

## Estimación de la productividad primaria neta aérea y capacidad de carga ganadera: un estudio de caso en Sierras del Este, Uruguay

Gallego Federico<sup>1</sup>, Lezama Felipe<sup>2</sup>, Pezzani Fabiana<sup>2</sup>, López-Mársico Luis<sup>1</sup>, Leoni Elsa<sup>1</sup>, Mello Ana Laura<sup>1</sup>, Costa Beatríz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de la República, Facultad de Ciencias, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales. Iguá 4225, 11400 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: fgallego@fcien.edu.uy.

<sup>2</sup>Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Sistemas Ambientales, Ecología.

Recibido: 2016-09-30 Aceptado: 2016-11-23

### Resumen

En los sistemas de producción ganadera bajo pastoreo es fundamental conocer la Capacidad de Carga (CC). La Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) es la variable más importante para estimar la CC ya que representa la principal fuente de energía para los herbívoros. La PPNA puede ser estimada a partir de cortes sucesivos de biomasa o a partir de información espectral. En este trabajo nos planteamos generar información de la PPNA, de dos unidades de pastizales (densos y abiertos), a partir de datos satelitales. Para ello se determinó la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) de las unidades de pastizal mediante la combinación de datos satelitales y datos de campo. A su vez estimamos, a partir de un método simplificado, la CC de un establecimiento ganadero representativo de la región de Sierras del Este. La EUR para pastizales densos fue de 0,38 grMS/MJ (Materia Seca/Mega Joules), mientras que para pastizales abiertos fue de 0,44 grMS/MJ. La EUR de los pastizales no mostró ser significativamente diferente, por lo que la EUR total fue de 0,36 grMS/MJ. La PPNA promedio para los 14 años de los pastizales densos y abiertos fue de 2876 y 1711 kgMS/ha\* año, respectivamente. La CC promedio para el establecimiento analizado fue de 0,44 UG/ha. La CC varió entre los potreros dependiendo de la importancia relativa de cada unidad de pastizal. La información de PPNA generada y el procedimiento de estimación de CC empleado ponen a disposición de técnicos y productores, una forma sencilla para estimar la CC de sus potreros.

**Palabras clave:** teledetección, eficiencia en el uso de la radiación, pastizales

## Estimating Aboveground Net Primary Production and Carrying Capacity: a Case Study in Sierras del Este, Uruguay

### Summary

In livestock production systems under grazing it is essential to know the Carrying Capacity (CC). Aboveground Net Primary Productivity (ANPP) is the most important variable to estimate the CC as it represents the main source of energy for herbivores. The ANPP can be estimated from successive biomass harvests or from spectral information. The aim of this study was generate information about the ANPP, for two grassland units (dense and open), based on satellite data. For this purpose, the Efficiency in the Use of the Radiation (EUR) was determined for two grasslands units, by combining satellite and field data. In turn, we estimated, based on a simplified method, the CC of a representative cattle farm in Sierras del Este region. EUR was 0,38 and 0,44 grMS/MJ (Dry Matter/Mega Joules) for dense and open grasslands, respectively. The EUR for each grassland unit did not show significant differences. For this reason the total EUR was of 0,36 grMS/MJ. The average ANPP for the 14 years of the dense and open grasslands was 2876 and 1711 kgMS/ha\*year, respectively. The average CC for the analyzed farm was 0,44 UG/ha. CC varied among paddocks depending on the relative importance of each grassland unit. The ANPP information generated and the CC estimation procedure used in this study provides to technicians and producers a simple way to estimate the CC of their farm.

**Keywords:** remote sensing, radiation use efficiency, grasslands

## Introducción

En los sistemas de producción ganadera bajo pastoreo es fundamental conocer la capacidad de carga (CC), es decir, la carga ganadera máxima que permitirá alcanzar niveles elevados de producción, en un área determinada, sin deteriorar el recurso (Allen et al., 2011). A pesar de que en Uruguay más del 65 % del territorio está dedicado a la ganadería extensiva (DIEA, 2013), existe poca información disponible acerca de su variación entre recursos forrajeros o dentro de un mismo recurso, entre años y unidades de manejo (potreros). Los escasos estudios existentes reportan un exceso generalizado en la carga ganadera (superior a la CC), asociado principalmente a los cambios en el uso del suelo, a la disminución del stock ovino y al uso de suplementación (Soca, Do Carmo y Claramunt, 2007; Tommasino, 2010). Esto genera consecuencias negativas en la producción física y en el ingreso económico de los establecimientos (Berretta et al., 2000; Soca, Do Carmo y Claramunt, 2007).

Una correcta estimación de la CC requiere del conocimiento acerca de la estructura y del funcionamiento potencial del recurso forrajero (Vecchio, Golluscio y Cordero, 2008; Golluscio, 2009). En este sentido, la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) es la variable más importante para estimar la CC ya que representa la principal fuente de energía para los herbívoros (Sala y Austin, 2000). La baja disponibilidad de datos sobre la PPNA y la gran variabilidad espacial y temporal (tanto estacional como entre años), es reconocida como uno de los principales factores que más incide sobre la eficiencia de los establecimientos ganaderos (Golluscio, Deregibus y Paruelo, 1998). Esta alta variabilidad puede provocar muchas veces una subutilización del forraje, o también la sobreexplotación con el consecuente deterioro de los recursos forrajero y edáfico.

La PPNA puede ser estimada a partir de métodos tradicionales, como los cortes sucesivos de biomasa (Altesor et al., 2005; Bermúdez y Ayala, 2005; Oesterheld, Paruelo y Oyarzabal, 2011; Pezzani et al., 2017), o a partir de métodos innovadores, como los modelos empíricos (Grigera et al., 2007; Grigera, Oesterheld y Pacín, 2007; Piñeiro, Oesterheld y Paruelo, 2006; Paruelo, Oyarzabal y Oesterheld, 2011). Debido a las grandes variaciones estacionales que muestra la PPNA, los métodos tradicionales presentan ciertas desventajas para su correcta estimación (Sala, Biondini y Lauenroth, 1988; Scurlock, Johnson y Olson, 2002). Por un lado, son costosos en tiempo y esfuerzo; además, sus resultados responden a situaciones particulares del sitio en

estudio, lo que dificulta las extrapolaciones a nivel regional (Chuvieco, 2002). En este sentido, los modelos empíricos (principalmente aquellos basados en datos aportados por sensores remotos) toman importancia, ya que resuelven con gran precisión muchos de estos inconvenientes (Grigera, Oesterheld y Pacín, 2007; Piñeiro, Oesterheld y Paruelo, 2006).

