

Evaluación y seguimiento de la productividad forrajera

Forage production monitoring system

Grigera¹, G., Oesterheld¹, M., Durante¹, M. y Pacín², F.
Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. CONICET
CREA Lamadrid

Resumen

Para manejar de un modo objetivo y racional los sistemas de producción ganaderos es útil contar con un seguimiento de la productividad forrajera (PF) a la escala de unidad de manejo. En este artículo describimos un sistema que de modo rutinario estima la PF a la escala de lote y permite cuantificar las variaciones intra e inter-anales de producción de los principales recursos forrajeros. Está basado en la lógica de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) que propone que la PF está determinada por la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) por las plantas, y la eficiencia con que esa energía es transformada en materia seca aérea (EUR). La RFAA es el producto entre la radiación fotosintéticamente activa incidente y la fracción de ésta que es absorbida por la pastura (fRFA). Estimamos la fRFA a partir del índice de vegetación normalizado (IVN, también llamado índice verde) generado por el sensor MODIS de la NASA. La EUR fue calculada específicamente en cada zona para los recursos para los que dispusimos de datos independientes de cosechas de biomasa. Un software desarrollado ad-hoc, Segf, maneja y almacena la información en una base de datos relacional y tiene implementados los procedimientos de carga de datos y cálculo en rutinas programadas. Actualmente, asesores y productores de unas 850.000 ha en distintas regiones de Argentina reciben este tipo de informes generados por personal del Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección (IFEVA, FAUBA/CONICET) en tiempo casi real y para una historia de siete años. Una encuesta piloto realizada en una de las zonas bajo seguimiento muestra que el sistema está siendo utilizado por asesores y parcialmente por productores. Por lo tanto, lo producido por este sistema se traslada a decisiones de manejo, como herramienta tanto de diagnóstico como de planificación.

Palabras clave: productividad forrajera, sistemas de producción, decisiones de manejo, teledetección, AACREA.

Summary

Objective management of grazing livestock production systems needs monitoring of forage production at the managerial unit level. We describe a system that routinely estimates forage productivity (FP) at the paddock level. Our approach was based on the radiation use efficiency (RUE) logic, which proposes that FP is determined by the amount of

1. IFEVA, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires/CONICET. Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires. ggrigera@agro.uba.ar

2. CREA Lamadrid.

photosynthetically active radiation absorbed by the canopy (APAR), and the efficiency with which that energy is transformed in above-ground dry matter (radiation use efficiency, RUE). APAR is the product of incoming photosynthetically active radiation (PAR) and the fraction absorbed by the canopy (fPAR). We estimated fPAR from MODIS normalized difference vegetation index (NDVI) and RUE from biomass harvests. Computational procedures were automated and run in a Relational Data Base Manager System that stored and managed all the information. The system is currently monitoring 850.000 ha in Argentina. Personnel of the Laboratory of Regional Analysis (IFEVA, FAUBA/CONICET) routinely generate reports that provide monthly FP values for the previous month and a history of the last seven years. The system was well accepted by end users who utilize it mainly for making near real time decisions according to last month FP, and explaining results of previous production cycles by incorporating FP as an explicative variable.

Key words: forage productivity, pasture growth rate, livestock production systems, managerial decision making, remote sensing, AACREA.

Introducción

El manejo de los sistemas de producción ganaderos

La estacionalidad y la variación inter-anual de la productividad forrajera constituyen a menudo la principal restricción, tanto biofísica como económica, de los sistemas de producción ganaderos (Oesterheld et al., 1992; Oesterheld et al., 1998; Vallentine, 2001; Diaz-Solis et al., 2006). La carga animal es la variable de manejo con mayor impacto en los resultados de estos sistemas (Walker, 1995; Diaz-Solis et al., 2003; Diaz-Solis et al., 2006). Una vez definida, la carga animal es una variable mucho más estable que la productividad forrajera y ello suele conducir a periodos de escasez o de exceso de forraje que, si no son oportunamente corregidos con la utilización de suplementos y la confección de reservas, reducen la producción secundaria real y potencial. En este contexto, el balance forrajero, una comparación sistemática de la oferta y la demanda de alimentos, y la cuantificación de las eficiencias son herramientas de diagnóstico clave a las que los productores y asesores pueden recurrir para planificar y evaluar decisiones de manejo de un modo racional y objetivo.

