturas. Esta reflectancia de radiación se ve afectada por el índice de área foliar (IAF), que está relacionada con la cobertura vegetal, y que puede utilizarse como una medida de la biomasa total de forraje. Este IAF puede ser estimado por la medición de la transmisión de luz dentro de soportes mediante un fotómetro. El más usado de estos índices es el índice de vegetación normalizado (IVN), calculado a partir de la reflectancia en las porciones roja (R) e infrarroja (IR) del espectro electromagnético (Pravia et al., 2013).

Convertir la información espectral en estimaciones de disponibilidad de forraje requiere la calibración de modelos que relacionen los índices de vegetación con la información de biomasa calculada a campo (Baeza et al., 2011). Si bien las tasas de crecimiento (diferencias en biomasa entre dos cosechas de biomasa sucesivas) no representan estrictamente la productividad primaria neta aérea (PPNA), su cálculo en ausencia de pastoreo y a intervalos de tiempo relativamente cortos puede representarla razonablemente bien (Oosterheld et al., 2011).

La productividad primaria neta aérea (PPNA) (tasa de acumulación de biomasa por unidad de superficie) es uno de los atributos ecosistémicos más importantes, ya que determina la cantidad de energía disponible para los niveles tróficos subsiguientes (McNaughton et al., 1989). En pastizales, la PPNA es el principal determinante de la carga animal (Oosterheld et al., 1998).

Los métodos tradicionales de estimación de la PPNA se basan en cortes de biomasa. Este proceso es costoso en tiempo y esfuerzo; además, sus resultados responden a situaciones particulares del sitio estudiado, por lo que dificulta las extrapolaciones de carácter regional. La falta de disponibilidad de datos sobre la cantidad de forraje y la enorme variabilidad espacial y temporal (tanto estacional como entre años) encontrada en las mediciones realizadas ha sido reconocida como uno de los factores que más afecta la eficiencia de los establecimientos ganaderos (Golluscio et al., 1998).

Esta alta variabilidad provoca muchas veces una subutilización del recurso forraje, o situaciones de sobreexplotación con el consecuente deterioro del recurso forrajero y edáfico. La investigación sobre pastizales en Uruguay ha estado enfocada en la descripción de la producción primaria, su variación entre y dentro de años, lo que ha

permitido hipotetizar, a partir de cálculos empíricos, sobre la capacidad de carga de ganado con criterio sustentable en el largo plazo (Altesor et al., 2005).

Sin embargo, las dificultades para extrapolar regionalmente los resultados puntuales limitan la capacidad de generar estimaciones de carga a nivel predial. La información espectral provista por sensores a bordo de satélites, con baja y media resolución espacial, tiene el potencial de ser usada para estimar la PPNA a bajo costo y en tiempo real, sobre grandes extensiones de territorio. Esta estimación se basa en índices espectrales que captan el desempeño fotosintético de la vegetación.

El más usado de estos índices es el índice de vegetación normalizado (IVN), calculado a partir de la radiación reflejada en las porciones roja (R) e infrarroja (IR) del espectro electromagnético $IVN = (IR-R)/(IR+R)$. La reflectancia en el R se relaciona con la absorción por parte de pigmentos fotosintéticos y la del IR con la estructura foliar. El IVN presenta una relación estrecha y positiva con la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (fRFAA) por la vegetación verde y por tanto con la productividad (Baret y Guyot 1991, Paruelo et al. 1997, Gower et al. 1999, Piñeiro et al. 2006).

Esta relación entre los índices espectrales y la fRFAA provee la base teórica para estimar la PPNA a partir del IVN. Convertir la información espectral en estimaciones de la PPNA requiere la calibración de modelos que relacionen los índices de vegetación con la información de biomasa calculada a campo, cuantificando un factor clave en esta relación: la eficiencia de conversión de la energía radiante en biomasa. Monteith (1972) planteó que la PPNA es directamente proporcional a la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel (RFAA), y que la constante de proporcionalidad viene dada por la eficiencia de conversión de energía radiante en biomasa.

RFA es medida en estaciones meteorológicas y fRFAA puede estimarse a partir de los índices de vegetación como el IVN. EUR varía entre zonas, principalmente por el tipo de vegetación (composición específica, estructura y metabolismo fotosintético) y, dentro de una misma zona, varía en función de las condiciones ambientales, principalmente la temperatura y el agua disponible (Nouvellon et al. 2000, Bradford et al. 2005).

La ecuación 1 puede invertirse para realizar calibraciones empíricas de la eficiencia de conversión de energía en biomasa (EUR): $EUR (g MS/MJ) = RFAA (MJ/m^2 * día) / PPNA (g/m^2 * día)$. En la que la EUR está expresada en gramos de materia seca por megajoules (g MS/MJ). Utilizando mediciones a campo de la PPNA y estimaciones de la radiación fotosintéticamente absorbida por la vegetación (RFAA) realizadas con imágenes satelitales, es posible calcular el parámetro EUR para un tipo de

vegetación determinado (Grigera et al. 2007, Flynn et al. 2008, Baeza et al. 2011, entre otros).

2.6 *Festuca arundinacea*

La festuca es la gramínea perenne invernal más utilizada en el país (Formoso, 2010). Su hábito de crecimiento es cespitoso a rizomatoso (Carámbula, 2010). Es de implantación lenta y mejora notoriamente con la siembra en líneas (García, 2003). Esto conduce a que sea muy vulnerable a la competencia en plántula, ya que la movilización de reservas de la semilla es baja y, por lo tanto, las raíces presentan un crecimiento lento (Carámbula, 2010). Como consecuencia, la producción durante el primer año es baja, pero si se maneja en forma adecuada, la festuca puede persistir muchos años (Smethan, 1981).

En relación con el ambiente de crecimiento, esta gramínea tolera los suelos ácidos y alcalinos y soporta el drenaje pobre, pero para obtener niveles de producción aceptables requiere condiciones fértiles para su crecimiento (Smethan, 1981). Por este motivo, prospera mejor en suelos medios a pesados (Carámbula, 2010). También, se adapta bien en lugares húmedos (Carámbula, 2010) y demuestra una resistencia a la sequía moderadamente buena, permaneciendo verde durante un verano seco (Smethan, 1981). Adicionalmente, la festuca no se ve afectada por las heladas (García, 2003).

Esta especie presenta una buena precocidad otoñal, rápido rebrote de fines de invierno y floración temprana. La precocidad otoñal, atributo muy valioso, puede verse afectada desfavorablemente por un manejo de pastoreo intenso y abusivo en verano. No presenta reposo estival, lo que reduce el ingreso de malezas y gramíneas de verano, pero requiere manejo cuidadoso en esta estación debido a la carencia de órganos apropiados para acumular grandes volúmenes de reserva. Esto último, sumado a que la festuca no se resiembra naturalmente, puede hacer peligrar la productividad y persistencia de esta especie bajo regímenes de manejo excesivamente intensivos, por lo que se recomiendan ciertos períodos de descanso para favorecer su buen comportamiento. No obstante, se debe destacar que su sistema radicular fibroso, profundo y muy extendido, le permite obtener agua de los horizontes profundos. Por ello la persistencia de la festuca depende fundamentalmente del desarrollo de un buen sistema radicular desde fines de invierno y primavera (Carámbula, 2010).

La festuca alta admite pastoreos relativamente intensos y frecuentes porque las sustancias de reserva se encuentran en las raíces y rizomas cortos que forman las coronas de las plantas y porque, por lo general, las plantas presentan áreas foliares remanentes altas luego de los pastoreos (McKee et al., 1967). El pastoreo debe ser manejado de tal manera que no crezca mucho ni que se endurezca, ya que si pierde terneza pierde digestibilidad y apetecibilidad y es rechazada por el animal (Carámbula, 2010). El manejo exitoso depende de que sea pastoreada cuando tiene una altura de

alrededor de 10 cm. Más allá de esta etapa, la festuca parece perder su valor alimenticio y debería ser cortada para heno o ensilaje (Smethan, 1981).

La festuca necesita un suministro de nitrógeno importante, ya sea a través de fertilizantes nitrogenados o de la siembra de leguminosas asociadas. En este sentido sus hojas relativamente erectas le permiten coexistir con las leguminosas formando, en especial con trébol blanco, una mezcla muy valiosa (Carámbula, 2010). En cuanto a la densidad de siembra, se recomiendan siembras de festuca pura entre 10 y 15 kg/ha, y de festuca en mezclas entre 9 y 12 kg/ha (Carámbula, 2010).

Una característica no menor de esta gramínea es que puede poseer porcentajes relativamente altos del hongo *Neotyphodium coenophyalum*, que establece una relación de simbiosis-mutualismo con la planta. Las especies *Neotyphodium* producen diferentes tipos de alcaloides que promueven ventajas y desventajas a nivel productivo. Dentro de las ventajas, a causa de la presencia de alcaloides tales como Peramina y Lolina, se reconocen: la tolerancia a estreses abióticos/bióticos, tolerancia a déficit hídrico, tolerancia a patógenos fúngicos, nematodos e insectos plagas (Breen, citado por Casco et al., 2012), incremento en el crecimiento de la planta, mayor vigor y crecimiento radicular, modificación de las relaciones hídricas y la persistencia del cultivo en el campo (Clay y Schardl, Breen, citados por Casco et al., 2012).

Una de las principales desventajas es el efecto negativo que algunos alcaloides (Ergovalina 6 y Lolitrem B) producen en animales en pastoreo, conocido como festucosis (Clay y Schardl, Gallagher et al., citados por Casco et al., 2012). Además de las sintomatologías clínicas típicas de esta intoxicación existen también registros de efectos negativos en los rendimientos, tales como disminución de la producción de leche y disminución en la ganancia de peso de los animales (Altier, Fletcher y Harvey, citados por Casco et al., 2012).

Festuca arundinacea se adapta a un amplio rango de condiciones de crecimiento y existen dos grandes tipos de cultivares: aquellos originados en la Europa o América templada, también conocidos como continentales (i.e. variedades activas en primavera/verano), y aquellos originados en el Mediterráneo (i.e. actividad invernal, latencia estival) (AGTR 2008, Ayala et al. 2010). Los cultivares mediterráneos presentan hojas finas y hábito erecto (Ayala et al., 2010), se adaptan a regiones con veranos secos y 450-550 mm de lluvia, dado que por su dormancia estival toleran mejor las sequías de verano (AGTR, 2008). Los cultivares continentales son en general de hojas anchas y hábito de crecimiento intermedio (Ayala et al., 2010), son recomendados en zonas con al menos 650-700 mm de lluvia (AGTR, 2008) y su producción total anual supera en un 20 % a la de los cultivares de tipo mediterráneo (Ayala et al., 2010). El cultivar Ceres Typhoon está catalogado como una variedad de tipo continental (o templada), con rizomas cortos, seleccionada por calidad de hoja y mayor relación largo de lámina-vaina. Presenta floración tardía, esto es a fines de setiembre (AGTR, 2008).

La variedad INIA Fortuna es una variedad sintética creada en La Estanzuela, teniendo como objetivo de mejoramiento aumentar: calidad del forraje, flexibilidad en la oferta de forraje y muy buena sanidad. La tasa de crecimiento máxima en festuca ocurre en la primavera del primer año, alcanzando valores de 52 kg/ha/día de MS, la tasa de crecimiento mínima es en verano con valores de 10-20 kg/ha/día de MS, siendo levemente mayor a esta la tasa de crecimiento invernal y, por encima de estas dos últimas, la tasa de crecimiento otoñal. Al avanzar la edad la producción otoño-invernal se reduce y la distribución de forraje se hace más primaveral (García, 2003). La producción de esta especie según la evaluación desarrollada por INIA-INASE en el año 2011, da como resultado una producción de primer año de 7977 kg/ha MS, en el segundo año 13466 kg/ha MS y en el tercer año una producción de 4989 kg/ha de MS, llegando a un total de 26460 kg/ha MS para los tres años de evaluación (INASE, 2012).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y PERÍODO EXPERIMENTAL

El experimento se llevó a cabo en el potrero 33 (32°22'21" s 58°03'34" w) de la UdelaR. Facultad de Agronomía. EEMAC (Estación Experimental Mario A. Cassinoni), que se encuentra ubicada sobre el km 363 de la ruta General Artigas, departamento de Paysandú, Uruguay. El período de evaluación estuvo comprendido entre el 4 de julio y 30 de setiembre del 2019. Tuvo lugar en las estaciones de invierno y principio de primavera.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA Y ANTECEDENTES

3.2.1 Caracterización del sitio experimental

El sitio experimental se encuentra, según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976), sobre suelos pertenecientes a la Unidad San Manuel, con Brunosoles eútricos típicos como suelo dominantes y Solonetz solodizados melánicos y Brunosoles eútricos lúvicos como suelos asociados. Estos suelos se desarrollan sobre la Formación geológica de Fray Bentos (Altamirano et al., 1976).

3.2.2 Área experimental

En el área se encontraba instalada una pastura de *Festuca arundinacea* sembrada a comienzos de 2016 con 15 kg/ha de la variedad INIA Fortuna, 4 kg/ha de *Trifolium pratense* cv E116 y 8 kg/ha de *Lotus corniculatus* cv San Gabriel, fertilizada con 100 kg/Ha de 7-40.

El método de pastoreo empleado fue rotativo con carga variable según el tratamiento, permitiendo mantener una oferta de forraje en torno al 6 % del peso vivo (Blaser et al., Lucas y Mott, citados por Maraschin, 1993).

En cuanto frecuencia e intensidad se manejó, para el ingreso de los animales, una altura de 15 a 20 cm de la pastura y, para determinar la salida, se fijó una intensidad de 5 a 7 centímetros.

El área experimental de 2,3 ha, fue dividida en cuatro subparcelas, y en cada subparcela se delimitó un área de 10 x 10 metros dentro de las cuáles se realizaban las determinaciones (Figura 1), que a su vez se repitieron, a lo largo de cinco fechas, obteniendo así una mayor variabilidad de las diferentes situaciones.