En las últimas décadas, la puesta en órbita de satélites ha permitido coleccionar datos sobre la superficie terrestre. Los sensores remotos presentan características que los hacen sumamente adecuados para estimar la PPNA. Por un lado es un método poco costoso, además de que permite cubrir grandes extensiones y en períodos constantes de tiempo (Chuvieco, 2002). Uno de los productos derivados de los sensores remotos son los índices espectrales, entre los cuales el Índice de Vegetación Normalizada (IVN) es uno de los más utilizados. El IVN es calculado a partir de la reflectancia en la porción del espectro electromagnético correspondiente al rojo e infrarrojo  $[(IR - R) / (IR + R)]$ . Este índice muestra una estrecha relación con la fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (fRFAA) por la vegetación verde y por lo tanto con la PPNA (Tucker y Sellers, 1986; Prince, 1991; Paruelo et al., 2004; Piñeiro, Oesterheld y Paruelo, 2006).

Monteith (1972) planteó un modelo empírico para estimar la PPNA. La misma está determinada por la cantidad de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por la vegetación y la eficiencia con que esa energía es transformada en materia seca aérea (EUR) (Ecuación 1). La RFAA es calculada a partir del producto entre la Radiación Fotosintéticamente Activa Incidente (RFAi, medida en estación meteorológica) y la fracción de esta que es absorbida por las hojas verdes (fRFAA). A su vez, la fRFAA es estimada a partir del IVN. El segundo factor de la ecuación, la EUR, puede ser estimada de dos formas: 1) a partir de índices espectrales (Índice de Reflectancia Fotoquímico; Garbulsky et al., 2008); 2) a partir de despejar este factor de la ecuación de Monteith (1972). En este último caso se requiere de estimaciones de PPNA independientes y de la radiación RFAA (Piñeiro, Oesterheld y Paruelo, 2006; Oyarzabal, Oesterheld y Grigera, 2011; Baeza, Paruelo y Ayala, 2011).

$$PPNA \text{ (kgMS/ha*mes)} = RFAi \text{ (MJ/ha*mes)} * fRFAA * EUR \text{ (kgMS/MJ)} \quad (1)$$

La región Sierras del Este es una de las principales zonas ganaderas del país. Ocupa aproximadamente el 14 % de la superficie nacional, de los cuales el 87,6 % corresponde a pastizales naturales (Baeza et al., 2011).

Pese a la gran cobertura de pastizales y de la importancia económica que tienen en la región, se conoce poco acerca de la variación estacional y anual de su PPNA. Son escasos los datos disponibles, y la única serie temporal de varios años proviene de la década del 80 (Más, Bermúdez y Ayala, 1997). Esta falta de información representa una fuerte restricción para la estimación de la CC de establecimientos ganaderos sobre pastizal natural.

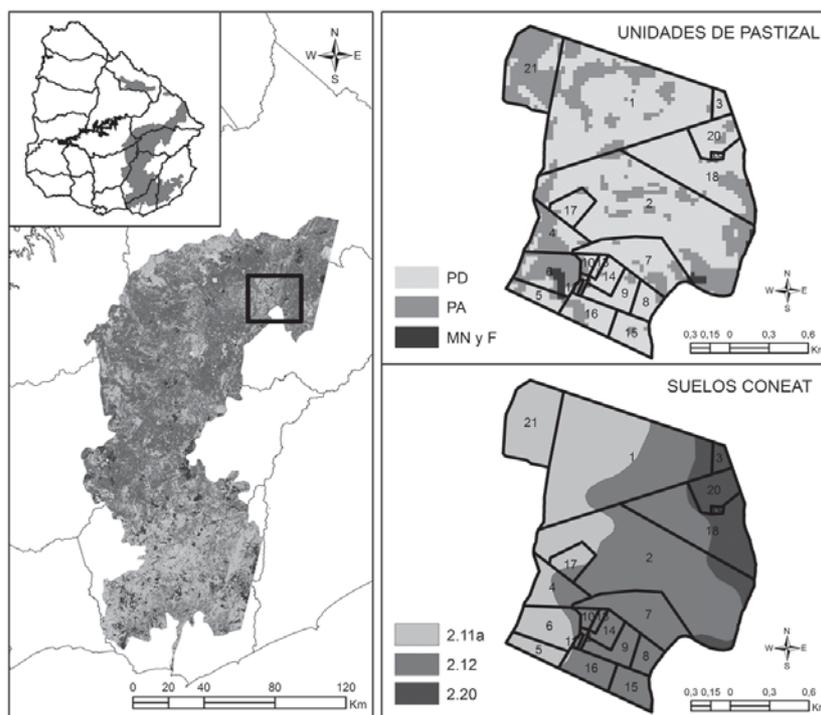
En este trabajo nos planteamos, en primer lugar, estimar la PPNA a partir de datos satelitales, de las principales unidades de pastizal natural de Sierras del Este para un período de 14 años (2001-2014). Este objetivo comprendió determinar la EUR de las unidades de pastizal natural a partir de la combinación de datos satelitales y datos de campo (cortes de biomasa). En segundo lugar nos planteamos estimar, mediante un método simplificado, la CC de un establecimiento ganadero representativo de la región de Sierras del Este. Para ello consideramos las distintas unidades de pastizales descritas y cartografiadas para la región, y su PPNA estimada a partir de sensores remotos.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El área de estudio se ubica en la unidad de suelos Sierras de Polanco, localizada al este del territorio nacional y comprendida dentro de la región geomorfológica Sierras del Este (Panario, 1987). Esta región ocupa aproximadamente 2,5 millones de ha (14 % de la superficie del país) y se extiende por los departamentos de Lavalleja, Treinta y Tres, Maldonado, sur de Cerro Largo, noreste de Florida, sur de Rocha y este de Durazno (Figura 1). La precipitación media anual para el período 2000-2014 fue de 1450 mm y la temperatura media anual fue de 17 °C (INIA, 2015).

En la región Sierras del Este los pastizales naturales son la vegetación predominante, presentándose en forma de un mosaico de varios tipos de comunidades (Lezama et al., 2011). Esta heterogeneidad se resume en dos tipos de unidades principales, las cuales fueron cartografiadas a partir del uso de técnicas de teledetección (Baeza et al., 2011)



**Figura 1.** Ubicación en el territorio nacional del área de estudio y el mapa con la distribución espacial de las unidades de pastizal (izquierda). Límites prediales y de potreros del establecimiento ganadero en estudio, con las unidades de pastizal (superior derecha) y suelos CONEAT (inferior derecha). PA: Pastizales abiertos, PD: Pastizales densos y MN y F: Monte Nativo y Forestación.