Para poder utilizar este tipo de herramientas de diagnóstico con razonable precisión se necesita, sin embargo, cuantificar la productividad forrajera (también llamada

tasa de crecimiento del forraje en el ámbito de la producción y productividad primaria neta aérea, PPNA, en el ámbito académico; Stuth et al., 1993). Entre las aproximaciones más frecuentemente utilizadas para cuantificar la productividad forrajera se encuentran las cosechas de biomasa repetidas en el tiempo (Sala and Austin, 2000), los métodos de doble muestreo que relacionan una variable de fácil medición, como la altura, las estimaciones visuales o la compresibilidad, con la biomasa (Tucker, 1980), y los modelos de simulación tradicionales (e.g. Lauenroth et al., 1986). El método de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) basado en la lógica de Monteith (1972) es una alternativa muy atractiva porque permite incorporar información provista por satélites (teledetección), lo cual a su vez permite estimar la productividad forrajera de grandes extensiones con alta frecuencia.

Para ello diseñamos un sistema de seguimiento que genera estimaciones mensuales de productividad forrajera a escala de lote y distribuye la información a asesores y productores quienes la utilizan como soporte de sus decisiones de manejo. El sistema está basado en la lógica de la EUR, información satelital, y la organización de productores y asesores en grupos CREA. El objetivo de esta nota es describir los fundamentos del sistema y algunas de sus aplicaciones. El texto

está fuertemente basado en un artículo reciente (Grigera et al., 2007) y la sección de aplicaciones tiene elementos originales que no han sido publicados previamente.

Fundamentos del sistema

Eficiencia en el uso de la radiación y tele-detección

La lógica de la EUR propone que la productividad forrajera (PF) en un periodo (un mes, por ejemplo) está determinada por la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) por las plantas en ese período, y la eficiencia con que esa energía es transformada en materia seca aérea (EUR):

$$PF_{(kg/ha/mes)} = RFAA_{(MJ/ha/mes)} * EUR_{(kg/MJ)}$$

La RFAA es el producto entre la radiación fotosintéticamente activa incidente (medida en estación meteorológica) y la fracción de ésta que es absorbida por la pastura (fRFA), que depende de la cantidad y disposición espacial del área foliar. La fRFA puede ser estimada con razonable precisión a partir de teledetección. La EUR puede ser estimada a partir de estimaciones independientes de la productividad forrajera y la radiación absorbida o ser tomada de estimaciones de la literatura o a partir de modelos con base en variables ambientales (Scott Green et al., 2003; Turner et al. 2003; Rosati et al., 2004; Bradford et al., 2005; Piñeiro et al., 2006; Grigera et al., 2007). La EUR es mucho menos variable que la RFAA para un recurso forrajero determinado (Chapin et al., 2002) y, ante la falta de conocimiento más detallado, puede suponerse constante en el modelo para calcular la

productividad forrajera de ese recurso en ese ambiente (pero ver por ejemplo Nouvellon et al., 2000).

El índice de vegetación normalizado (IVN, también llamado índice verde) es el más común entre los índices que se calculan a partir de observaciones satelitales para el seguimiento de la vegetación. El IVN está directamente relacionado con la fRFA porque se basa en las propiedades espectrales de la vegetación verde de absorber intensamente la radiación visible (especialmente en la longitud de onda del rojo), utilizada para la fotosíntesis, y de reflejar la mayor parte de la radiación en la zona del infrarrojo cercano (Sellers, 1985; Huete et al., 2002). El IVN se calcula según: $IVN = (\rho_{pir} - \rho_r) / (\rho_r + \rho_{pir})$, donde ρ_r y ρ_{pir} son las reflectancias (proporción de la radiación incidente que es reflejada) de la superficie en la longitud del rojo y el infrarrojo cercano, respectivamente.