Figura 1. Croquis del área experimental



3.3 CLIMA

La zona presenta un clima templado, con una temperatura para el año de evaluación con una media anual de 18 °C, presentando una mínima de -0,9 °C y una máxima de 36,1 °C. Para el período de evaluación se registraron, en el promedio histórico de 50 años, temperaturas mínimas en julio, agosto y setiembre de 7,37 °C, 7,7 °C y 9,02 °C respectivamente.

Las temperaturas máximas de 17,41 °C, 18,6 y 21,17 °C para los mismos meses. El régimen de lluvias es isohigro, registrándose un promedio de 1100 mm anuales.

Las precipitaciones se caracterizan por su irregularidad y variabilidad interanual, por lo que pueden ocurrir durante cualquier estación del año y se pueden dar tanto períodos de sequía como de exceso de lluvias. Dadas estas características, según la clasificación de Köeppen el clima de la región es de tipo Cfa (MDN. DNM, 2009).

3.4 CONDUCCIÓN EXPERIMENTAL

3.4.1 Diseño y análisis estadístico

La metodología experimental se aplicó en las fechas 4 y 16 de julio, 2 y 19 de agosto, 2 y 29 setiembre. Se asignaron cuatro puntos georreferenciados, con un historial de índice de verde normalizado homogéneo en relación con cada parcela en estudio, en la que cada uno de estos puntos corresponde a un píxel de 10 m x 10 m pertenecientes al satélite Sentinel 2B. 0F¹

Por cada fecha de muestreo se tomaron 40 lecturas de ceptómetro y se realizaron 20 cortes de 20 cm x 80 cm, estas se hicieron al ras de suelo, siguiendo el método de corte directo. Por último, se ajustaron ecuaciones de regresión para los valores de kg/ha de MS por altura.

En cada fecha la secuencia de determinación de cada uno de los cuatro sitios correspondientes a un píxel fue:

✓ Registrar la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAi) y la transmitida a través de la pastura (RFAt). Se realizaron lecturas en 10 puntos dentro de cada píxel, con un ceptómetro (Decagon Devices AccuPAR LP-80).

✓ Cinco de estos puntos, fueron puntos fijos en el centro de una superficie de 1,0 x 0,2 m, a su vez dentro de cada punto, se realizaban 5 medidas de altura de la pastura. Estas se registraban con reglas milimetradas, considerando la altura de la hoja verde más alta que contactaba la regla.

✓ La materia seca presente en los cuadros era cortada al ras del suelo y luego se llevaban las muestras al laboratorio, para su fraccionamiento y secado en estufa.

Se determinó la producción de materia seca.

Las fracciones consideradas fueron láminas, vainas, restos secos y otros.

3.4.2 Materia seca presente

Para estimar la materia seca presente, se realizaron cortes sobre una superficie de un marco de 80 x 20 cm, donde, previo al corte, a 1 cm de altura, se precedió a la medición de la radiación con el ceptómetro.

¹ Formoso, D. 2019. Com. personal.

Dentro de cada píxel se realizaban mediciones apareadas de radiación, altura de la pastura y corte de materia seca presente, sobre cinco puntos utilizando un marco de 0,8 * 0,2 m. En cada rectángulo, seguidas a la medida del ceptómetro, se procedía a medir la altura en cinco puntos a lo largo de éste, para luego así proceder con el corte. Cada muestra de corte se recolectaba en bolsas, etiquetadas respectivamente para luego llevarlas a laboratorio.

3.4.3 Procesamiento de muestras en el laboratorio

Al llegar con la muestra fresca al laboratorio se pesaban, de ser mayor a 100 g debía ser fraccionada mediante cuarteo. Luego, las muestras se separaban en las fracciones lámina, vaina, restos secos y otros. A continuación, se las pesaba y se las colocaba para secar por 48 horas a 60 °C en estufa de secado con circulación forzada del aire, modelo FANEM 320.

Pasadas las 48 horas se pesaron para determinar el peso seco. Con el peso seco de cada fracción se calculó la participación de cada fracción en peso a la muestra cortada. Y con base en esta información se calculó la disponibilidad por hectárea de cada fracción de la muestra total, teniendo en cuenta la superficie cortada.

3.5 VARIABLES DETERMINADAS

3.5.1 Área foliar específica

El área foliar específica en gMS/cm² se determinó a partir de 25 macollos representativos de la pastura, para posteriormente en el laboratorio extraer las láminas de festuca, colocarlas en un papel contact con el fin de escanearlas y procesarlas en el programa Fiji (ImageJ). Este programa fue descargado vía libre de internet, obteniendo como resultado el área foliar en cm². Acto seguido se extraen del contact y se colocan en estufa hasta obtener un peso constante. Con los datos de área foliar y peso seco de lámina se obtuvo el área foliar específica en gMS/cm²

Determinación del IAF con base en la materia seca de lámina presente en la pastura: con los g de MS de lámina obtenidos en los cortes, se multiplicó por el área foliar específica, obteniéndose los g MS de las láminas m². La relación entre los cm² de lámina sobre la superficie cortada representa el IAF medido y el IAF ceptómetro es el calculado por el ceptómetro.

Determinación del PAR absorbido con base en datos obtenidos del ceptómetro: este se desprendió de la diferencia del PAR incidente y PAR transmitido, dejando como resultado PAR abs.

3.5.2 Ceptómetro

La irradiancia a nivel de suelo se midió utilizando un ceptómetro marca Decagon, modelo AccuPAR LP-80, que mide la radiación fotosintéticamente activa equipado con una célula autónoma ubicada a 50 cm del suelo para medir radiación incidente, al mismo tiempo, se realizaron lecturas al ras de suelo para determinar la radiación transmitida.

Se tomaron 10 medidas por píxel, cinco de éstas estaban asociadas a los cuadros de corte para relacionar las medidas del ceptómetro con las determinaciones por corte.

3.5.3 Altura de la pastura

Se midió la altura de la pastura, registrando en macollas vegetativas la lámina verde más alta que tocaba la regla. Esta determinación se realizó en los cinco cuadros de corte (80 x 20 cm), donde se tomaron cinco mediciones dentro de este y diez mediciones más dentro del píxel.

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se estudió la relación entre las variables a partir de análisis de correlación y regresión entre las variables, probándose la significancia estadística de las mismas mediante pruebas de hipótesis e intervalos de confianza. Se uso un nivel de significación del 5%.

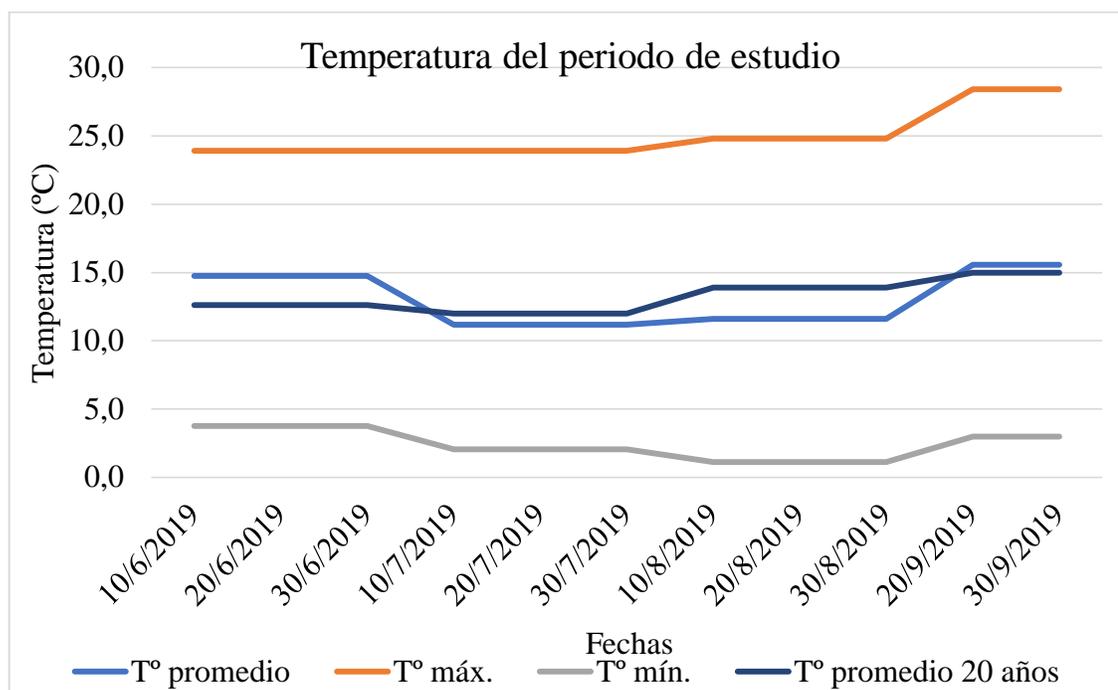
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

4.1.1 Temperatura

La evolución de la temperatura en el período de estudio mostró un comportamiento creciente, así como también la evolución de las temperaturas medias fue menor que las temperaturas medias promedio de 50 años, como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2. Temperatura máxima, mínima y media entre julio y setiembre de 2019 y las medias de los mismos meses del período 1969-2019

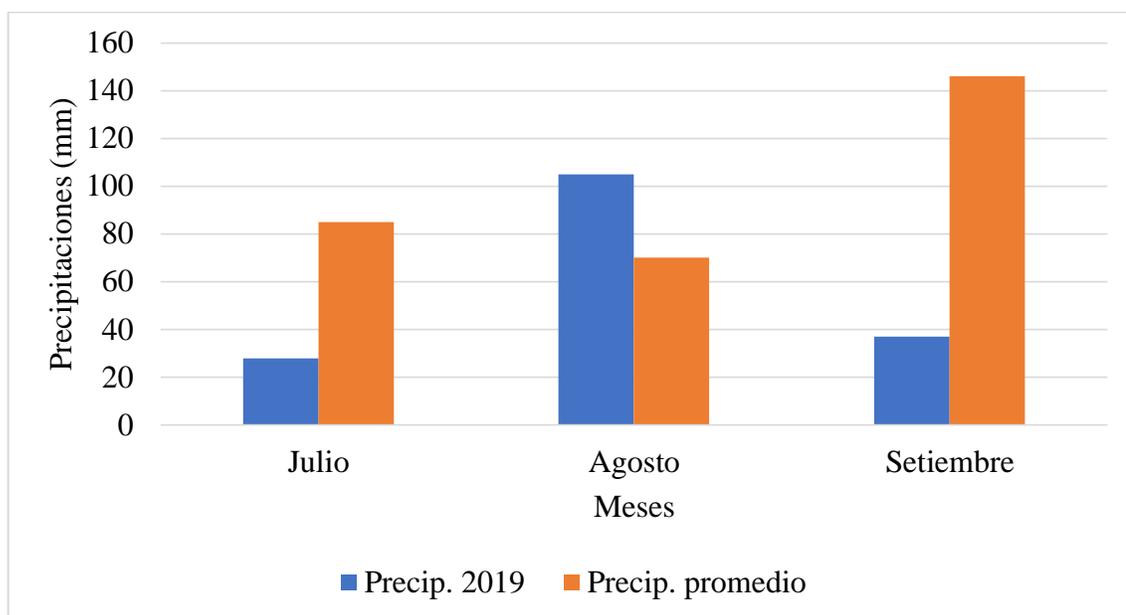


A través de la figura se desprende que la temperatura promedio del período de evaluación fue similar a la de la serie histórica 1969-2019. Las mayores diferencias se registraron en el mes de agosto, con una diferencia de 1,35 °C por debajo de la media histórica de dicho mes. Cabe destacar que la temperatura mínima de setiembre fue 3 °C, lo que indica que no hubo heladas tardías.

4.1.2 Precipitaciones

A continuación, se presentan las precipitaciones mensuales del período evaluado y el promedio de la serie histórica 1970-2020.

Figura 3. Precipitaciones de julio a setiembre de 2019 y promedios históricos del período 1970-2020

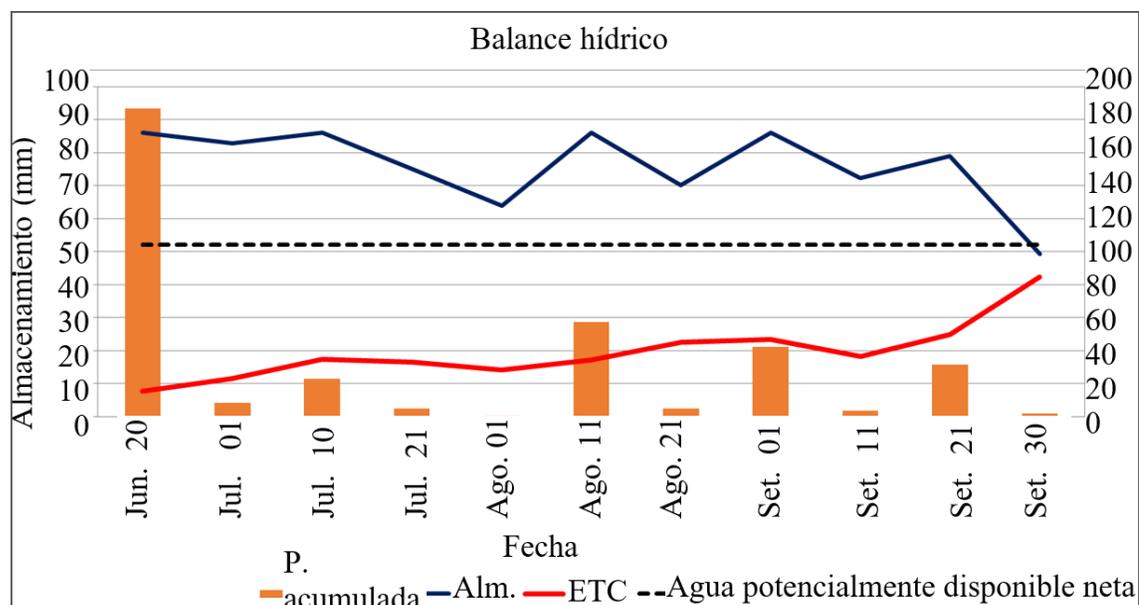


Se observa que en el período evaluado las precipitaciones mensuales fueron menores a las del promedio histórico, representando el 33 % para julio (56 mm menos) y 25 % para setiembre (34 mm menos), con excepción para el mes de agosto en el que las precipitaciones mensuales fueron 48 % superiores (109 mm más).