(Figura 1). Las unidades de pastizal cartografiadas se denominan pastizales abiertos (asociados a suelos superficiales) y pastizales densos (asociados a suelos medios y profundos). Los pastizales abiertos presentan una cobertura vegetal del 70 % debido a la ocurrencia de pedregosidad y rocosidad en superficie. Están asociados a suelos superficiales y muy superficiales ubicados mayormente en áreas convexas altas y laderas pronunciadas de sierras y colinas. Los pastizales densos presentan una cobertura vegetal mayor al 95 % y están asociados a suelos profundos ubicados preferentemente en interfluvios planos y en laderas planas y cóncavas de pendiente leve a moderada.

### Obtención y procesamiento de imágenes satelitales

Se utilizaron series temporales (2001-2014) de imágenes del IVN del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites EOS Terra y EOS Aqua. Estos satélites producen una imagen cada 16 días con una resolución espacial de 250 x 250 metros (Colección 5 MOD13, NASA, 2001-2014). Cada imagen se filtró tomando en cuenta su banda de calidad. Dicha banda considera la presencia de nubes, sombras y los niveles de aerosoles en la atmósfera (Roy et al., 2002). De esta manera se descartaron los píxeles que no presentaron una elevada calidad y se reemplazaron por una interpolación lineal entre el valor anterior y el siguiente. Para el procesamiento de las imágenes de satélite se utilizó el software ENVI 5.0 y para las operaciones con sistemas de información geográfica se utilizó el software ArcGIS 10.2.

A partir de la serie temporal de IVN se calibró la relación entre el IVN y la fRFAA interceptada por la vegetación verde. La relación entre IVN y fRFAA se calibró mediante una interpolación no lineal (Potter et al., 1993) con valores calibrados para la región (Grigera, Oesterheld y Pacín, 2007). El máximo de IVN se fijó como el 98 percentil de la serie temporal, estableciéndose como el 95 % de fRFAA interceptada (asumiendo saturación a valores de área foliar mayores). El mínimo de IVN se fijó como el 5 percentil de la serie de datos y corresponde a zonas con suelo desnudo, estableciéndose como fRFAA = 0. La relación entre IVN y fRFAA quedó dada por la siguiente ecuación:

$$fRFAA = \text{MIN}((SR/SR_{\max} - SR_{\min}) - (SR_{\min}/SR_{\max} - SR_{\min}); 0,95)$$

donde  $SR = (1 + IVN) / (1 - IVN)$ ,  $SR_{\max} = 11,62$  y  $SR_{\min} = 1,55$

La RFAA por la vegetación se obtuvo de multiplicar la fracción interceptada (fRFAA) por la RFAi. La RFAi se calculó a partir de valores diarios de heliofanía (horas de sol) para el período comprendido. Se utilizaron los datos de la

estación meteorológica de INIA Treinta y Tres situada a 35 km del área de estudio. En zonas como la de los pastizales del Río de la Plata, la radiación acumulada durante un período de tiempo relativamente largo depende principalmente del momento del año y de la latitud. Por esta razón se pueden utilizar datos de estaciones meteorológicas que no estén necesariamente en el sitio para el que se está calculando la RFAA (Oyarzabal, Oesterheld y Grigera, 2011).

### Estimación de la eficiencia en el uso de la radiación

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR) se estimó invirtiendo el modelo de Monteith (1972). Se realizaron cortes estacionales de biomasa, con jaulas móviles de 1 x 0,5 m, en cuatro sitios (dos potreros dominados por pastizales densos y dos potreros dominados por pastizales abiertos), entre junio de 2011 y junio de 2012 (Pezzani et al., 2017). La metodología utilizada consistió en la colocación de cuatro jaulas móviles (para exclusión del ganado) donde se retiró el material vegetal en dos cuadrantes de 0,5 x 0,2 metros. Al momento de colocar las jaulas se establecieron los tiempos iniciales de crecimiento ( $t_0$ ) coincidiendo con el comienzo de cada estación. Se retiró el material vegetal por encima de los 2 cm del suelo en los cuadrantes dentro de cada jaula. Luego de aproximadamente tres meses, se cosechó la biomasa vegetal, desde los 2 cm de suelo, correspondiente a los tiempos finales de crecimiento ( $t_1$ ). Luego de las cosechas estacionales, las jaulas se reubicaron en cada sitio, a no menos de 10 metros de distancia de la ubicación anterior (de acuerdo a lo sugerido por Klingman, Miles y Mott, 1943), manteniéndose dentro del parche de la unidad de pastizal correspondiente. El material cosechado se secó en estufa a 70 °C durante 48 h. En total se contó con 32 (16 para pastizales densos y 16 para pastizales abiertos) valores de biomasa cada aproximadamente 30 días.

Se tomaron en cuenta los periodos de solapamiento entre la PPNA estimada con cortes de biomasa a campo y la RFAA estimada a partir de imágenes de satélite. La aproximación se basó en ajustar un modelo de regresión lineal entre la productividad y la radiación absorbida, para cada unidad por separado, en donde la productividad es la variable predicha (y) y la RFAA la variable predictor (x) (Le Roux et al., 1997). Cuando la ordenada al origen del modelo lineal resulta igual o no significativamente distinta de cero, la pendiente del modelo representa la EUR (Verón, Oesterheld y Paruelo, 2005). La estimación de la EUR se realizó siguiendo este método ya que minimiza el error de predic-

ción en la productividad primaria neta aérea (Oyarzabal, Oesterheld y Grigera, 2011).

### Estimación de la PPNA de las unidades de pastizal

Para estimar la PPNA, en un periodo de 14 años, de las dos unidades de pastizal presentes en Sierras del Este, se utilizó el modelo de Monteith (1972). La RFAA se calculó a partir del IVN y la RFAI, y se utilizó la EUR estimada para estos pastizales. Se seleccionaron 8 píxeles para cada unidad de pastizal distribuidos en cinco potreros próximos a los sitios donde se realizaron los cortes de biomasa. Los suelos CONEAT dominantes para los sitios con pastizal abierto fueron el 2.11a y el 2.10; y para los sitios con pastizal denso fueron el 2.12 y 2.14. El criterio de selección de los mismos se basó en la homogeneidad de la unidad dentro del píxel. Se consideraron píxeles «puros» aquellos que estaban ocupados más del 90 % por la misma unidad de pastizal.

Los datos de PPNA se analizaron mediante ANOVA de medidas repetidas con el tipo de pastizal como factor inter sujeto y año como factor intra sujeto.