Hasta hace unos pocos años, la teledetección de la fRFA de forma continua en el tiempo y a nivel de lote estuvo limitada por la baja resolución espacial (píxeles muy grandes) de los sensores satelitales (Paruelo et al., 2000; Reeves et al., 2001; Donnelly et al., 2002; Hill et al., 2004). En este sentido, el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, es un instrumento superador porque combina alta resolución espacial y temporal (tamaño de píxel <6 ha y frecuencia de observación de un mismo sitio prácticamente diaria) con georeferenciación, correcciones atmosféricas y detección de nubosidad notablemente mejoradas respecto de los sensores utilizados anteriormente. Estas características son requisitos básicos para poder realizar un seguimiento de los recursos forrajeros a la escala de unidad de manejo.

Funcionamiento del sistema de seguimiento

El sistema de seguimiento consta de un sistema de información geográfica (SIG) que tiene digitalizados los contornos y las subdivisiones internas de todos los campos que forman parte del proyecto. Además, incorpora información de radiación incidente (RFAI), índices de vegetación (IVN), coefi-

cientes de eficiencia en el uso de la radiación (EUR, calibrados con cosechas de biomasa específicamente para los recursos de cada zona), y uso de la tierra de cada lote. A partir de esta información, una serie de cálculos internos generan estimaciones de productividad o de radiación absorbida mensual (en los casos en que la EUR no ha sido caracterizada) para cada lote (Figura 1).