Balance hídrico:

a través del registro de precipitaciones y evapotranspiración potencial, se calculó el balance hídrico del período 20 de junio-30 de setiembre de 2019.

Figura 4. Evolución del almacenaje de agua en el suelo (alm.) y evapotranspiración real (ETR) con respecto al 40 % del agua potencialmente disponible neta (APDN 40 %), y períodos de déficits-excesos hídricos entre el 20 de junio y 30 de setiembre



Mediante estos se halló el almacenaje de agua en el suelo (alm.) y la evapotranspiración real (ETR), teniendo en cuenta que en los suelos CONEAT 11.3 el agua potencialmente disponible neta es de 86 mm (Molfino, 2009). De esta forma se calcularon los períodos de excesos y déficit hídricos. Se tomó como punto de referencia el 40 % del agua potencialmente disponible neta (APDN), debido a que por debajo de este porcentaje se dificulta la absorción de agua por parte de las plantas (García Petillo et al., 2012). Cabe destacar que se comenzó el balance hídrico el 20 de junio debido a que en este momento el perfil del suelo se encontraba a capacidad de campo.

4.1.3 Relación de la altura de la pastura con las diferentes variables

A continuación, se presentan los coeficientes de correlación de Pearson entre altura de la pastura y las variables materia seca total (MS total), materia seca de lámina

(MSI), PAR absorbido (PAR abs.), PAR transmitido (PART), índice de área foliar ceptómetro (IAF cep.) e índice de área foliar medido (IAF medido).

Tabla 1. Coeficiente de correlación de Pearson entre altura (cm) y las variables MS total, MSI, PAR abs., PART, IAF cep. e IAF medido en todas las parcelas y fechas de medición, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
Altura	MS total	100	0,41	<0,0001
Altura	MSI	100	0,49	<0,0001
Altura	PAR abs.	78	0,35	0,0017
Altura	PAR t.	80	-0,66	<0,0001
Altura	IAF cep.	58	0,49	0,0001
Altura	IAF medido	99	0,49	<0,0001

En el análisis global (Tabla 1) se puede observar que la relación entre altura y las variables estudiadas es significativa pero baja, y que el signo del coeficiente expresa relaciones biológicas consistentes. El coeficiente de correlación bajo, lo que indica es una baja asociación entre las variables estudiadas, determinando un bajo valor predictivo en caso de formular funciones de respuesta.

4.1.4 Relación entre altura y materia seca de lámina por momento de medición

Al estudiar por fecha de muestreo, se aprecia que la primera fecha de muestreo es la única donde la asociación no es significativa.

Esto pudo deberse al antecedente del pastoreo previo, pues a la pastura le costó recomponerse. A esto se le sumaron las bajas temperaturas en este período, las cuales también pudieron influenciar en el correcto desarrollo de la pastura en este período. Esta baja asociación entre estas dos variables puede deberse a que esta altura estuvo

influenciada por los otros componentes, como son las vainas y restos secos, y no tanto a la masa de láminas, debido a lo que se mencionó anteriormente, que vienen de un pastoreo.

Posteriormente los coeficientes son significativos y crecientes, acompañando el proceso de acumulación de materia seca e indicando una mayor relación entre la altura y la MS de láminas.

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y MS láminas, por fecha de medición, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Fecha	Altura (cm)	MS lámina (kg/ha)	<u>n</u>	Pearson	p-valor
04/07/2019	10,4 ± 2,2	504,9	20	0,33	0,1546
16/07/2019	8,8 ± 1,8	741,8	20	0,59	0,0061
02/08/2019	11,3 ± 1,6	955	20	0,55	0,0125
19/08/2019	10,2 ± 2,9	1413,6	20	0,74	0,0002
30/09/2019	7,7 ± 2	781,9	20	0,63	0,0028

La fecha 19/08 fue la que presentó la mayor correlación para estas dos variables, mostrando una significancia menor al 5 % y con un alto valor para el coeficiente de Pearson (0,74). Esto pudo deberse a que en este momento los animales no se encontraban pastoreando en esta parcela, por lo que el período de crecimiento a ese momento fue el mayor. Como fue comentado por Antonaccio et al. (2016), se tuvo que retirar el ganado antes de tiempo porque las tasas de crecimiento de éstas no soportaban la capacidad de carga de la pastura. También Gastal y Lemaire (2015) han reportado que, en una pastura en estado vegetativo, los componentes del crecimiento como la morfogénesis de hojas y macollas están genéticamente determinados y a su vez influenciados por variables ambientales como temperatura, estatus hídrico y disponibilidad de nutrientes.

Respecto a la fecha 30/09, un factor que puede incidir es el déficit hídrico (Figura 3), si se observa es posible notar que en ese momento no había agua disponible,

ya que se estaba próximo al punto de marchitez permanente. A su vez, se inducen cambios en la interceptación y calidad de la luz, debido a la senescencia de masa de lámina, dada las condiciones ambientales de seca y temperaturas muy bajas, haciendo que la reposición de esta sea muy lenta.

4.1.5 Relación entre altura y materia seca de lámina por parcela en todas las fechas

A nivel de parcela se puede observar que en la 1, 2 y 3, mostraron significancia menor al 5 %, pero con un bajo coeficiente de Pearson, de 0,4, 0,52 y 0,61 respectivamente. En cuanto a la parcela 4 no presentó significancia.

Estos resultados están explicados porque hay situaciones muy dispares que generan la baja asociación entre variables en el cúmulo de los resultados. Esto se apreciará mejor al analizar las parcelas por momento de medición.

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y MS láminas, por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Parcelas	Altura (cm)	MS lámina (kg/ha)	n	Pearson	p-valor
1	9,5 ± 2,5	835,6	25	0,4	0,046
2	9,3 ± 2,5	741	25	0,52	0,0073
3	9,8 ± 2,5	1015,9	25	0,61	0,0012
4	10,2 ± 2,1	1036,4	25	0,33	0,107

Estos resultados están explicados por factores que afectan la masa de láminas como la densidad de la pastura por la falta de fertilización, el pastoreo y las situaciones adversas de bajas temperaturas y déficit hídrico. Además, aportan a la diversidad de situaciones en las parcelas los manchones pasto rechazado, con alturas diferentes, generados por la orina y heces del ganado y los rechazos de los mismos, donde se apreciaban sectores donde la pastura fue más vigorosa y los mismos eran menos preferidos en momentos de pastoreo.

4.1.6 Relación entre altura y materia seca de lámina por parcela por momento de medición

Los resultados del análisis se presentan en el Cuadro 2 de los anexos.

El estudio de la parcela 1 a lo largo de las fechas de medición, indica que, solo en dos de estas fechas fueron significativas al 10 %, en las fechas 04/07 y 19/08, mostrando un alto coeficiente de Pearson. Lo que podría indicar una tendencia, pero no una asociación entre las variables. Esta parcela, como se explicó anteriormente, fue la más afectada por el pastoreo, en la que, además, había mucho suelo descubierto. Esto se debe a la combinación del pastoreo y que se encontraba en la parte más baja del potrero, que incluía áreas húmedas que quedaron posteriormente pisoteadas a causa de los pastoreos.

Si bien observando la parcela 2 se aprecia una disminución en altura promedio, en comparación con la parcela 1, este factor no es determinante a la hora de analizar la relación entre las variables estudiadas, ya que a partir del 02/08 comienza a mostrar significancia al 5 %, habiendo un coeficiente de Pearson alto de un 94 %.

Esto demuestra que la altura no es un factor determinante a la hora de analizar la relación entre estas dos variables, sino que importa la diferencia entre altura total y altura de vaina, y cuánto representa esta diferencia en la altura total. Esto concuerda con lo reportado por Almada et al. (2007), quienes plantean que el remanente luego del pastoreo presenta una capacidad limitada de producir fotoasimilados, tanto por tener escasa área foliar como por presentar esta una baja eficiencia fotosintética, debido a que se compone principalmente de vainas y no de láminas.

La parcela 3, para este caso, mostró la misma tendencia que las alturas de las anteriores. Además, las fechas 04/07 y 02/08 no fueron significativos para el coeficiente de Pearson, mientras que las fechas 16/07 y 30/09 mostraron significancia para el 5 %, y un alto valor de correlación. La fecha 19/08 también fue significativa al 10 %. Esto muestra, nuevamente, lo que se mencionó en páginas anteriores: a nivel general, en la parcela 3 se encontró muy buena asociación, pero al analizarla por momento hubo gran variabilidad en los resultados.

Lo que se puede ver en la parcela 4 es que hubo un aumento en el promedio general de la altura, a lo largo de las fechas. Para las fechas 04/07, 19/08 y 30/09 no se vio significancia para Pearson, mientras que en la fecha 16/07 sí hubo para el 10 %, y la fecha 02/08 para el 5 %, ambas con un alto nivel predictivo.

En general se aprecia un comportamiento errático en la asociación de la altura y la MS de láminas entre parcelas y fechas.

4.1.7 Relación entre altura y materia seca total

En el análisis general (Tabla 1) se puede observar que la relación entre altura con la variable materia seca total mostró significancia para el coeficiente de Pearson.

Si bien se encontró una relación funcional significativa para estas dos variables, la realidad es que tiene un bajo valor predictivo, lo cual se puede observar en la Figura 6.1, es notorio la dispersión de los puntos, lo que indica una baja asociación entre las variables estudiadas.

4.1.8 Relación entre altura y materia seca total por momento de medición

En la tabla se puede observar que en la primera y tercera fechas de medición no se detectó significancia para la relación entre altura y MS total, Pearson ($p > \text{valor } 0,1$).

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y MS total, por fecha de medición, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Fecha	Altura (cm)	MS total (kg/ha)	n	Pearson	p-valor
04/07/2019	10,4 ± 2,2	1197	20	0,36	0,1205
16/07/2019	8,8 ± 1,8	1521,7	20	0,63	0,0027
02/08/2019	11,3 ± 1,6	1630	20	0,22	0,3625
19/08/2019	10,2 ± 2,9	2370	20	0,71	0,0005
30/09/2019	7,7 ± 2	1712,2	20	0,60	0,0050

Lo que se notó fue una correlación para estas dos variables en las fechas 16/07, 19/08 y 30/09, con una significancia $p < 0,05$ y con un aceptable valor de asociación en la fecha 19/08. Por lo que se pudo apreciar la asociación entre altura y biomasa total mantiene una relación más estrecha cuando los niveles de biomasa son más elevados, además, la fecha del 30/09 probablemente tenga una heterogeneidad más marcada por las situaciones de déficit hídrico, así como por el cambio en estado fenológico.

La variación en el crecimiento y en la acumulación de materia seca podría estar explicada por las adversas condiciones climáticas durante el experimento. Las plantas expuestas a déficits hídricos cesan su crecimiento e inclusive pueden perder biomasa. Esto produce una detención en la expansión foliar y una reducción en el IAF (Nabinger, 1996). Asimismo, la exploración radicular puede verse afectada, influyendo en la capacidad de extracción de agua y nutrientes (Nabinger 1996, Colabelli et al. 1998). Estos hechos, sumados a las bajas temperaturas, pueden explicar el aumento en la tasa de senescencia (Nabinger 1996, Villareal González et al. 2014) y por lo tanto las variaciones en biomasa.

4.1.9 Relación entre altura y materia seca total por parcela a través de las fechas

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y MS total, por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Parcelas	Altura (cm)	MS total (kg/ha)	n	Pearson	p-valor
1	9,5 ± 2,5	1538,8	25	0,18	0,3849
2	9,3 ± 2,5	1576,6	25	0,66	0,0003
3	9,8 ± 2,5	1632,1	25	0,63	0,0007
4	10,2 ± 2,1	1997	25	0,14	0,5049

En la misma línea de la relación con MSL, para MS total, las parcelas 2 y 3 fueron las únicas que tuvieron significancia $p < 0,05$, con valores medios para el coeficiente de Pearson (66 % y 63 % respectivamente), por lo que la inclusión de los componentes MS vainas y material muerto no modificó la relación.

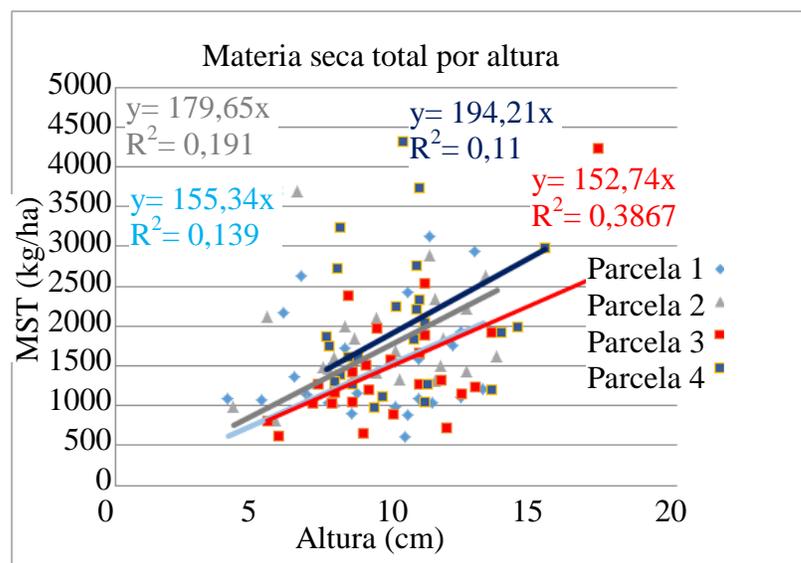


Figura 5. Materia seca total en función de la altura período (jul.-set. 2019)

4.1.10 Relación entre altura y materia seca total por parcela por momento de medición

A través de las fechas de medición, en la parcela 1 solo presentó asociación significativa entre la altura y la materia seca, en la fecha 04/07, con una asociación alta y significativa $p < 0,05$.