### Estimación de la capacidad de carga

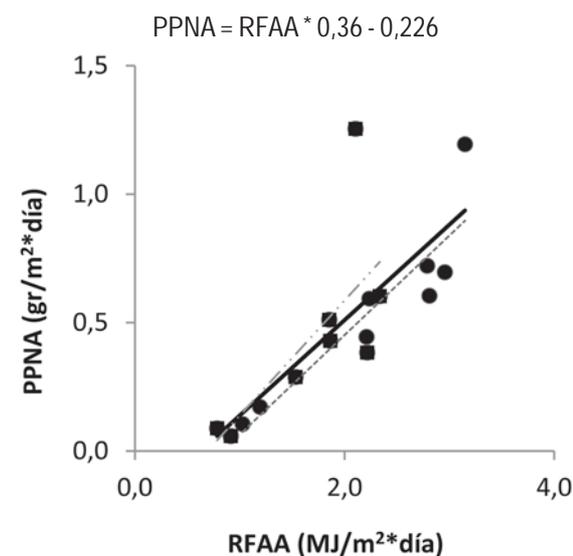
Para la estimación de la CC se seleccionó un establecimiento con una superficie de 323 hectáreas destinadas principalmente a la cría de ganado vacuno y ovino (Figura 1). En el periodo de estudio más del 90 % de la superficie del establecimiento estuvo ocupada por pastizales naturales, y los suelos CONEAT pertenecen a las categorías dominantes en la región (Figura 1). La CC se estimó según el método propuesto por Golluscio, Deregibus y Paruelo (1998) y Golluscio (2009). Estos autores plantean que la CC de un sitio determinado puede ser calculada de manera sencilla a partir de la PPNA, el Requerimiento Individual Anual y el Índice de Cosecha. En este sentido, se utilizó la PPNA de cada unidad de pastizal (promedio para los 14 años, año de máxima y mínima productividad) y se ponderó según el porcentaje de ocupación de cada una de ellas en la unidad de manejo (en este caso el potrero). El Requerimiento Individual Anual utilizado fue de 2774 kgMS (requerimiento de una Unidad Ganadera, Crempien, 1983; Pereira, 2011), mientras que el Índice de Cosecha utilizado (se asume constante para todo el año) se obtuvo de antecedentes bibliográficos, siendo el mismo del 50 % (Holechek, 1989; Holechek, Pieper y Herbel, 1989; Bermúdez et al., 2003; Saravia et al., 2011; Pereira, 2011). Cabe destacar que se descartaron dentro de los potreros las zonas ocupadas por monte nativo y con roca en superficie. De esta forma que-

daron contempladas en la estimación de la CC únicamente las áreas de pastizal.

## Resultados

### Eficiencia en el uso de la radiación

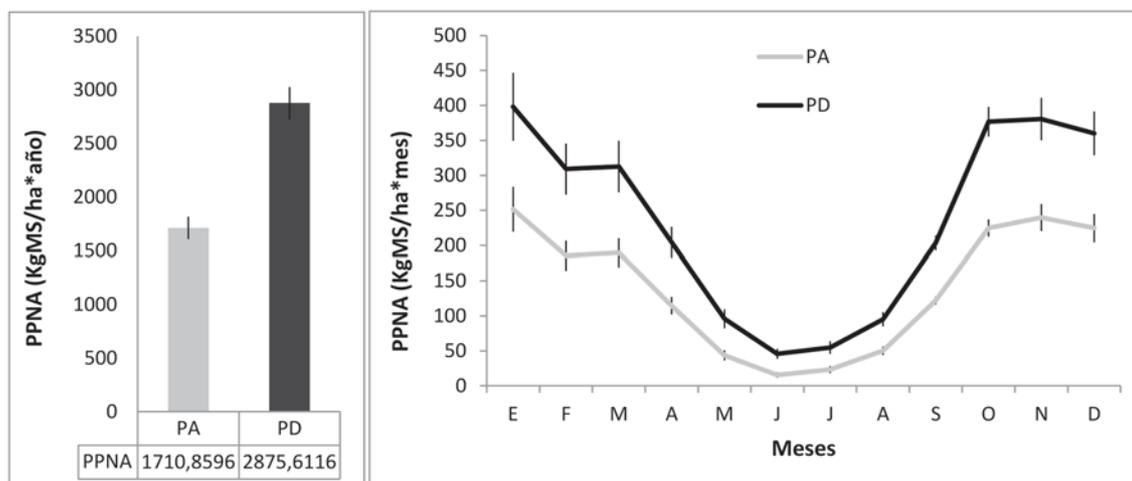
La EUR calculada mediante el ajuste de un modelo lineal entre PPNA y RFAA para la unidad de pastizales densos fue de 0,38 grMS/MJ ( $r^2 = 0,83$ ;  $N = 8$ ;  $p < 0,001$ ) y para la unidad de pastizales abiertos fue de 0,44 grMS/MJ ( $r^2 = 0,48$ ;  $N = 8$ ;  $p < 0,05$ ). Sin embargo, ambas pendientes no resultaron ser significativamente diferentes ( $F = 0,092$ ;  $p < 0,766$ ), por lo cual se calculó una EUR para el conjunto total de datos. En este sentido la EUR fue de 0,36 grMS/MJ ( $r^2 = 0,61$ ;  $N = 16$ ;  $p < 0,001$ ) (Figura 2) y el modelo para estimar la PPNA a partir de la RFAA fue:



**Figura 2.** Modelo lineal entre la PPNA (productividad primaria neta aérea, grMS/m<sup>2</sup>\*día) y la RFAA (radiación fotosintéticamente activa absorbida, MJ/m<sup>2</sup>\*día) para pastizales densos (círculos) y abiertos (cuadros). Se muestra la línea de tendencia para el conjunto total de los datos (línea completa), para pastizales densos (línea punteada) y abiertos (línea guion) de Sierras del Este.