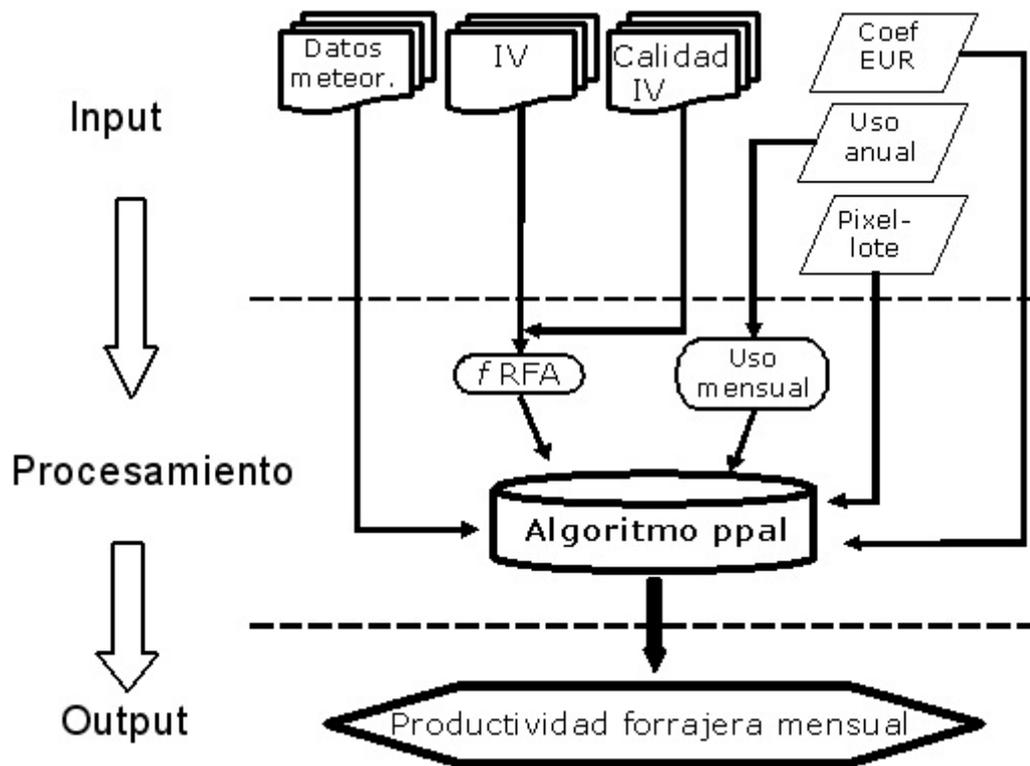


Figura 1: Diagrama de flujo de los principales procesos de cálculo del sistema de seguimiento de la productividad forrajera. El algoritmo principal está basado en la lógica de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). Algunos inputs son actualizados mensualmente (ícono de varias capas) y otros con menor frecuencia (íconos de una sola capa), por ejemplo el uso anual es actualizado anualmente y los coeficientes de EUR son actualizados solo si se genera nueva información al respecto. IV, índice de vegetación; Calidad IV, información de calidad de las imágenes satelitales (presencia de aerosoles y/o nubosidad); f RFA, fracción de la radiación fotosintéticamente activa incidente absorbida por la vegetación. Tomado de Grigera et al. 2007 con modificaciones.

Figure 1: Flow chart showing the principal calculation procedures of the monitoring system. The main algorithm is based on the radiation use efficiency (RUE) logic. Some inputs are updated every month (denoted by a multilayer icon) and others are updated with lower frequency (denoted by a one-layer icon). IV, vegetation index; Calidad IV, quality assessment of vegetation index data. From Grigera et al. 2007.

Para llevar adelante las estimaciones, en el Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección (LART-IFEVA, FAUBA/CONICET) hemos desarrollado un software llamado Segf (Programador, Víctor Suárez) que maneja y almacena la información en una base de datos relacional y tiene implementados los procedimientos de carga de datos y cálculo en rutinas programadas, que son operadas por los técnicos del laboratorio mediante una interfase específica.

Las estimaciones de productividad forrajera son generadas alrededor del día 15 de cada mes, una vez incorporada la información meteorológica y satelital del mes inmediatamente anterior. Los informes son enviados por correo electrónico o descargados de un sitio web específico por los asesores, quienes a su vez los distribuyen a los productores. Cada informe consiste en una planilla Excel con la información cruda y

tablas y gráficos dinámicos que resumen la información de la planilla y permiten hacer consultas específicas.

Aplicaciones

Los asesores y productores utilizan los informes mensuales de acuerdo a sus objetivos y creatividad. Habitualmente se utiliza la información como base para el balance forrajero, y los análisis que de él se derivan se pueden dividir en aquellos cuyo objetivo es tomar decisiones de manejo en tiempo real y en aquellos que tratan de explicar resultados productivos de campañas anteriores. Con el objetivo de conocer el grado de utilización de esta herramienta por parte de los usuarios, se realizó una encuesta a asesores de 8 grupos CREA de la zona Sudoeste (Cuadro 1).

Cuadro 1: Encuesta realizada a los ocho asesores de la zona sudoeste de AACREA. Los asesores contestaron la encuesta por ellos mismos y por los productores a los que asesoran.

Tomado de Grigera et al. 2007 con modificaciones.

Table 1: Inquiry answered by the advisors of the eight groups that compose the AACREA sudoeste region. From Grigera et al. 2007.

Utilización de los informes de productividad forrajera en la zona sudoeste de AACREA*		
Porcentaje de asesores o productores que:	% de asesores Total: 8	% de productores Total: 83
Abrieron por lo menos una vez el informe	100	77
Utilizan frecuentemente (al menos una vez cada tres meses) el informe para realizar/controlar/corregir el balance forrajero del ciclo productivo en curso	100	19
Utilizan anualmente el informe para analizar los resultados del ciclo productivo anterior	88	35
Utilizan ocasionalmente el informe para realizar análisis particulares	0	30
Utilizan el informe con otros objetivos	88	8
No utilizan el informe por:		
1. Su elevada complejidad	0	34
2. Su baja precisión	0	6
3. Dificultades en utilizar información de productividad forrajera para tomar decisiones	0	40

* Los valores dentro de cada columna no son aditivos porque en la encuesta las alternativas fueron no excluyentes.