En este caso, la relación se ve afectada por la disparidad en altura y densidad de la pastura, lo que genera variabilidad en la información. Se puede observar dos situaciones contrastantes, la parcela 4, con coeficiente de correlación mayor a causa de que la producción de forraje de ese píxel a lo largo de los momentos se mantuvo estable; y la parcela 1 que desde un principio arrancó con bajas masas de MS a lo que se le acumuló una fertilización baja dando como resultado áreas heterogéneas en densidad, altura y vigor a lo largo de todas las fechas, resultando en los coeficientes más bajos.

En la parcela 2, se observaron asociaciones significativas para r Pearson, con valores mayores de correlación. La única fecha en la que no se observó significancia fue el 4/07.

De manera similar, en la parcela 3, se observaron asociaciones significativas. En la fecha 19/08 no fue significativa, pero se puede decir que presentó una asociación y para la fecha 30/09 presentó significancia y una alta correlación del 0,96.

La parcela 4 presentó un resultado significativo para la fecha 16/07 y una alta correlación para Pearson, mostrando una alta asociación.

4.1.11 Relación entre altura de la pastura y PAR abs.

El análisis general (Tabla 1) muestra que la relación entre la altura y la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR abs.), fue significativa, el coeficiente de Pearson tiene una baja asociación, lo que se observa en la Figura 7, es que la dispersión de los puntos es muy amplia entre estas dos variables. Esto es consecuencia de que dentro de la materia seca total no todos los componentes tienen actividad fotosintética, por lo tanto, frente a los aumentos de éstos no habrá modificaciones en el PAR absorbido. Esto concuerda con lo reportado por Almada et al. (2007), quienes plantearon que el remanente post pastoreo presentó una baja capacidad de producir fotoasimilados, ya que la escasa área foliar que quedó tenía una baja eficiencia fotosintética, debido a que ésta se compone principalmente por vainas y restos secos.

Brancato et al. (2019) mencionan que a la hora de analizar la relación entre la altura y el PAR abs. algo importante para tener en cuenta es el % de suelo descubierto. A su vez encontraron un aumento en la eficiencia del PAR abs. ya que este aumenta de forma lineal a medida que van pasando los días post pastoreo.

4.1.12 Relación entre altura y PAR abs. por momento de medición

En general la relación entre altura de la pastura y la PAR abs. es significativa en todas las fechas de muestreo, mostrando valores crecientes el coeficiente hacia las fechas más tardías.

Tabla 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y PAR abs., por fecha de medición, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Fecha	Altura (cm)	PAR abs. (Mmol/m ² /s)	n	Pearson	p-valor
04/07/2019	10,4 ± 2,2	Sd	sd	sd	Sd
16/07/2019	8,8 ± 1,8	561	20	0,46	0,0434
02/08/2019	11,3 ± 1,6	426	18	0,52	0,0470
19/08/2019	10,2 ± 2,9	746,4	20	0,64	0,0022
30/09/2019	7,7 ± 2	564,7	20	0,64	0,0023

La relación se vuelve más estrecha cuando aumenta el volumen de material fotosintéticamente activo, eso se ve reflejado en las fechas 19/08 y 30/09, que tienen un coeficiente de Pearson de 0,64 y son significativos al 5 %. A su vez, en la fecha 16/07 y 02/08 también presentó significancia para Pearson al 5 %, pero con un bajo valor de asociación (46 % y 52 %). Lo que pudo haber pasado en las dos primeras fechas es que la altura esté influenciada por componentes no fotosintéticamente activos, por lo tanto, que haya más altura no siempre quiere decir que todo es lámina, puede también tener las vainas de gran tamaño, modificando los estratos. Esto se confirma cuando se relaciona altura contra MSL, los números muestran que las fechas 16/07 y 02/08 son las que menos kg de lámina presentan por cm de altura, con 84,3 y 84,5 kgMSI/cm, frente a los 138,5 y 101.5 kgMSI/cm de las fechas 19/08 y 30/09 respectivamente.

La causante de que, en las primeras fechas a pesar de ser significativas, pero con un Pearson medio a bajo, puede estar explicado por situaciones de estrés generados en la pastura. Lo que se pudo comprobar fueron las bajas temperaturas, como se mencionó anteriormente en este trabajo (ítem 4.1.1). Se observó que la temperatura media de ese período fue inferior a la media histórica, perjudicando el crecimiento de la festuca, pues las temperaturas estuvieron por debajo de las óptimas para esta especie, siendo una limitante para su crecimiento y su desarrollo. Coincidiendo con lo reportado por Carámbula (1977), las especies con metabolismo C3, como *Festuca arundinacea*, se desarrollan mejor con temperaturas de 15° a 20 °C.

A su vez, otro de los factores que fue limitante y pudo haber afectado en el estrés generado fue la no incorporación de nitrógeno a la pastura, teniendo en cuenta que

éste es un nutriente esencial para su crecimiento y la buena producción de materia seca. El efecto que genera fertilizar con dicho nutriente en el crecimiento de la pastura se demuestra por la acción que provoca sobre los componentes del área foliar: la longitud de las hojas y la densidad de los macollos (Whitehead 1970, Mazzanti et al. 1994).

Para *Festuca arundinacea* Carámbula (2002) menciona que, cuando esta especie se encuentra deficiente de dicho nutriente, modifica su comportamiento: se vuelve amarillenta y tiene menor rebrote.

4.1.13 Relación entre altura y PAR abs. por parcela en todas las fechas

Tabla 7. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y PAR abs., por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Parcelas	Altura (cm)	PAR abs. (Mmol/m ² /s)	n	Pearson	p-valor
1	9,5 ± 2,5	400,1	20	0,11	0,6316
2	9,3 ± 2,5	605,7	19	0,49	0,0348
3	9,8 ± 2,5	636	19	0,4	0,0931
4	10,2 ± 2,1	676,2	20	0,23	0,3328

Se encontró una relación significativa para Pearson únicamente en la parcela 2, la cual mostró una baja predictibilidad, de un 49%.

Tabla 8. Altura (cm) y PAR abs., por parcela, PAR/KgMSI y KgMSI/cm

Parcelas	Altura (cm)	PAR abs. (Mmol/m ² /s)	PAR abs/KgMSI ha	KgMSI/cm
1	9,5 ± 2,5	400,1	0,452	93,11
2	9,3 ± 2,5	605,7	0,741	87,87
3	9,8 ± 2,5	636	0,626	103,67
4	10,2 ± 2,1	676,2	0,576	115,17

Se adjunta el dato de kg Msl/cm, a modo de expresar la estrecha relación que comparten las láminas con el PAR abs de la pastura. Indicando que, a mayor altura de la pastura, mayor cantidad de láminas, por ende, mayor radiación incidente absorbida. Coincidiendo con lo reportado por Brancato et al. (2019).

Observando los datos y realizando relaciones entre ellos se pudo obtener dos indicadores que son relevantes para explicar por qué sólo la parcela 2 da significativo, el primero es la relación entre el PAR abs. y los Kg Msl por hectárea, obteniendo para dicha parcela 0,741 mmol/Kg MSL ha, si bien ésta fue la que presentó menor cantidad de Kg Msl/cm de altura, fue la más eficiente, ya que las demás presentaron valores bastante más altos para este parámetro sin embargo su PAR abs. fue menor en términos netos que la parcela 2.

Otro aspecto que puede estar relacionado es el estrés abiótico de las plantas, porque puede haber una pastura alta, pero si está estresada la eficiencia del uso de la radiación puede bajar. Esto concuerda con Tambussi (2004), quién menciona que los factores que provocan estrés en las plantas pueden conducir a una disminución de la tasa fotosintética, por ende, a una caída de la EUR; por lo que el PAR absorbido no guarda una relación normal con la altura, haciendo que se rompan las relaciones entre las dos variables y esto último hace que baje la asociación entre estas dos variables.

4.1.14 Relación entre altura de la pastura y PARt general

En el caso de altura y PARt, la correlación es baja y negativa (Tabla 1), lo que indica que al aumentar la altura disminuye el PARt. Según Brancatto et al. (2019) esto explica por qué al aumentar la altura aumenta la lámina que es fotosintéticamente activa

y esto determina que el dosel de festuca intercepte más radiación y disminuya la PAR transmitida.

Tabla 9. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y PAR t, por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Fecha	Altura (cm)	PARt	n	Pearson	p-valor
04/07/2019	10,4 ± 2,2	sd	0	sd	sd
16/07/2019	8,8 ± 1,8	546,9	20	-0,56	0,0098
02/08/2019	11,3 ± 1,6	495,1	20	-0,35	0,1246
19/08/2019	10,2 ± 2,9	633,4	20	-0,68	0,001
30/09/2019	7,7 ± 2	1045	20	-0,63	0,0027

En la fecha 02/08, al igual que en la variable anteriormente descrita, no mostró significancia. Esto se debe a que los datos provienen de la resta entre PAR incidente y PAR abs.

Lo que llama la atención es que si se observa el cuadro de momento por parcela (Cuadro 2 de los anexos), en ningún momento da significativo al 5 % y cuando se mira en el promedio de cada momento sólo el momento 3 no dio significativo. El motivo por el que estos mismos datos si dan significativos en su mayoría, es porque se analizan en grupo y en el cumulo de dato es que se promedian los resultados obtenidos, haciendo que, al analizar una parcela en una fecha probablemente estos logren no ser significativos y si analizándolo por fechas.

Tabla 10. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) y PARt, por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Parcela	Altura (cm)	PARt	n	Pearson	p-valor
1	9,5 ± 2,5	624	20	-0,8	<0,0001
2	9,3 ± 2,5	643	20	-0,74	0,0002
3	9,8 ± 2,5	678	20	-0,6	0,0055
4	10,2 ± 2,1	627	20	-0,46	0,0431

Por lo que se aprecia en este cuadro, todas las parcelas fueron significativas para el 5 %, con altos valores del coeficiente para las parcelas 1 y 2 y en la parcela 4 se nota una baja asociación para estas dos variables. Esto llevó a analizar más en profundidad lo ocurrido a lo largo de los momentos para estas parcelas, ya que no hay una diferencia significativa en los valores de altura como para PARt (Cuadro 3 de los anexos).

Se vuelve a repetir una situación similar a lo ocurrido por momento de medición, ya que en este caso todas las parcelas presentan relación significativa entre altura y PARt, porque si se observa cada una a lo largo de los diferentes momentos, no hay significancia al 5 %, incluso tampoco la hay al 10 %.

Una posible explicación para esto podría estar relacionada con la heterogeneidad entre parcelas a lo largo de las fechas (Cuadro 1 de los anexos). Esta heterogeneidad se apreciaba claramente en los momentos de tomar las muestras, donde se podía ver que, dentro de una misma parcela, figuraban los manchones con la pastura amarillenta y otro más verde. Esto hacía fluctuar la eficiencia de absorción de radiación por parte de la pastura, por ende, perjudicaba directamente los valores de PAR abs. y PARt, donde se tenía una misma o similar altura y materia seca.

Lo que sucede en la parcela 4 (Cuadro 2 de anexos), es que dadas las condiciones de adversidad hubo una disminución en el crecimiento en la parte aérea por factores abióticos. Este se puede ver claramente si se analiza los kilogramos de materia seca de lámina de las fechas 19/07 y 30/09. La cantidad de lámina de esta última fecha se mantiene invariable similar a la de la fecha anterior sin embargo la altura y la materia seca total se vieron incrementados.

4.1.15 Relación entre altura y IAF medido

En este caso se trata de una variable construida a partir de la materia seca de lámina, por lo tanto, todos los coeficientes se comportaron de igual manera.

La relación entre la altura y el IAF medido mostró significancia al 5 % para Pearson (Tabla 1). Si bien fue significativa la correlación, el coeficiente es bajo, indicando una baja asociación entre estas variables, lo que se puede observar en la Figura 7.13, es una gran dispersión de los puntos haciendo que estas dos variables presenten un bajo valor predictivo.

4.1.16 Relación entre altura y IAF cep.

Existe una relación lineal entre el IAF y la altura de las especies según Brancato et al. (2019), por lo menos hasta los 15 cm de altura, luego se rompe esa relación por lo que frente a aumentos en la altura el índice de área foliar no presenta cambios tan significativos, según su investigación esto es debido a que entra en juego la senescencia de las hojas impidiendo aumentos en el IAF.

Según Carámbula (2002), cuando la pastura alcanza a interceptar un 95 % de la radiación incidente, se logra la máxima tasa de producción de materia seca, correspondiendo al IAF crítico. Diversos estudios afirman que existe una gran relación entre éste y la altura del pasto (Carnevalli 2003, Barbosa 2004). Se denomina altura crítica a aquella que intercepta un 95 % de la radiación incidente.

Al realizarse el estudio sobre estas dos variables (Tabla 1) se pudo constatar que hay una significancia para Pearson al 5 %, pero con un bajo valor de asociación. Lo que se corrobora en la Figura 7.11, donde se aprecia una clara dispersión entre los puntos.

4.1.17 Relación entre altura y IAF cep. por fecha

Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) e IAF cep., por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Fecha	Altura (cm)	IAF cep.	n	Pearson	p-valor
04/07/2019	10,4 ± 2,2	Sd	sd	Sd	Sd
16/07/2019	8,8 ± 1,8	Sd	sd	Sd	Sd
02/08/2019	11,3 ± 1,6	0,73	18	0,47	0,0470
19/08/2019	10,2 ± 2,9	1,36	20	0,75	0,0001
30/09/2019	7,7 ± 2	0,85	20	0,77	0,0001

Como se observó en casos anteriores, las relaciones comienzan a tomar relevancia cuando aumenta el volumen de biomasa. Estos aumentos están fuertemente marcados por el componente MSL, que es la que determina el índice de área foliar, donde la misma en estas fechas fue creciendo.