### PPNA de las unidades de pastizal

La PPNA mensual para las unidades de pastizal, promedio para los 14 años, se muestra en la Figura 3. Los pastizales densos presentaron una producción anual de forraje de 2876 kgMS/ha\*año mientras que los pastizales abiertos de 1711 kgMS/ha\*año. En ambas unidades, el

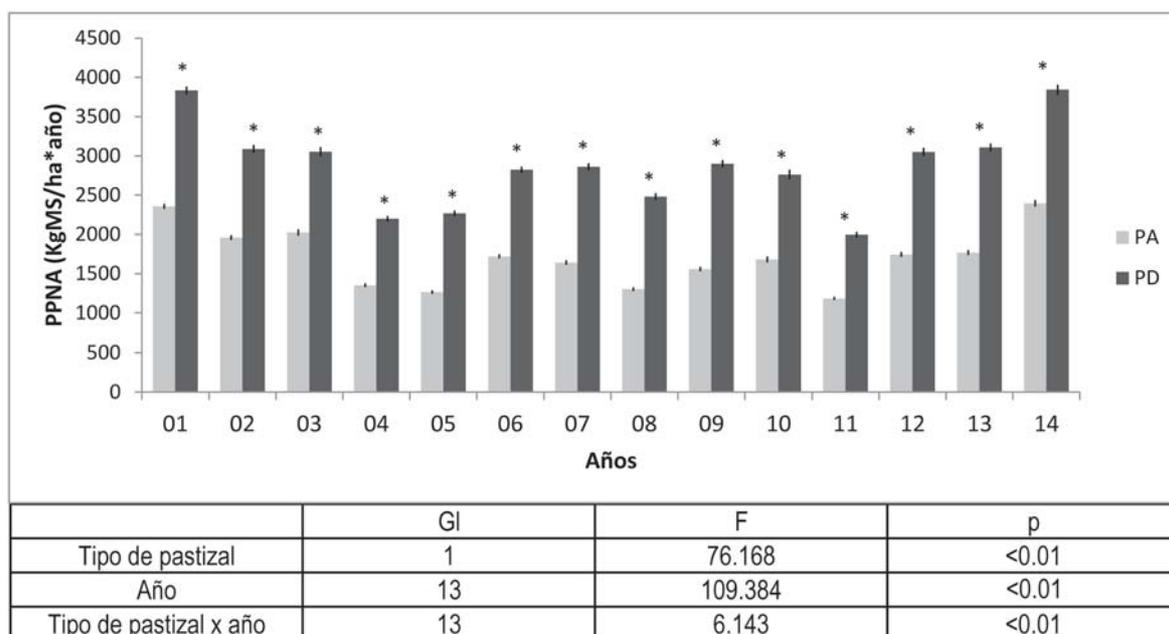


**Figura 3.** Dinámica mensual y anual promedio de la productividad primaria neta aérea para el período 2001-2014 de pastizales densos (PD) y abiertos (PA) presentes en la región Sierras del Este.

pico de producción ocurrió en enero, mientras que la mínima se registró en junio. La mayor variabilidad en ambas unidades ocurre en los meses de primavera y verano (Figura 3).

El análisis de la PPNA para los 14 años en estudio mostró diferencias significativas para las dos unidades de pastizal (Figura 4). En todos los años los pastizales densos

fueron significativamente más productivos, entre un 50 y 90 % superiores, que los abiertos. El año con mayor y menor producción, coincidió en ambas unidades de pastizal, siendo estos el 2014 y el 2011 respectivamente. La variabilidad interanual (calculada a través del Coeficiente de Variación) de la unidad de pastizales densos y abiertos fue de 19 y 22 %, respectivamente. Por su parte, la



**Figura 4.** Dinámica inter anual de la productividad primaria neta aérea para el período 2001-2014 considerando pastizales densos (gris oscuro) y abiertos (gris claro) presentes en Sierras del Este. Se presentan los resultados del análisis de varianza de medidas repetidas: el estadístico F, los grados de libertad y el p valor para los factores intrasujeto (año y año x tipo de pastizal) y para el factor intersujeto (tipo de pastizal). Los asteriscos muestran diferencias significativas detectadas a través de test de t ( $p < 0,05$ ).

variabilidad intra-anual (Coeficiente de Variación intra-anual) promedio para los 14 años en estudio, fue de 67 y 72 % para la unidad de pastizales densos y abiertos, respectivamente.

### Capacidad de carga

La importancia de las unidades de pastizales abiertos y densos varió entre potreros (Cuadro 1). El establecimiento se encuentra prácticamente cubierto por pastizales densos (70 %), con excepción de algunos potreros en donde el pastizal abierto es dominante (potreros 4, 6, 11, 12 y 21) o en donde ambos tipos de pastizales ocupan la misma proporción (potrero 10). Los potreros dominados por pastizales densos se asocian a suelos CONEAT con mayor índice de productividad (ej: la unidad 2.12), mientras que los potreros dominados por el tipo de pastizal abierto se asocian a suelos CONEAT de baja productividad (ejemplo: 2.11a).

La CC promedio para el establecimiento analizado fue de 0,44 UG/ha, mientras que el valor de CC para el año de máxima (2014) y mínima (2011) PPNA fue de 0,60 y 0,31 UG/ha, respectivamente. Así como la proporción de tipos de pastizal varió entre potreros, la CC no fue uniforme para todos los potreros del establecimiento (Cuadro 1). El valor máximo fue de 0,51 y se ubicó en potreros con elevado porcentaje de pastizal denso (potreros 3 y 14). El valor mínimo fue de 0,27 y se ubicó en un potrero con elevado porcentaje de pastizal abierto (potrero 6).

### Discusión

En el presente trabajo se estimó, para una serie temporal larga de años (2001-2014), la PPNA de dos unidades de pastizales naturales en la región geomorfológica Sierras del

**Cuadro 1.** Capacidad de carga para los potreros analizados. %PD: porcentaje de pastizal denso; %PA: porcentaje de pastizal abierto; PPNAR: productividad forrajera anual relativa; PC: producción de pasto cosechado (IC= 50 %); y UG: Unidades Ganaderas considerando la PPNAR y la PC.

Potreros	% PD	% PA	PPNAR (kgMS/ha/año)	PC (kgMS/ha/año)	UG
1	73,51	24,39	2531,2	1266	0,46
2	69,89	26,94	2470,6	1235	0,45
3	94,69	5,31	2813,7	1407	0,51
4	30,8	62,87	1961,2	981	0,35
5	63,21	27,95	2296	1148	0,41
6	11,04	69,51	1506,7	753	0,27
7	77,38	21,67	2595,9	1298	0,47
8	90,2	9,8	2761,4	1381	0,5
9	91,06	8,94	2771,5	1386	0,5
10	54,03	45,97	2340,1	1170	0,42
11	16,45	83,55	1902,4	951	0,34
12	33,63	66,37	2102,5	1051	0,38
13	89,75	10,25	2756,2	1378	0,5
14	96,57	3,43	2835,7	1418	0,51
15	93,49	6,51	2799,8	1400	0,5
16	72,97	27,03	2560,7	1280	0,46
17	86,94	8,44	2644,4	1322	0,48
18	82,11	16,91	2650,5	1325	0,48
19	80,8	19,2	2651,9	1326	0,48
20	85,22	14,78	2703,5	1352	0,49
21	17,29	76,95	1813,7	907	0,33

Este. A su vez, se estimó, a partir de un método simplificado, la Capacidad de Carga de un establecimiento ganadero presente en el área de estudio. Los datos obtenidos constituyen un insumo fundamental para el desarrollo de sistemas ganaderos sostenibles desde el punto de vista ambiental y económico (Berretta et al., 2000; Soca, Do Carmo y Claramunt, 2007). La base de este estudio radica en el conocimiento de las distintas unidades de pastizal y de datos aportados por sensores remotos. En este sentido, este trabajo muestra la utilidad de contar con descripciones espacialmente explícitas de los usos y coberturas del suelo, en especial la cartografía de unidades de pastizales.

La PPNA, estimada a partir de cortes de biomasa, mostró una relación positiva y lineal con la RFAA por la vegetación estimada a partir de las imágenes satelitales. La RFAA explicó el 61 % de la variabilidad de la productividad considerando la totalidad de los datos. Por su parte, la pendiente resultante permitió estimar la EUR para el conjunto de datos ya que no hubo diferencias significativas entre la regresión correspondiente a los pastizales abiertos y densos. Los valores de EUR estimados se encuentran dentro del rango reportado para los pastizales del Río de la Plata (Piñeiro, Oesterheld y Paruelo, 2006; Oyarzabal, Oesterheld y Grigera, 2011). A nivel nacional, este resultado es superior a los encontrados para pastizales ubicados en el Basalto superficial (0,20 grMS/MJ; Baeza et al., 2010) y en Lomadas del Este (0,22 grMS/MJ; Baeza, Paruelo y Ayala, 2011). Las diferencias estarían dadas por diversos factores, entre ellos los métodos de corte de biomasa utilizados para las diferentes estimaciones (Pezzani et al., 2017), la variabilidad florística y ambiental presente en cada región (Lezama et al., 2011) y el tipo de índice de vegetación utilizado para la estimación de la RFAA (Carvacho y Sánchez, 2010; Castillo et al., 2014).

El patrón observado a nivel mensual en la PPNA para las dos unidades de pastizal coincide, en términos generales, con los reportados por otros estudios realizado en la región de Sierras del Este (Berretta, 2003; Ayala y Bermúdez, 2005; Baeza et al., 2010, Baeza, Paruelo y Ayala, 2011). Particularmente para la unidad de suelos de Sierras de Polanco, donde se encuentra el área de estudio, el único antecedente registrado se retrotrae a la década del 80 (1978-1987) (Más, Bermúdez y Ayala, 1997). Los valores de PPNA promedio reportados por ese estudio, para la serie temporal considerada, fueron de 1394 kgMS/ha\*año, con mínimos y máximos de 663 y 2005 kgMS/ha\*año (Más, Bermúdez y Ayala, 1997). Estos datos provienen de un

sitio puntual cercano a nuestro sitio de estudio. No se reporta el tipo de pastizal del cual provienen los datos. Es llamativa la diferencia del promedio de la PPNA con respecto a los obtenidos en este estudio, aproximadamente 20 % inferiores a la PPNA de los pastizales abiertos. La metodología de estimación de la PPNA empleada en el mencionado estudio se basa en cortes de biomasa sobre una misma parcela a lo largo del año y durante todo el período de estudio. Esta aproximación metodológica es tal vez apropiada para pasturas con un régimen de cosecha pero no bajo un régimen de pastoreo.

En lo que refiere al comportamiento estacional de las unidades de pastizal, ambas mostraron su pico de productividad en enero (verano) y los menores crecimientos en junio (invierno). Este resultado pone en evidencia el comportamiento estival de los mismos (Berretta, 2003; Ayala y Bermúdez, 2005), el cual concuerda con la composición de especies registrada para cada unidad. Es decir, ambas unidades de pastizal presentan un claro predominio de especies de crecimiento estival (Lezama et al., 2011). El comportamiento de la PPNA para cada año mostró que la unidad de pastizales densos fue entre 50 y 90 % más productiva que la unidad de pastizales abiertos. Los meses más variables en ambas unidades correspondieron a fines de primavera y al verano. La variabilidad interanual entre comunidades fue levemente superior en los pastizales abiertos. Las diferencias entre estos pastizales, tanto mensuales como anuales, pueden ser explicadas por las características estructurales de la vegetación y del suelo sobre el que se desarrolla. Los pastizales abiertos están asociados mayormente a suelos con poca profundidad, con rocosidad y pedregosidad en superficie y con baja cobertura vegetal (Lezama et al., 2011), lo que los hace más sensibles a los déficit hídricos que se producen en los meses más cálidos.

El valor promedio de CC para el establecimiento analizado se encuentra por debajo, tanto para los reportados a nivel nacional (0,84-1 UG/ha; Soca et al., 2011; Saravia et al., 2011), como para los reportados para la región Sierras del Este (0,65-0,7 UG/ha; Saravia et al., 2011). Las diferencias encontradas podrían estar asociadas, por un lado, a diferencias en el tipo de métodos utilizado para la estimación (Scarnecchia, 1990), y por otro, a la calidad/confiabilidad de las variables consideradas (Vecchio, Golluscio y Cordero, 2008). El método utilizado en este trabajo presenta una serie de limitaciones que radican en una red compleja de factores ambientales vinculados a la disponibilidad de forraje (fertilidad de suelo, composición florística, categoría animal, etc.), factores ambientales extra-forrajeros (disponibilidad

de agua, sombra, etc.), y factores de manejo (presión y método de pastoreo, etc.). Todos estos factores se encuentran interactuando, a su vez, con las decisiones del productor. Otro aspecto a considerar es que la CC estimada en este trabajo se encuentra representada por un valor promedio anual estático, el cual no representa la realidad en los sistemas de producción. La CC varía entre diferentes ambientes (o potreros) o dentro de un mismo ambiente (potrero), varía entre años e inclusive dentro de un mismo año (Allen et al., 2011; Irizarri et al., 2013). Pese a todo lo anteriormente mencionado, este tipo de aproximaciones puede ser útil como primer acercamiento al cálculo de la CC promedio para un sitio determinado (Vecchio, Golluscio y Cordero, 2008; Golluscio, Deregibus y Paruelo, 1998; Golluscio, 2009).

La CC promedio para los 14 años en estudio fue variable dentro del predio (entre 0,31 y 0,60 UG/ha) y estuvo determinada por el porcentaje ocupado por las diferentes unidades de pastizal. Los menores valores de CC se asociaron a potreros con mayor porcentaje de pastizales abiertos. Dada la variabilidad intra e interanual en la PPNA que presentan estos pastizales, asociada principalmente a las características estructurales de la vegetación, del suelo sobre el que se desarrolla y de las condiciones climáticas, se hace necesario un ajuste flexible en la carga. Dicho de otro modo, cuanto mayor es el predominio de pastizales abiertos en los potreros, el manejo requiere de mayor atención por parte del productor. De esta forma se estaría optando por una estrategia conservadora, minimizando el riesgo frente a la incertidumbre (Golluscio, Deregibus y Paruelo, 1998; Irizarri et al., 2013). Cabe destacar que la CC estimada en este trabajo se encuentra circunscripta a determinados tipos de suelos CONEAT, fundamentalmente los suelos 2.11a y 2.12. En este sentido, la aplicación de esta herramienta a predios de la zona requerirá salvaguardar estas diferencias; por ejemplo, las comunidades de pastizales ubicadas en bajos con alta carga de humedad en el suelo.