Es notorio que, al paso de las fechas, estas variables presentan una mayor asociación está determinado por la mejora en el estado de la pastura, que al pasar los momentos de medición esta se fue recomponiendo.

4.1.18 Relación entre altura y IAF cep. por parcela

Tabla 12. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura (cm) e IAF cep., por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Parcelas	Altura (cm)	IAF cep.	<u>n</u>	Pearson	p-valor
1	9,5 ± 2,5	0,64	15	0,37	0,1783
2	9,3 ± 2,5	1,12	14	0,62	0,0174
3	9,8 ± 2,5	1,09	14	0,67	0,0092
4	10,2 ± 2,1	1,56	15	0,28	0,3184

Lo que se observa en la Tabla 17 es que la parcela 1 y 4 no presentan una asociación significativa, mientras que la 2 y la 3 presentaron significancia al 5 %, con bajo valor predictivo. Hay que tener en cuenta que en estas mediciones en los primeros dos momentos para todas las parcelas no se obtuvieron datos de IAF cep., por lo que, en comparación con otras variables, su n fue menor.

4.1.19 Relación entre IAF medido y IAF cep. general

En el siguiente cuadro se puede observar la relación entre estas dos variables, que mostró una significancia para Pearson al 5 % con un alto valor de asociación, validando las demás relaciones que se derivan, o de las que se obtiene el IAF medido.

Tabla 13. Coeficientes de correlación de Pearson entre IAF medido y IAF cep., general, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
IAF medido	IAF cep.	57	0,75	<0,0001

4.1.20 Relación entre IAF medido y IAF cep. por momento de medición

En el cuadro se aprecia que la asociación entre IAF medido e IAF cep. fue significativa con valores medios a altos de coeficiente de correlación. La estimación del IAF por medio del ceptómetro toma valores mayores a los de referencia obtenido por la medida directa.

Tabla 14. Coeficientes de correlación de Pearson entre IAF medido y IAF cep., por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Fecha	IAF medido	IAF cep.	n	Pearson	p-valor
04/07/2019	0,254	Sd	sd	sd	Sd
16/07/2019	0,38	Sd	sd	sd	Sd
02/08/2019	0,490	0,73	18	0,71	0,0009
19/08/2019	0,725	1,36	20	0,73	0,0002
30/09/2019	0,393	0,85	19	0,65	0,0025

Esos coeficientes indican una asociación aceptable entre determinaciones a efectos de adoptar las determinaciones con el ceptómetro, en estas condiciones de trabajo.

4.1.21 Relación entre IAF medido y IAF cep., por parcela

A nivel de parcela se logra observar que todas mostraron significancia menor al 5 %, con un alto coeficiente de Pearson. Estas presentaron un valor para este de 0,72, 0,75, 0,65 y 0,72, respectivamente. Esto muestra la estrecha relación de éstas, así como también el buen valor predictivo.

Esto es así porque son una misma variable medida a través de dos métodos de medición, una directa y otra indirecta.

Tabla 15. Coeficientes de correlación de Pearson entre IAF medido y IAF cep. por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Parcelas	IAF medido	IAF cep.	n	Pearson	p-valor
1	0,429	0,64	15	0,72	0,0003
2	0,326	1,12	14	0,75	0,0002
3	0,460	1,09	13	0,65	0,0020

4	0,531	1,56	15	0,72	0,0004
---	-------	------	----	------	--------

Observando que la correlación entre estas dos variables es media a alta, si bien los valores estimados son mayores a los medidos, diferencias que pueden estar determinadas por los algoritmos utilizados en el cálculo del IAF que utiliza el ceptómetro ya que la forma de obtención de la variable IAF medido considera la totalidad de las láminas.

Por otro lado, el ceptómetro no toma el 100 % de la pastura, ya que no es posible colocarlo al ras del suelo, y la absorción del PAR incidente por las vainas de la festuca es de muy bajo aporte, dada la baja capacidad fotosintética de las mismas.

4.1.22 Relación entre IAF medido y IAF cep. por parcela por fecha de medición

Lo que se desprende del análisis de las parcelas a través de las fechas de medición fue que en la parcela 1, para las fechas 19/08 y 30/09, estas presentan significancia para un 5 % y un alto coeficiente de Pearson de 0,93 y 0,91 respectivamente. Sin embargo, para la fecha 02/08, fue significativo al 10 %, con un coeficiente de Pearson de 0,31.

En cuanto a la parcela 2, sólo en la fecha 02/08 ésta presentó significancia para el 5%, con un alto coeficiente de Pearson de 0,94, mientras que, para la fecha 19/08, mostró significancia para el 10 %, con un alto coeficiente de Pearson de 0,86.

Para la parcela 3, el único momento en el que presentó significancia fue el 19/08, con un p-valor de 0,014 y un alto coeficiente de Pearson de 0,95. Mientras que en la parcela 4, ninguna de las fechas presentó significancia.

Nuevamente se constata un comportamiento errático entre las parcelas y fechas que muestra la falta de continuidad en la asociación entre las variables.

4.1.23 Relación entre MS lámina y MS total general

Analizando el siguiente cuadro se puede notar que la relación entre estas dos variables es significativa y que tiene un coeficiente de asociación alto, por lo que al ver en la Figura 6.2 los puntos presentan una tendencia lineal, haciendo que estas variables presenten una media a alta predictibilidad.

Tabla 16. Coeficientes de correlación de Pearson entre MS lámina y MSt general, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
MS lámina	MS total	100	0,87	<0,0001

4.1.24 Relación entre MS lámina y MS total por momento de medición

Lo que mostró el análisis por momento de medición para estas dos variables es que, al igual que en la correlación general, para todas las fechas mostró significancia para el 5 %, mientras que, para el coeficiente de Pearson, todos presentaron un alto valor.

Tabla 17. Coeficientes de correlación de Pearson entre MS lámina y MS total, por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Fecha	MS lámina (kg/ha)	MS total (kg/ha)	n	Pearson	p-valor
04/07/2019	505	1197	20	0,59	0,0067
16/07/2019	742	1521,7	20	0,82	<0,0001
02/08/2019	955	1630	20	0,72	0,0004
19/08/2019	1414	2370	20	0,88	<0,0001
30/09/2019	782	1712,2	20	0,93	<0,0001

La fecha que llama la atención es la del 04/07 pues, a pesar de ser significativa, el coeficiente no fue tan alto como los demás. Esto sin dudas se debió a que en esta fecha la pastura venía de un pastoreo, que coincide con lo reportado por Almada et al. (2007), ya que el remanente, luego del pastoreo, se compone principalmente de vainas, y no de láminas.

Coincidiendo con lo reportado en el trabajo de Brancato et al. (2019), donde se puede apreciar como en el mes de junio las temperaturas descienden ubicándose por debajo del rango óptimo, que junto con un leve déficit hídrico mostrado en él puede haber provocado el leve estancamiento del crecimiento acumulado como se observa en la figura anterior.

4.1.25 Relación entre MS lámina y MS total por parcela

A nivel de parcela se puede observar que en todas se presentó un p-valor menor al 5 %, y con un alto valor del coeficiente de Pearson. Esto muestra la alta asociación entre las variables.

Tabla 18. Coeficientes de correlación de Pearson entre MS lámina y MS total, por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Parcelas	MS lámina (kg/ha)	MS total (kg/ha)	n	Pearson	p-valor
1	835,7	1539	25	0,87	<0,0001
2	741	1577	25	0,83	<0,0001
3	1016	1632	25	0,88	<0,0001
4	1036	1997	25	0,88	<0,0001

Esto se debe a que los componentes de crecimiento de la festuca en estado vegetativo son fundamentalmente las láminas, ya que está en un proceso de crecimiento.

4.1.26 Relación entre MS lámina y MS total por parcela por momento de medición

A partir de este análisis se logró ver que la parcela 1, a lo largo de los momentos de medición, presento relaciones significativas solo en las fechas 04/07, 19/08 y 30/09, fueron significativos al 5 %, con coeficiente de Pearson de 0,93, 0,92 y 0,96, respectivamente. Mientras que para las fechas 16/07 y 02/08 no presentaron significancia.

Para la parcela 2, al igual que en la parcela 1, no todas las fechas fueron significativas. En esta parcela las fechas 16/07, 19/08 y 30/09 fueron las que mostraron significancia al 5 %, existiendo un coeficiente de Pearson alto para estos 3 momentos de 0,92, 0,94 y 0,96, respectivamente.

La parcela 3, para este caso, mostró significancia para el 5 %, las fechas 19/08 y 30/09, con un Pearson alto de 0,88. El otro momento en el que se observa significancia es el 16/07, pero con un coeficiente de Pearson de un 10 %, presentando, al igual que las fechas anteriormente mencionadas, un alto Pearson. Para las demás fechas no se observa significancia.

En cuanto para la parcela 4, las fechas en las que se observa significancia son el 04/07 y el 30/09, para el 5 %. En el primer momento el coeficiente de Pearson fue bajo, debido que se comenzó el experimento con un pastoreo previo. Ahora, para la fecha 30/09, ésta sí presentó un alto Pearson. Ninguno de los otros momentos fue significativo.

Los resultados aquí obtenidos tienen sentido ya que, a medida que pasaron las fechas de medición, la pastura fue acumulando más materia seca de la lámina, por ende, un mayor crecimiento de las vainas, que generarán más materia seca total, coincidiendo con las fechas en que la pastura obtuvo mayor crecimiento y se tornó más significativa la correlación entre estas dos variables. Álvarez (1985) destacó la importancia del manejo sobre la calidad de la dieta asociada a un mayor porcentaje de láminas. Este encontró que la cantidad de forraje (MST) acumulado está asociado a un manejo con menores frecuencias de corte, explicado por una disminución de la relación hoja/tallo como consecuencia del aumento de los períodos de crecimiento.

Esto valida el concepto de que las láminas son las precursoras del aumento de la materia seca total.

4.1.27 Relación entre MS lámina y IAF medido

Respecto a la relación entre estas dos variables, una parte de la otra, es por esto que no presentan variabilidad y estas se vuelven constantes. Esto se debe a que se asumen constantes los gramos con respecto a los cm^2 . Si bien las magnitudes de ambas variables presentan números totalmente diferentes, presentan variaciones simétricas, si una aumenta 5% la otra también lo va a hacer en términos porcentuales. Es por ello que al ver la Figura 7.11 es en éste en la cual se ve la mejor relación entre variables, ya que esta toma una asociación lineal positiva, con una muy buena predictibilidad.

Tabla 19. Coeficientes de correlación de Pearson entre MS lámina y IAF medido general, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
MS lámina	IAF medido	100	1,00	<0,0001

4.1.28 Relación entre MS lámina y IAF medido por momento de medición

Tabla 20. Coeficientes de correlación de Pearson entre MS lámina y IAF medido, por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Fecha	MS lámina (kg/ha)	IAF medido	n	Pearson	p-valor
04/07/2019	504,9	0,2549	20	1,00	<0,0001
16/07/2019	741,8	0,380	20	1,00	<0,0001
02/08/2019	955	0,490	20	1,00	<0,0001
19/08/2019	1413,7	0,725	20	1,00	<0,0001
30/09/2019	781,7	0,393	20	1,00	<0,0001

4.1.29 Relación entre MS lámina y IAF medido por parcela

Tabla 21. Coeficientes de correlación de Pearson entre MS lámina y IAF medido, por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Parcelas	MS lámina (kg/ha)	IAF medido	n	Pearson	p-valor
1	835,7	0,428	25	1,00	<0,0001
2	741	0,326	25	1,00	<0,0001
3	1015,9	0,460	25	1,00	<0,0001
4	1036,4	0,531	25	1,00	<0,0001

El IAF medido se determinó a partir de la MS lamina, previamente se realizó la estandarización del peso específico de las láminas de festuca, o sea los gramos por centímetro cuadrado de lámina, de esta forma se obtuvo el índice de área foliar, realizando la siguiente cuenta gramos de lámina por centímetro cuadrado de suelo se llevó a cm cuadrados de lámina por centímetro cuadrado de suelo; esto explica el porqué del coeficiente de Pearson se haya estabilizado en 1.

4.1.30 Relación entre IAF medido y PAR abs. general

Para las variables IAF medido y PAR abs. se observó una significancia para el 5 %, y con un aceptable valor de asociación.

Tabla 22. Coeficientes de correlación de Pearson entre IAF medido y PAR abs., general, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
IAF medido	PAR abs.	77	0,65	<0,0001

También se puede ver el comportamiento de estas dos variables, en la Figura 7.8, donde se presenta cierta tendencia en cuanto a los puntos, la predictibilidad es baja debido a la dispersión de los mismos.

4.1.31 Relación entre IAF medido y PAR abs. por momento de medición

Tabla 23. Coeficientes de correlación de Pearson entre IAF medido y PAR abs., por fecha, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Fecha	IAF m	Des. est.	PAR abs.	Des. est.	n	Pearson	p-valor
04/07/2019	0,259	0,098	sd	Sd	0	Sd	sd
16/07/2019	0,380	0,154	561,06	249,7	20	0,8	0,0001
02/08/2019	0,490	0,138	426,2	133,9	18	0,69	0,0015
19/08/2019	0,725	0,288	746,4	250,4	20	0,62	0,0036
30/09/2019	0,393	0,190	564,7	128,7	20	0,46	0,0434

A priori, esta relación tendría que ser muy estrecha, ya que, a mayor IAF medido, mayor área foliar existente sobre el suelo es fotosintéticamente activa, por lo tanto, la relación con el PAR abs. debe ser estrecha. Es por esto que la dispersión de los datos del IAF es menor que la del PAR abs. Esto se observa al analizar los desvíos estándar de las dos variables consideradas, y se los compara con las otras fechas.

Esto sucedió coyunturalmente por la nubosidad, pues en un momento había un valor de radiación incidente, 910, y en otro uno muy distinto, 1350, dentro de una misma fecha. Esto afecta directamente el PAR absorbido.

A su vez, otra de las explicaciones a que esta asociación vaya disminuyendo a lo largo de los momentos de medición es que la eficiencia fotosintética de esta pastura se vaya reduciendo por el envejecimiento de la canopia, o también, por el estrés ocasionado por el déficit hídrico, ocurrido en estas últimas fechas, como se mencionó anteriormente en este trabajo.