### Consideraciones finales

Este trabajo permitió cuantificar, a partir de información satelital, la PPNA de dos unidades de pastizales naturales en la región Sierras del Este. Contar con estimaciones detalladas en el espacio y el tiempo de la PPNA, asociadas con el conocimiento de la heterogeneidad de la vegetación, permitirá a técnicos y productores estimar la CC promedio anual de sus potreros. Se debe tomar especial atención en la CC, ya que es una variable en constante cambio, ya sea entre años o dentro de un mismo año, o inclusive entre

potreros. La estimación de las áreas ocupadas por cada tipo de pastizal puede realizarse de forma sencilla y con suficiente precisión a partir de una recorrida de terreno o a través de inspección visual del campo en Google Earth.

### Agradecimientos

Los autores agradecemos a la Cooperativa Agraria Quebrada de los Cuervos por permitirnos la realización de este trabajo en sus predios y especialmente a Julio Iguini por su tiempo y disposición. A Gerardo Parodi por la colaboración en los muestreos a campo. Este trabajo fue financiado por el Programa Pequeñas Donaciones y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (URY/SGP/OP4/Y3/CORE/2010/10) y por el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN3095 que es apoyado por el US National Science Foundation (Grant GEO-1125040).

### Bibliografía

- Allen, V. G., Batello, C., Berretta, E., Hodgson, J., Kothmann, M., Li, X., ... y Sanderson, M. (2011). An international terminology for grazing lands and grazing animals. *Grass and Forage Science*, 66, 2-28.
- Altesor, A., Oesterheld, M., Leoni, E., Lezama, F. y Rodriguez, C. (2005). Effect of grazing on community structure and productivity of a Uruguayan grassland. *Pant Ecology*, 179, 83-91.
- Ayala, W. y Bermúdez, R. (2005). Aportes sobre manejo y utilización de Campo Natural en Lomadas del Este. *Revista INIA*, (4), 10-12.
- Baeza, S., Gallego, F., Lezama, F., Altesor, A. y Paruelo, J. M. (2011). Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. En A. Altesor, W. Ayala y J. M. Paruelo (Eds.). *Bases ecológicas y fisiológicas para el manejo de los pastizales naturales* (pp. 33-45). Montevideo: INIA. (Serie FPTA, 26).
- Baeza, S., Lezama, F., Piñeiro, G., Altesor, A. y Paruelo, J. M. (2010). Spatial variability of above-ground net primary production in Uruguayan grasslands: A remote sensing approach. *Applied Vegetation Science*, 13, 72-85.
- Baeza, S., Paruelo, J. y Ayala, W. (2011). Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. *Agrociencia*, 15, 48-59.
- Bermúdez, R. y Ayala, W. (2005). Producción de forraje de un campo natural de la zona de lomadas del este. En *Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural* (pp. 33-39). Montevideo: INIA. (Serie técnica, 151).
- Bermúdez, R., Ayala, W., Ferrés, S. y Queheille, P. (2003). Opciones forrajeras para la región Este. En *Seminario de actualización técnica: Producción de carne vacuna y ovina de calidad* (pp. 1-10). Montevideo: INIA. (Serie Actividades de Difusión, 317).
- Berretta, E. J. (2003). *Perfiles por país del recurso Pastura/Forraje: Uruguay*. Recuperado de [http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/counprof/PDF%20files/Uruguay\\_Spanish.pdf](http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/counprof/PDF%20files/Uruguay_Spanish.pdf)
- Berretta, E. J., Risso, D., Montossi, F. y Pigurina, G. (2000). Problems of animal production related to pastures in South America: Uruguay. En G. Lemaire, J. Hodgson, A. Moraes, C. Nabinger y P. C. Carvalho (Eds.). *Grassland ecophysiology and grazing ecology* (pp. 377-394). Cambridge: University Press.