Las plantas también poseen mecanismos de aclimatación que se activan en respuesta a estrés hídrico (Nilsen y Orcutt, 1996). Cuando el déficit hídrico se desarrolla lentamente, se dan cambios en procesos de desarrollo que tienen varios efectos sobre el

crecimiento. Uno de principal importancia es la limitación específica de la expansión foliar.

Aunque el área foliar es importante, pues de ella depende la fotosíntesis, una rápida expansión foliar puede afectar negativamente la adaptación a la poca disponibilidad de agua. Otro proceso que se modifica es el crecimiento radicular. La disponibilidad de agua afecta la relación entre el crecimiento de la parte aérea y la raíz; la raíz continúa su desarrollo mientras que la parte aérea deja de crecer por causa del estrés. Así, las plantas son capaces de continuar el desarrollo de sus raíces en búsqueda de agua en zonas más profundas del suelo (Potters et al. 2007, Shao et al. 2008).

4.1.32 Relación entre IAF medido y PAR abs. por parcela

Tabla 24. Coeficientes de correlación de Pearson entre IAF medido y PAR abs., por parcela, número de observaciones (n) y nivel de significancia

Parcelas	IAF medido	PAR abs.	n	Pearson	p-valor
1	0,454	400,1	20	0,70	0,0006
2	0,419	605,5	19	0,73	0,0004
3	0,494	636	19	0,63	0,0038
4	0,603	676	20	0,63	0,0027

Observando lo que dejó el análisis de estas dos variables, se comprueba que todas las parcelas mostraron significancia para el 5 % y un aceptable valor de asociación para Pearson, pero con variación entre las parcelas.

A medida que aumenta el IAF se ve incrementada la producción de materia seca, presentando muy buenos valores de correlación, esto se explica porque a mayor IAF se logra cubrir mejor el suelo, permitiendo así una mayor intercepción de la radiación por parte de la pastura derivando en un aumento de la tasa fotosintética produciendo más biomasa.

4.1.33 Relación entre IAF medido y PAR abs. por parcela por momento de medición

Analizando estas dos variables por parcela a lo largo de los momentos, para la parcela 1 se encontró que hay mucha variabilidad a lo largo de las fechas, mostrando asociaciones significativas en sólo dos de éstas. El 19/08 presentó una significancia al 5 % con un Pearson de 0,96, mientras que para el 30/09 fue de 10 %, con un Pearson de 0,84.

En cuanto a la parcela 2, también mostró significancia la fecha 19/08, pero al 10 %, y un Pearson de 0,86. El 02/08 fue la fecha que mejor asociación entre estas dos variables mostró, con un Pearson de 1 significativa al 5 %.

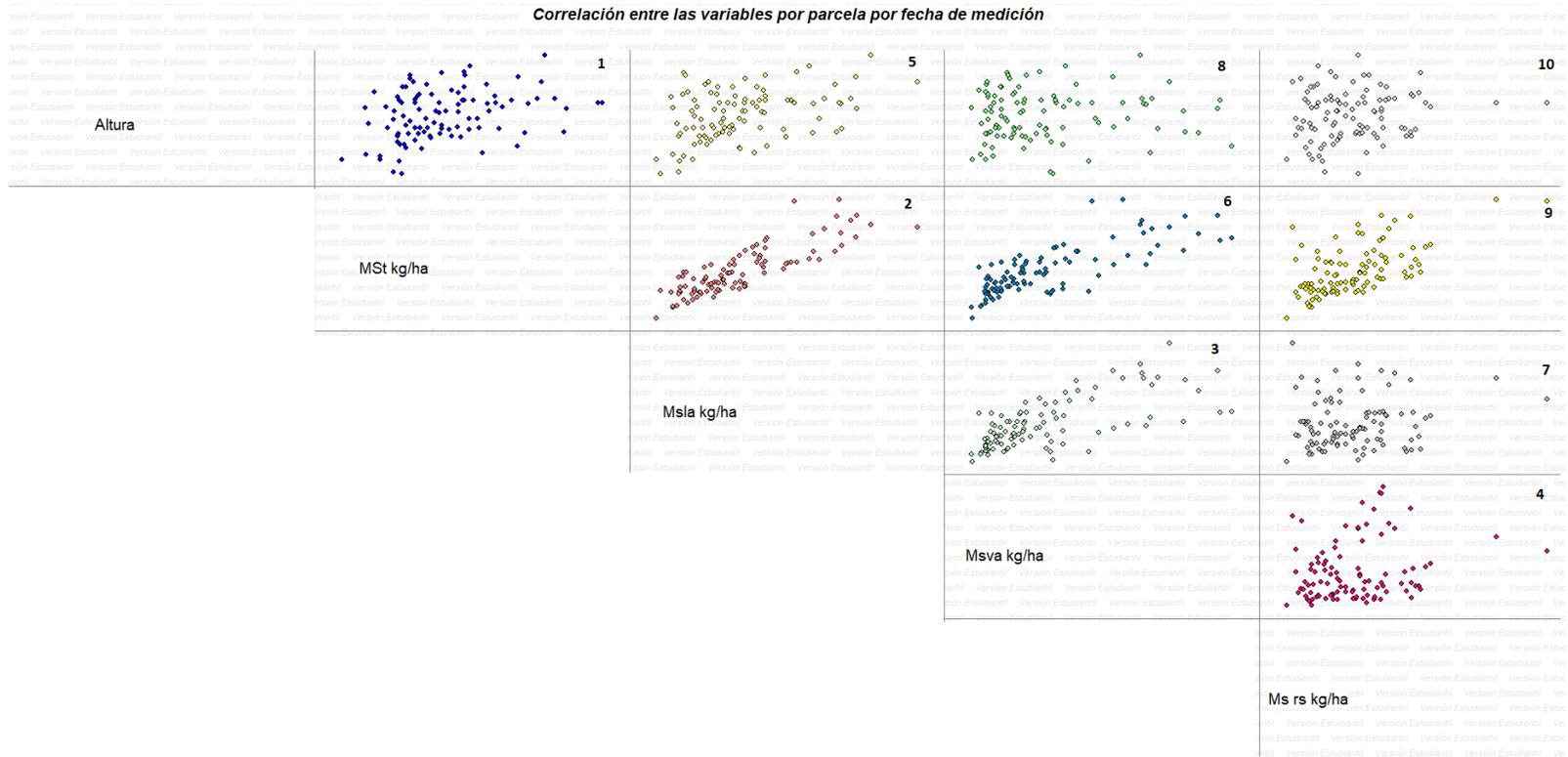
En la línea de la parcela 2, la parcela 3 también mostró significancia al 10 % para la fecha 19/08 con un Pearson de 0,86, y para la fecha 16/07 fue significativa al 5 % con un Pearson de 0,89.

Observando lo ocurrido en la parcela 4, solo la fecha 16/07 mostró asociación entre estas variables, con un Pearson de 0,9 y una significancia para el 5 %.

La fecha 30/09 fue la que menos asociación mostró a lo largo de las parcelas por momentos de medición, claramente, ocasionado por el estrés que generó el déficit hídrico en este período, como se vio anteriormente en este trabajo.

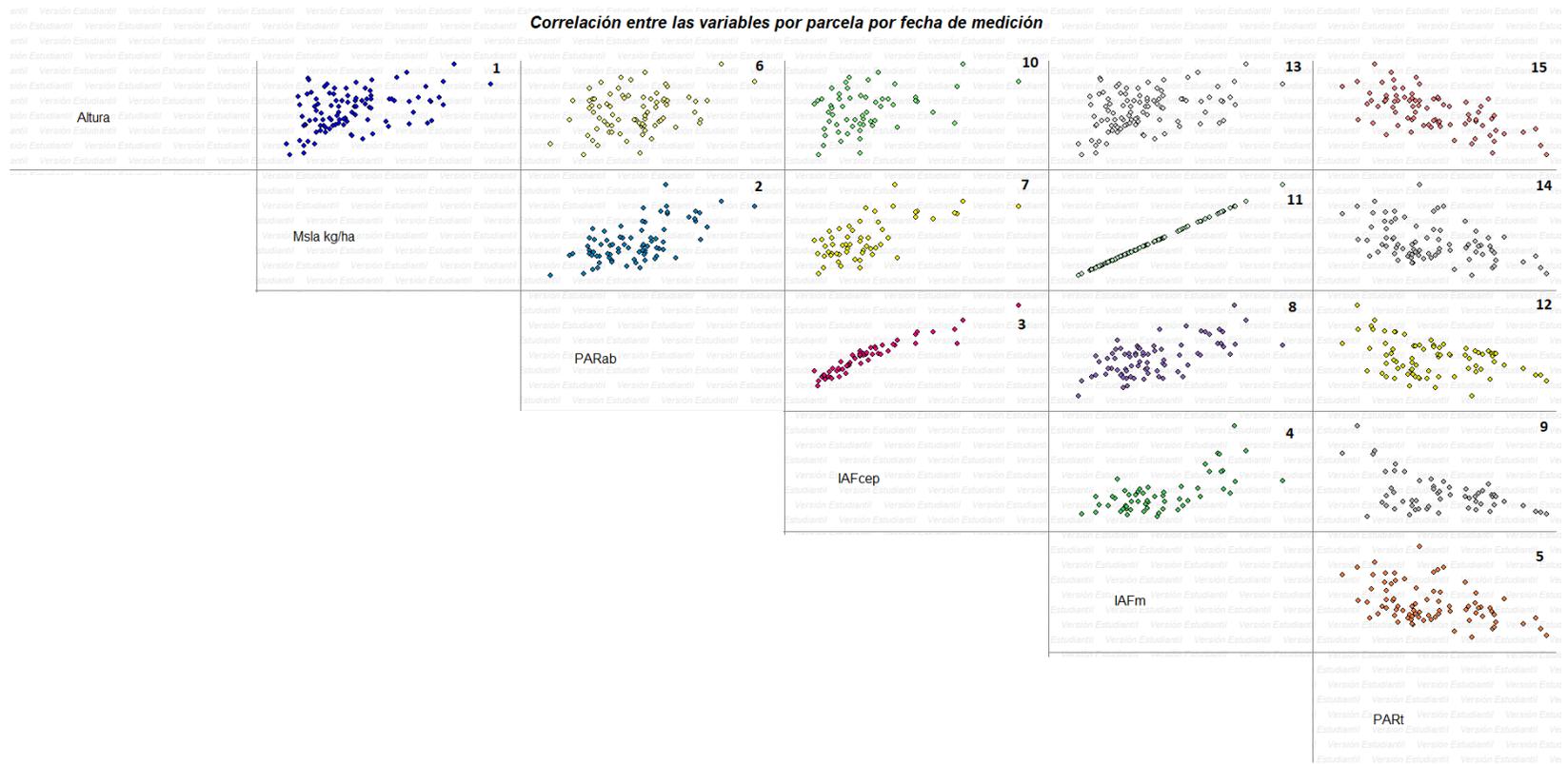
Es posible concluir que el área foliar que presentaba el forraje en esta fecha no era tan eficiente en el uso de la radiación, dejando en evidencia la baja asociación en este momento para todas las parcelas.

Figura 6. Correlaciones entre variables en el total de parcelas y de medición



Al observar el cuadro de doble entrada hay un conjunto de variables que presentan una asociación significativa, pero no se podría decir que todas presentaron un alto valor de asociación, debido a que es notoria la gran dispersión a pesar de ser significativa. La única relación que presentó tanto significancia como alta asociación fue entre las variables MSt (kg/ha) y MSl (kg/ha), siendo esta última componente de la primera.

Figura 7. Correlaciones entre variables en el total de parcelas y fecha de medición



En cuanto a este grupo de variables, como se puede observar, la asociación para alguna de ellas fue más significativa que para las variables anteriores.

Para las variables MSL (kg/ha) e IAF medido, se notó una asociación muy significativa, con un Pearson alto. Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente en este trabajo, es una variable que surge a partir de la otra, por ende, tal asociación.

Otra de las que mostró significancia fue PAR abs. e IAF cep., pero con un menor valor de asociación que lo que se observó en las variables anteriormente mencionadas. La explicación está dada porque el ceptometro realiza las predicciones de todos los indicadores en base al PARabs

Cabe mencionar que hay variables que se elaboraron en base a otras, como es el caso de la Figura 7.11 donde el IAF medido se correlaciona positivamente con MS lamina, dando como resultado un $r = 1$. Si bien son dos variables diferentes el IAF medido es la MS lamina multiplicado por una constante, por lo que son los mismos datos, pero con un cambio de mayor escala.

5 CONCLUSIONES

La variable que mostró mayor asociación con la altura, y que a su vez es de mayor utilidad es la materia seca de lámina, ya que es el componente que más influye en la altura, ya que la festuca presenta hojas de tipo erectófilo, a su vez desde el punto de vista agronómico es de utilidad este valor, ya que ésta es la que presenta mayores aportes nutritivos para el ganado.

Se puede decir que las estimaciones del ceptómetro son confiables ya que por ejemplo al comparar el IAF medido contra el IAF ceptómetro de forma general se obtuvo un r de 0.75

La asociación con la altura fue similar tanto en IAF medido como con el IAF cep, dada la alta asociación que existió entre estas dos variables ya que, si la asociación entre estas dos variables es alta, es lógico que con una tercera también lo sea.

Según los resultados la altura presentó una mayor asociación con la materia seca total que a la materia verde, ya que a la primera también toma en cuenta las vainas y a los restos secos los cuales en el presente trabajo también se individualizó.

6 RESUMEN

El principal objetivo del presente trabajo fue calibrar la estimación de producción de materia seca de los diferentes componentes del crecimiento de una pradera de *Festuca arundinacea* durante el período invernal, mediante un ceptómetro (Accu PAR LP80), considerando relación con la radiación fotosintéticamente activa incidente y la altura. Se evaluó también la composición botánica de las mezclas. El experimento se llevó a cabo sobre praderas en su tercer año de vida, abarcando los periodos de 4 de julio al 30 de setiembre del año 2019, en el potrero No. 33 de la UdelaR. Facultad de Agronomía. EEMAC (Estación Experimental Mario A. Cassinoni). El área experimental abarcó un total de 2.3 hectáreas que se dividieron en 4 parcelas, teniendo cada parcela un cuadro de 10x10 m. Los resultados arrojados fueron significativos, en algunas variables más que otras, para la estimación de forraje. Las condiciones ambientales durante el período experimental, bajas temperaturas y bajas precipitaciones durante setiembre, fueron algunas de las condiciones para que el crecimiento de las pasturas no sea propicio.

Palabras clave: Calibración; Pastura; Ceptómetro; Radiación incidente.

7 SUMMARY

The main objective of this work was to calibrate the estimation of dry matter production of the different components of the growth of a meadow of *Festuca arundinacea* during the winter period, by means of a ceptometer (Accu PAR LP80), considering the relationship with the incident photosynthetically active radiation and the height. The botanical composition of the mixtures was also evaluated. The experiment was carried out on meadows in their third year of life, covering the periods from 4th. July to 30th. September, 2019, in paddock No. 33 of the UdelaR. Agronomy faculty. EEMAC (Mario A. Cassinoni Experimental Station). The experimental area covered a total of 2.3 hectares that were divided into 4 plots, each plot having a 10x10 m square. The results obtained were significant, in some variables more than others, for the estimation of forage. The environmental conditions during the experimental period, low temperatures and low rainfall during September, were some of the conditions for the growth of the pastures is not conducive.

Keywords: Calibration; Pasture; Ceptometer; Incident radiation.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. AGTR (Australian Government Office of the Gene Technology Regulator, AU). 2008. The biology of *Lolium multiflorum* Lam. (Italian ryegrass), *Lolium perenne* L. (perennial ryegrass) and *Lolium arundinaceum* (Shreb.) Darbysh (tall fescue). Victoria. 81 p.
2. Almada, S.; Palacios, M.; Villalba, S.; Zipitría, G. 2007. Efecto de la asignación de forraje y el suplemento energético sobre la performance de novillos holando sobre una pastura de raigras perenne, trébol blanco y *Lotus corniculatus*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 59 p.
3. Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echeverría, A.; Panario, D.; Puentes, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: clasificación de suelos. Montevideo, MAP. DSF. t.1, 96 p.
4. Altesor, A.; Oesterheld, M.; Leoni, E.; Lezama, F.; Rodríguez, C. 2005. Effect of grazing on community structure and productivity of a Uruguayan grassland. *Plant Ecology*. 179(1):83-91.
5. Álvarez, A. 1985. Manejo de cortes y fertilización nitrogenada en semilleros de *Paspalum dilatatum*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 114 p.
6. Antonaccio Guedes, M. A.; Mailhos Algorta, M.; Zerbino Mendez, J. C. 2016. Producción de forraje y carne de cuatro mezclas forrajeras en su primer verano y su segundo otoño de vida. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 129 p.
7. Ayala, W.; Bemhaja, M.; Cotro, B.; Docanto, J.; García, J.; Olmos, F.; Real, D.; Rebuffo, M.; Reyno, R.; Rossi, C.; Silva, J. 2010. Forrajeras: catálogo de cultivos 2010. Montevideo, Uruguay, INIA. 131 p.
8. Baeza, S.; Paruelo, J.; Ayala, W. 2011. Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del Este de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 15(2):2-17.

9. Barbosa, R. A. 2004. Características morfofisiológicas e acúmulo de Forragem em Capim-Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq. cv. Tanzânia) submetido a frequências e intensidades de pastejo. Thesis PhD. Viçosa, Brazil. Universidade Federal de Viçosa. 144 p.
10. Baret, F.; Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 35(2):161-173.
11. Boggiano, P.; Maraschin, G.; Nabinger, C.; Riboldi, J. 2002. Producao de material seca da pastagem native adubada com nitrogenio. In: Reunión del Grupo Técnico en Forrajeras del Cono Sur, Zona Campos (19^a., 2002, Corrientes, AR). Resúmenes. Mercedes, Corrientes, AR, s.e. p. 98.
12. Bonan, G. 1993. Importance of leaf área index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forests. *Remote Sensing of Environment*. 43(3):303-314.
13. Bouriaud, O.; Soudani, K.; Bréda, N. 2003. Leaf area index from litter collection: impact of specific leaf area variability within a beech stand. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 29(3):371-380.
14. Bradford, J.; Hicke, J.; Lauenroth, W. 2005. The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. *Remote Sensing of Environment*. 96(2):246-255.
15. Brancato Figueredo, N.; Lenguas Hounie, F.; Pons Paiva, P. 2019. Evaluación de la producción de forraje invierno/primaveral de dos mezclas perennes de primer año. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 49-61.
16. Bréda, N. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. (en línea). *Journal of Experimental Botany*. 54(392):2403-2417. Consultado may. 2020. Disponible en doi: 10.1093/jxb/erg263
17. Briske, D. D. 1991. Developmental morphology and physiology of grasses. In: Heitschmidt, R. K.; Stuth, J. W. eds. *Grazing management: an ecological perspective*. Portland, Oregon, USA, Timber. pp. 85-108.
18. Brougham, R. 1956. Effect of intensity of defoliation on regrowth of pasture. *Australian Journal of Agricultural Research*. 7:377-387.

19. Carámbula, M. 1977. Producción y manejo de pasturas sembradas. Montevideo, Hemisferio Sur. 463 p.
20. _____. 1997. Pasturas naturales mejoradas. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. 524 p.
21. _____. 2002. Pasturas y forrajes: potenciales y alternativas para producir forraje. Montevideo, Hemisferio Sur. t.1, 357 p.
22. _____. 2004. Pasturas y forrajes: manejo, persistencia y renovación de pasturas. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. t. 3, 412 p.
23. _____. 2010. Pasturas y forrajes: potenciales y alternativas para producir forrajes. Montevideo, Uruguay. Hemisferio Sur. t.1, 257 p.
24. Carnevalli, R. 2003. Dinâmica da rebrotação de pastos de Capim-Mombaça submetidos a regimes de desfolhação intermitente. Thesis PhD. Piracicaba, Brasil. Universidade de São Paulo. Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 136 p.
25. Casco, N.; Gutiérrez, F.; Rossi, C. 2012. Inclusión de endófitos benéficos en nuevos cultivares de festuca INIA Fortuna e INIA Aurora. (en línea). In: Día de Campo de Pasturas (2012, La Estanzuela, Colonia, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp.19-22 (Actividades de Difusión no. 696). Consultado abr. 2020. Disponible en <http://www.ainfo.INIA.uy/digital/bitstream/item/664/1/112761161012101650.pdf>
26. Chapman, D.; Lemaire, G. 1993. Morphogenetic and structural determinants of plant regrowth after defoliation. In: International Grassland Congress (17th., 1993, Palmerston North). Proceedings. Palmerston North, New Zealand Grassland Association/Keeling and Mundi. pp. 95-104.
27. Chason, J.; Baldocchi, D.; Huston, A. 1991. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. (en línea). Agricultural and Forest Meteorology. 57(1-3):107-128. Consultado may. 2020. Disponible en doi:10.1016/0168-1923(91)90081-Z.
28. Colabelli, M.; Agnusdei, M.; Mazzanti, A.; Lavreux, M. 1998. El proceso de crecimiento y desarrollo de gramíneas forrajeras como base para el manejo de la defoliación. INTA Balcarce. Boletín Técnico no. 148. 21 p.

29. Corsi, M. 1984. Effects of nitrogen rates and harvesting intervals on dry matter production, tillering and quality of the tropical grass *Panicum maximum* Jacq. PhD. Dissertation. Ohio, United States. The Ohio State University. 125 p.
30. Cowling, S.; Field, C. 2003. Environmental control of leaf area production: implication for vegetation and land-surface modeling. *Global Biogeochemical Cycles*. 17(1):1007-1010.
31. Durán, A. 1985. Los suelos del Uruguay. Montevideo, Hemisferio Sur. 398 p.
32. Duru, M.; Ducrocq, H. 2000. Growth and senescence of the successive grass leaves on a tiller. Ontogenic development and effect of temperature. *Annals of Botany*. 85(2):635-643.
33. Escuder, C. 1993. Efecto de algunos factores ambientales y de manejo sobre crecimiento de las pasturas. Balcarce, INTA. Unidad Integrada Balcarce. s.p.
34. Flynn, E.; Dougherty, C.; Wendroth, O. 2008. Assessment of Pasture Biomass with the Normalized Difference Vegetation Based Sensors. *Agronomy Journal*. 100(1):114-121.
35. Formoso, F. 2010. *Festuca arundinacea*. Manejo para producción de forraje y semillas. Montevideo, Uruguay, INIA. 183 p. (Serie Técnica no. 182).
36. Gallo, K. P.; Daughtry, C. S. T.; Bauer, M. E. 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn cano-pies. *Remote Sensing of Environment*. 22(3):209- 203.
37. Gao, Y.; Giese, M.; Brueck, H.; Yang, H.; Li, Z. 2013. The relation of biomass production with leaf traits varied under different land-use and precipitation conditions in an Inner Mongolia steppe. *Ecological Research*. 28:1029-1043.
38. García, J. 2003. Crecimiento y calidad de gramíneas forrajeras en La Estanzuela. Montevideo, Uruguay, INIA. 26 p. (Serie Técnica no. 133).
39. García Petillo, M.; Puppo, L.; Hayashi, R.; Morales, P. 2012. Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. s.p. Consultado 23 set. 2020. Disponible en <https://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/Metodologia%20para%20%2>

[Odeterminar%20los%20parametros%20hidricos%20de%20%20un%20%20suelo%20a%20campo.pdf](#)

40. Gastal, F.; Lemaire, G. 1988. Study of tall fescue sward growth under nitrogen deficiency conditions. *In*: General Meeting of the European Grassland Federation (12th., 1988, Dublin, Ireland). Proceedings. Dublin, Wicklow. pp. 323-327.
41. _____.; _____. 2015. Defoliation, shoot plasticity, sward structure and herbage utilization in pasture: Review of the underlying ecophysiological processes. *Agriculture*. 5 (4):1146-1171.
42. Gillet, M. 1984. Las gramíneas forrajeras. Zaragoza, Acribia. 335 p.
43. Golluscio, R.; Deregibus, V.; Paruelo, J. M. 1998. Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecología Austral*. 8:265-284.
44. Gower, S.; Kucharik, C. J.; Norman, J. M. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 70(1):29-51.
45. Grigera, G.; Oesterheld, M.; Pacín, F. 2007. Monitoring forage production for farmers decision making. *Agricultural Systems*. 94:637-648.
46. Hodgson, J. 1990. *Grazing management: science into practice*. New York, Longman. 203 p.
47. INASE (Instituto Nacional de Semillas, UY). 2004. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado abr. 2020. Disponible en http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
48. _____. 2005. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p. Consultado abr. 2020. Disponible en http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
49. _____. 2006. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p. Consultado abr. 2020. Disponible en http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm

50. _____. 2007. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p.
Consultado abr. 2020. Disponible en
http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
51. _____. 2008. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p.
Consultado abr. 2020. Disponible en
http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
52. _____. 2009. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p.
Consultado abr. 2020. Disponible en
http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
53. _____. 2010. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 97 p.
Consultado abr. 2020. Disponible en
http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
54. _____. 2011. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 105 p.
Consultado nov. 2019. Disponible en
http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
55. _____. 2012. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 111 p.
Consultado abr. 2020. Disponible en
http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
56. _____. 2013. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 117 p.
Consultado abr. 2020. Disponible en
http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
57. _____. 2014. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 114 p.
Consultado abr. 2020. Disponible en
http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
58. _____. 2015. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 106 p.
Consultado abr. 2020. Disponible en

http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm

59. _____. 2016. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 110 p. Consultado abr. 2020. Disponible en http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
60. _____. 2017. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 99 p. Consultado abr. 2020. Disponible en http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
61. _____. 2018. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 93 p. Consultado abr. 2020. Disponible en http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
62. _____. 2019. Catálogo forrajeras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 109 p. Consultado abr. 2020. Disponible en http://www.INIA.org.uy/convenio_INASE_INIA/resultados/index_00.htm
63. Jarlan, L.; Balsamo, G.; Lafont, S.; Beljaars, A.; Calvet, J. C.; Mougín, E. 2008. Analysis of leaf area index in the ECMWF land Surface model and impact on latent heat and carbon fluxes: application to West Africa. *Journal of Geophysical Research*. 113:1-22.
64. Jonckheere, I.; Fleck, S.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Coppin, P.; Weiss, M.; Baret, F. 2004. Methods for leaf area index determination. Part I. Theories, techniques and instruments. *Agricultural and Forest Meteorology*. 121(1):19-35.
65. Leconte, D. 1986. Comportement du triple blanc associé à graminées en basse. *Fourrages (Normandie)*. 108:103-128.
66. Ludlow, M. 1976. Ecophysiology of C4 grasses, *In*: Lange, O.; Kappen, L.; Schulze, E. eds. *Water and plant life*. Berlin, Springer-Verlag. pp. 364-386.