- Carvacho, B. y Sánchez, M.** (2010). Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. En J. Ojeda, M. F. Pita y I. Vallejo (Eds.). *Tecnologías de la información geográfica: La información geográfica al servicio de los ciudadanos* (pp. 728-737). Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Castillo, M., García, C., Teich, I. y Balzarini, M.** (2014). Evaluación de sensibilidad de series temporales de NDVI y EVI del producto MOD13Q1. En *XIX Reunión Científica del Grupo Argentino de Biometría, 10 - 12 setiembre, 2014: Santiago del Estero, Argentina*. Recuperado de <http://fcf.unse.edu.ar/ eventos/gab2014/ contenido/pdf/ST01.pdf>
- Chuvieco, E.** (2002). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio. Barcelona: Editorial Ariel.
- Crempien, C.** (1983). *Antecedentes técnicos y metodología básica para utilizar en presupuestación en establecimientos ganaderos: Bovinos para carne y ovinos* (2a ed.). Montevideo: Hemisferio Sur.
- DIEA.** (2013). *Censo general agropecuario 2011: resultados definitivos*. Montevideo: MGAP.
- Garbulsky, M. F., Peñuelas, J., Ourcival, J. M. y Filella, I.** (2008). Estimación de la eficiencia del uso de la radiación en bosques mediterráneos a partir de datos MODIS: Uso del índice de reflectancia fotoquímica (PRI). *Ecosistemas*, 17, 89-97.
- Golluscio, R.** (2009). Receptividad ganadera: Marco teórico y aplicaciones prácticas. *Ecología Austral*, 19, 215-232.
- Golluscio, R. A., Deregibus, V. A. y Paruelo, J. M.** (1998). Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecología Austral*, 8, 265-284.
- Grigera, G., Oesterheld, M., Durante, M. y Pacin, F.** (2007). Evaluación y seguimiento de la productividad forrajera. *Revista Argentina de Producción Animal*, 27, 137-148.
- Grigera, G., Oesterheld, M. y Pacin, F.** (2007). Monitoring forage production with MODIS data for farmers' decision making. *Agricultural Systems*, 94, 637-648.
- Holechek, J.** (1989). An approach for setting the stocking rate. *Rangelands*, 10, 10-14.
- Holechek, J., Pieper, R. y Herbel, C.** (1989). *Range Management: principles and practices*. New Jersey: Prentice Hall.
- INIA.** (2015). *Banco datos agroclimáticos*. Recuperado de <http://www.inia.uy/gras/Climat/Banco-datos-agroclimatico>
- Irizarri, J., Gundel, P., Clavijo, M., Durante, M. y Sosa, P.** (2013). Estimación de la PPNA y capacidad de carga por ambientes mediante información satelital en un establecimiento ganadero en la Pampa Deprimida. *Revista Argentina de Producción Animal*, 33, 11-20.
- Klingman, D., Miles, S. y Mott, G.** (1943). The cage method for determining consumption and yield of pasture herbage. *Journal of the American Society of Agronomy*, 35, 739-746.
- Le Roux, X., Gauthier, H., Begue, A. y Sinoquet, H.** (1997). Radiation absorption and use by humid savanna grassland: assessment using remote sensing and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85, 117-132.
- Lezama, F., Altesor, A., Pereira, M. y Paruelo, J. M.** (2011). Descripción de la heterogeneidad florística de las principales regiones geomorfológicas de Uruguay. En A. Altesor, W. Ayala y J. M. Paruelo (Eds.). *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (pp. 15 - 32). Montevideo: INIA. (Serie FPTA, 26).
- Más, C., Bermúdez, R. y Ayala, W.** (1997). Crecimiento de las pasturas naturales en dos suelos de la Región Este. En M. Carámbula, D. Vaz Martins y E. Indarte (Eds.). *Pasturas y producción animal en áreas de ganadería extensiva* (pp. 59 - 67). Montevideo: INIA. (Serie FPTA, 13).
- Monteith, J. L.** (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747-766.
- NASA.** (2001-2014). [Fotos satelitales]. Recuperado de <http://e4frio1.cr.usgs.gov/MOLT/ MOD13Q1.005/>
- Oesterheld, M., Paruelo, J. M. y Oyarzabal, M.** (2011). Estimación de la productividad primaria neta aérea a partir de diferencias de biomasa y de integración de la radiación absorbida. En A. Altesor, W. Ayala y J. M. Paruelo (Eds.). *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (pp. 113-120). Montevideo: INIA. (Serie FPTA, 26).
- Oyarzabal, M., Oesterheld, M. y Grigera, G.** (2011). ¿Cómo estimar la eficiencia en el uso de la radiación mediante sensores remotos y cosechas de biomasa? Un ejemplo local. En A. Altesor, W. Ayala y J. M. Paruelo (Eds.). *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (pp. 121-135). Montevideo: INIA. (Serie FPTA, 26).
- Panario, D.** (1987). *Geomorfología del Uruguay*. Montevideo: Facultad de Humanidades y Ciencias. Universidad de la República.
- Paruelo, J. M., Garbulsky, M. F., Guerschman, J. P. y Jobbágy, E. G.** (2004). Two decades of normalized difference vegetation index changes in South America: identifying the imprint of global change. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2793-2806.
- Paruelo, J. M., Oyarzabal, M. y Oesterheld, M.** (2011). El seguimiento de los recursos forrajeros mediante sensores remotos: bases y aplicaciones. En A. Altesor, W. Ayala y J. M. Paruelo (Eds.). *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (pp. 135-145). Montevideo: INIA. (Serie FPTA, 26).
- Pereira, M.** (2011). *Manejo y conservación de las pasturas naturales del basalto*. Montevideo: Plan Agropecuario.
- Pezzani, F., Lezama, F., Gallego, F., López-Mársico, L., Leoni, E., Costa, B., ... y Mello, A. L.** (2017). El método de corte de biomasa genera mayores diferencias en la estimación de la productividad de pastizales que el tipo de pastizal. *Revista Argentina de Producción Animal*, 37, 21-32.
- Piñero, G., Oesterheld, M. y Paruelo, J. M.** (2006). Seasonal variation in aboveground production and radiation use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*, 9, 357-373.
- Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Mooney, H. A. y Klooster, S. A.** (1993) Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 811-841.
- Prince, S. D.** (1991). Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1301-1311.
- Roy, D. P., Borak, J. S., Devadiga, S., Wolfe, R. E., Zheng, M. y Desclouetres, J.** (2002). The MODIS Land product quality assessment approach. *Remote Sensing of Environment*, 83, 62-76.
- Sala, O. E. y Austin, A.** (2000). Methods of estimating aboveground net primary production. En O. E. Sala, R. B. Jackson, H. A. Mooney y R. W. Howarth (Eds.). *Methods in ecosystem science* (pp. 31-43). New York: Springer Verlag.
- Sala, O. E., Biondini, M. E. y Lauenroth, W. K.** (1988). Bias in estimates of primary production: An analytical solution. *Ecological Modelling*, 44, 43-55.
- Saravia, A., César, D., Montes, E., Taranto, V. y Pereira, M.** (2011). *Manejo del rodeo de cría sobre campo natural*. Montevideo: Plan Agropecuario.
- Scarnecchia, D.** (1990). Concepts of carrying capacity and substitution ratios: A systems viewpoint. *Journal of Range Management*, 43, 553-555.
- Scurlock, J. M., Johnson, K. y Olson, R. J.** (2002). Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 8, 736-753.
- Soca, P., Do Carmo, M. y Claramunt, M.** (2007). Sistemas de cría vacuna en ganadería pastoril sobre campo nativo sin subsidios: Propuesta tecnológica

para estabilizar la producción de terneros con intervenciones de bajo costo y de fácil implementación. *Revista Ciencia Animal*, 3, 3-22.

- Soca, P., Do Carmo, M., Urchipia, A. y Claramunt, M.** (2011). Variabilidad espacial y temporal de la producción primaria neta aérea como determinante de la producción ganadera: Experiencias locales. En A. Altesor, W. Ayala y J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (pp. 147-162). Montevideo: INIA. (Serie FPTA, 26).
- Tommasino, H.** (2010). 15 años de cambios en el agro uruguayo: Impacto en la ganadería vacuna. En *Anuario OPYPA 2010* (pp. 365 - 381). Montevideo: MGAP.

**Tucker, C. J. y Sellers, P. J.** (1986). Satellite remote-sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1395-1416.

- Vecchio, M. C., Golluscio, R. y Cordero, M.** (2008). Cálculo de la receptividad ganadera a escala de potrero en pastizales de la Pampa Deprimida. *Ecología Austral*, 18, 213-222.
- Verón, S., Oesterheld, M. y Paruelo, J. M.** (2005). Production as a function of resource availability: Slopes and efficiencies are different. *Journal of Vegetation Science*, 16, 351-354.