67. Mckee, W. H.; Brown, R. H.; Blaser, R. E. 1967. Effect of clipping and nitrogen fertilization on yield and stands of tall fescue. *Crop Science*. 7(6):567-570.
68. Mcnaughton, S. J.; Oesterheld, M.; Frank, D. A.; Williams, K. J. 1989. Ecosystem level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*. 341:142-144.
69. Maraschin, E. G. 1993. Experiências de avaliação de pastagens com bovinos de corte no Brasil. *In*: Puignau, J. P. ed. Metodología de evaluación de pasturas. Montevideo, Uruguay, IICA. pp. 127-146 (Diálogo no. 38).
70. Mazzanti, A.; Lemaire, G. 1994. Effect of nitrogen fertilization on herbage production of tall fescue swards continuously grazed by sheep. Consumption and efficiency of herbage utilization. *Grass and Forage Science*. 49(3):352-359.
71. MDN. DNM (Ministerio de Defensa Nacional. Dirección Nacional de Meteorología, UY). 2009. Características climáticas de Uruguay. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 20 set. 2020. Disponible en <http://meteorologiauruguay.blogspot.com.uy/2009/04/caracteristicas-climaticas-de-uruguay.html>
72. Mena-Petite, A.; González-Moro, B.; González-Murua, C.; Lacuesta, M.; Muñoz, R. A. 2000. Sequential Effects of Acidic Precipitation and Drought on Photosynthesis and Chlorophyll Fluorescence Parameters of *Pinus radiata* D. Don Seedlings. (en línea). *Journal of Plant Physiology*. 156(1):84-92. Consultado feb. 2020. Disponible en doi: 10.1016/S0176-1617(00)80276-X.
73. Millot, J.; Methol, R.; Risso, D. 1987. Relevamiento de pasturas naturales y mejoramientos extensivos en áreas ganaderas del Uruguay. Montevideo, FUCREA. 199 p.
74. Molfino, J. 2009. Estimación del agua disponible en los grupos CONEAT: metodología empleada. (en línea). s.n.t. s.p. Consultado 21 nov. 2017. Disponible en http://www.cebra.com.uy/renare/wp-content/files_mf/1341437011estimaciondelaguadisponibleenlosgruposconeat.pdf
75. Monteith, J. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*. 9(3):747-766.

76. Morley, F. H. W. 1978. Animal production studies in grasslands. In: T Manetje, L. ed. Measurements of grassland vegetation and animal production. London, Cambrian News. pp. 103-162.
77. Moser, G.; Hertel, D.; Leuschner, C. 2007. Altitudinal change in LAI and stand leaf biomass in tropical Montane forest: a transect shady (study) in Ecuador and a pan-tropical meta-analysis. *Ecosystems*. 10:924-935.
78. Nabinger, C. 1996. Eficiencia do uso de pastagens: disponibilidade e perdas de forragem. In: Simposio sobre Manejo de Pastagem (14^o.,1997, Piracicaba). Fundamentos do pastejo rotacionado. Piracicaba, Brasil, ESALQ. pp.213-251.
79. _____. 1997. Principios da exploração intensiva de pastagens: produção de bovinos a pasto. In: Simposio sobre Manejo da Pastagem (13^o., 1997, Piracicaba). Fundamentos do pastejo rotacionado. Piracicaba, Brasil, FEALQ. pp. 15-95.
80. _____. 2006. Manejo de campo nativo na região sul e a viabilidade do uso da modelos. Rio Grande do Sul, UFRGS. 28 p.
81. Nilsen, E. T.; Orcutt, D. M. 1996. Physiology of plants under stress: abiotic factors. New York, NY, Wiley. 138 p.
82. Nouvellon, Y.; Lo seen, D.; Rambal, S.; Bégué, A.; Moran, M.; Kerr, Y.; Qi, J. 2000. Time course of radiation use efficiency in a shortgrass ecosystem: consequences for remotely sensed estimation of primary production. *Remote Sensing of Environment*. 71(1):43-55.
83. Oosterheld, M.; DiBella, C. M.; Kerdiles, H. 1998. Relation between NOAA AVHRR satellite data and stocking rate of rangelands. *Ecological Applications*. 8(1):207-212.
84. _____.; Paruelo, J. M.; Oyarzabal, M. 2011. Estimación de la productividad primaria neta aérea a partir de diferencias de biomasa y de integración de la radiación absorbida. In: Altesor, A.; Ayala, W.; Paruelo, J. M. eds. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Montevideo, INIA. pp. 113-120 (FPTA no. 26).
85. Olivas, P. C.; Oberbaceur, S. F.; Clark, D. B.; Clark, D. A.; Ryan, M. G.; O'Brien, J. J.; Ordoñez, H. 2013. Comparison of direct and indirect

methods for assessing leaf area index 49 across a tropical rain forest landscape. *Agricultural and Forest Meteorology*. 177(2):110-116.

86. Paruelo, J. M.; Epstein, H. E.; Lauenroth, W. K.; Burke, I. C. 1997. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the us. *Ecology*. 78(3):953-958.
87. Peduzzi, A.; Wynne, R. H.; Fox, T. H.; Nelson, R. F.; Thomas, V. A. 2012. Estimating leaf area index in intensively managed pine plantations using airborne laser scanner data. *Forest Ecology and Management*. 270:54-65.
88. Penman, J.; Gytarsky, M.; Hiraishi, T.; Krug, T.; Kruger, D.; Pipatti, R.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K.; Wagner, F. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Kamiyamaguchi Hayama, Kanagawa, Japan, s.e. pp. 38-40.
89. Piñeiro, G.; Oesterheld, M.; Paruelo, J. 2006. Seasonal variation in aboveground production and radiation use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*. 9:357-373.
90. Pokorný, R.; Tomášková, I.; Havránková, K. 2008. Temporal variation and efficiency of leaf area index in young mountain Norway spruce stand. *European Journal of Forest Research*. 127:359-367.
91. Potter, C. S.; Randerson, J. T.; Field, C. B.; Matson, P. A.; Vitousek, P. M.; Mooney, H. A. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*. 7(4):811-841.
92. Potters, G.; Pasternak, Y.; Guisez, K.; Palme, J.; Jansen, M. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends in Plant Science*. 12(3):99-105.
93. Pravia, M.; Montossi, F.; Gutiérrez, D.; Ayala, W.; Andregnette, B.; Invernizzi, G.; Porcile, V. 2013. Estimación de la disponibilidad de pasturas y forrajes en predios de GIPROCAR II: ajuste del "Rising plate meter" para las condiciones de Uruguay. In: Montossi, F. ed. Invernada de precisión: pasturas, calidad de carne, genética, gestión empresarial e impacto ambiental (GIPROCAR II). Montevideo, INIA. pp. 31-65 (Serie Técnica no. 211).
94. Rosengurtt, B. 1943. Estudios sobre praderas naturales del Uruguay: 3ª. contribución. Montevideo, Barreiro y Ramos. p. 116.

95. _____. 1946. Estudios sobre praderas naturales del Uruguay: 5ª. contribución. Montevideo, Rosgal. 474 p.
96. _____. 1979. Tabla de comportamiento de las especies de campo natural en el Uruguay. Montevideo, Universidad de la República. Departamento de Publicaciones y Ediciones. 86 p.
97. Sacardi-Biudes, M.; Gomes-Machado, N.; de Moraes-Danelichen, V.; Caldas-Souza, M.; Vourlitis, J.; de Souza-Nogueira, J. 2014. Ground and remote sensing-based measurements of leaf area index in a transitional forest and seasonal flooded forest in Brazil. (en línea). *International Journal of Biometeorology*. 58(6):1181-1193. Consultado 17 oct. 2020. Disponible en DOI: 10.1007/s00484-013-0713.
98. Shao, H. B.; Chu, L. Y.; Jaleel, C. A.; Zhao, C. X. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes Rendus Biologies*. 331:215-225.
99. Smethan, M. 1981. Manejo del pastoreo. *In*: Langer, R. H. M. ed. Las pasturas y sus plantas. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 209-270.
100. Tambussi, E. A. 2004. Fotosíntesis, fotoprotección, productividad y estrés abiótico: algunos casos de estudio. Barcelona, Universitat de Barcelona. Facultat de Biologia. Departament de Biologia Vegetal. Divisó de Ciéncies Experimentals: Matematiques. 203 p.
101. Vallentine, J. F. 1990. Grazing management. San Diego, CA, USA, Academic Press. 533 p.
102. Villareal González, J. A.; Hernández-Garay, A.; Martínez Hernández, P. A.; De Dios Guerrero Rodríguez, J.; Velazco Zebadúa, M. 2014. Rendimiento y calidad de rendimiento y calidad de forraje del pasto ovilla (*Dactylis glomerata* L.) al variar la frecuencia e intensidad de pastoreo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 5(2):231-245.
103. Vyas, D.; Mehta, N.; Dinakarna, J.; Krishnayya, N. S. R. 2010. Allometric equations for estimating leaf area index (LAI) of two important tropical species (*Tectona grandis* and *Dendrocalamus strictus*). *Journal of Forestry Research*. 21(2):197-200.
104. Wahid, A.; Gelani, S.; Ashraf, M.; Foolad, M. R. 2007. Heat tolerance in plants: an overview. (en línea). *Environmental and Experimental Botany*.

61:199-223. Consultado 17 nov. 2020. Disponible en Doi:
10.1016/j.envexpbot.2007.05.011

105. Watson, D. J. 1947. Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops. I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties and between Years. *Annals of Botany*. 11(1):41-76.
106. Whitehead, D. C. 1970. The role of nitrogen in grassland productivity: a review of information from temperate regions. Farnham Royal, CAB. 202 p. (CAB Bulletin no. 48).
107. Williams, T. 1980. Herbage production: grasses and leguminous forage crops. In: Holmes, W. ed. *Grass: its production and utilization*. Oxford, Centre for Agriculture and Biosciences International. pp. 6-7.
108. Wilson, D. 1973. Physiology of light utilization by swards. In: Butler, G.; Bailey, R. eds. *Chemistry and biochemistry of herbage*. London, Academic Press. pp. 57-102.
109. Yang, W.; Tan, B.; Huang, D.; Rautiainen, M.; Shabanov, N. V.; Wang, Y.; Privette, J. L.; Huemmrich, K. F.; Fensholt, R.; Sandholt, I.; Weiss, M.; Ahl, D. E.; Gower, S. T.; Nemani, R. R.; Knyazikhin, Y.; Myneny, R. B. 2006. MODIS leaf area index products: from validation to algorithm improvement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 44(7):1885-1898.

9. ANEXOS

Tabla 1. Balance hídrico del periodo de estudio (jun.-set. 2019)

						CAAD	86			
Año	Mes	T. media	P. acumulada	Ev. acumulada	Kc.	Etc.	P-ETP	Alm.	Var. alm.	ETR
2019	20 jun.	13,6	186,8	8,59				86		
2019	01 jul.	14,1	8,4	12,88	0,9	11,6	2,5	86,0	0,0	11,6
2019	10 jul.	12,7	23,0	19,3	0,9	17,4	-4,6	81,5	-4,5	17,3
2019	21 jul.	12,9	4,8	18,3	0,9	16,5	-3,6	78,1	-3,4	16,2
2019	01 ago.	7,3	0,4	15,8	0,9	14,2	-6,9	72,1	-6,0	13,3
2019	11 ago.	11,2	57,2	19,08	0,9	17,2	-5,9	67,3	-4,8	16,0
2019	21 ago.	9,7	5	24,98	0,9	22,5	-12,8	58,0	-9,3	19,0
2019	01 set.	14,1	42,2	26,04	0,9	23,4	-9,4	52,0	-6,0	20,1
2019	11 set.	13,7	3,4	20,3	0,9	18,3	-4,6	49,3	-2,7	16,4
2019	21 set.	13,9	31,6	27,7	0,9	25,0	-11,1	43,3	-6,0	19,8
2019	30 set.	16,9	1,8	47,1	0,9	42,3	-25,4	32,2	-11,1	28,0

Cuadro 2. Correlación entre altura y PARt por parcela, con los kg de materia seca total y los kg de materia seca de lámina de la parcela

Parcela	Kg/MSt	Kg/MSL	Altura (cm)	PARt	n	Pearson	p-valor
1	1539	835,6	9,5 ± 2,5	624	20	-0,8	<0,0001
2	1577	741	9,3 ± 2,5	643	20	-0,74	0,0002
3	1632	1015,9	9,8 ± 2,5	678	20	-0,6	0,0055
4	1997	1036,4	10,2 ± 2,1	627	20	-0,46	0,0431

Cuadro 3. Correlaciones entre altura x PARt por parcela a lo largo de los momentos

Momento de medición	Parcela 1								
	Altura	Desv. est.	Msl (kg/ha)	Desv. est.	PARt	n	Pearson	p valor	
1	11,26	0,8	640,3	sd	sd	0	sd	sd	
	9,14	1,2	613,6	76,6	585,14	5	0.29	0.6322	
	11,52	1	907,1	85,7	420,48	5	0,06	0.9191	
	9.72	2,2	1386,4	168,7	867,84	5	-0,9	0.0354	
	5,72	1	631,2	158,8	1219,54	5	-0.59	0.2921	
2	Parcela 2								
	Altura	Desv. est.	Msl (kg/ha)	Desv. est.	PARt	n	Pearson	p valor	
	9,44	2,5	436,5	sd	sd	0	sd	sd	
	8,366	2,6	621.1	216,3	538,44	5	-0,68	0.2066	
	10.66	1.1	954.7	170.6	421,7	5	-0.83	0.0786	
3	3	9.68	2,2	1052.3	231.5	619,54	5	-0.88	0.0496
		7.1	1,9	640,6	102,3	995,62	5	-0,41	0,4901
		Parcela 3							
		Altura	Desv. est.	Msl (kg/ha)	Desv. est.	PARt	n	Pearson	p valor
		9,32	2,7	459,6	sd	sd	0	sd	sd
8.66	1,7	834,3	206,6	481,18	5	-0,76	0.1342		
11.58	1,2	896,2	72,1	536,56	5	-0,76	0,1333		
9.68	3,2	1611,5	255,6	590,24	5	-0,81	0,0934		
8.36	1,5	721,8	115,9	1104,78	5	-0,41	0.489		
4	Parcela 4								
	Altura	Desv. est.	Msl (kg/ha)	Desv. est.	PARt	n	Pearson	p valor	
	10,28	1,8	483,4	sd	sd	0	sd	sd	
	9.14	1,4	898,5	108	588,58	5	-0,72	0.1689	
	11,58	2,3	1062,5	98,5	601,98	5	-0,67	0,2166	
10,46	2,8	1604,5	150,8	456,06	5	-0.54	0.3519		
9,42	1,1	1133,4	72,9	863,94	5	-0,57	0,3133		