A continuación se presentan algunos ejemplos de la aplicación de esta tecnología a modo ilustrativo. Primero se describirán las diferencias para dos recursos forrajeros de una misma zona y para un mismo recurso de dos zonas diferentes. Luego se mostrará un ejemplo de seguimiento de la productividad forrajera en tiempo real (es decir, durante el transcurso de la campaña). Finalmente

se mostrará un análisis de campaña basado en el cálculo de eficiencias de producción para algunos campos del grupo CREA Lamadrid. La escala espacial de estos ejemplos se basa en la estructura organizacional de AACREA: para el primer ejemplo se usaron zonas CREA, para el segundo grupos y para el tercero campos particulares (Figura 2).

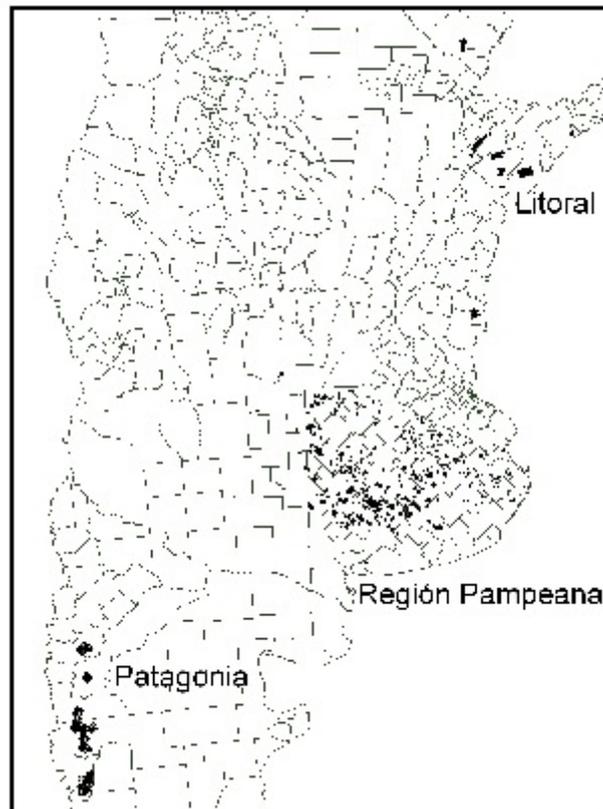


Figura 2: Ubicación geográfica de los campos que participan del seguimiento de la productividad forrajera. La superficie total de los campos para cada zona es la siguiente: litoral norte 64.000 ha; oeste arenoso 63.000 ha; oeste 173.000 ha; sudeste 164.000 ha; sudoeste 250.000 ha; grupo G7 25.000 ha; otros pampeanos 28.000 ha. Los campos de Patagonia no son miembros de AACREA y suman 87.000 ha. La suma total de superficie incluida en el sistema de seguimiento forrajero es de 850.000 ha.

Figure 2: Geographic location of the farms participating in the monitoring system. Total area of the farms within the system in each AACREA region: litoral norte 64.000 ha; oeste arenoso 63.000 ha; oeste 173.000 ha; sudeste 164.000 ha; sudoeste 250.000 ha; grupo G7 25.000 ha; others in the pampas 28.000 ha. Farms from Patagonia (87.000 ha) are not AACREA members. Total area within the monitoring system in Argentina: 850.000 ha.

Ejemplo 1. Se eligieron las zonas oeste y sudoeste de AACREA para caracterizar la dinámica estacional de la productividad forrajera de los principales recursos. La primera de ellas se encuentra al noroeste de la provincia de Buenos Aires y aproximadamente el 40% de la superficie está dedicada a la actividad ganadera (producción de carne y tambo). El total de campos incluidos en el seguimiento forrajero suman 173.000 has. La segunda zona está ubicada al sudoeste de la provincia de Buenos Aires y aproximadamente el 80% de la superficie está dedicada a la producción de carne (cría e invernada). En ésta, el total de campos incluidos en el seguimiento forrajero suman 250.000 has. Los principales recursos forrajeros en ambas zonas son las pasturas consociadas y los verdeos ubicados en suelos agrícolas (zonas más aptas) y en la zona sudoeste se agregan en los bajos las pasturas naturalizadas de agropiro y el pastizal natural.

En la Figura 3 se presenta la dinámica estacional y la variación interanual de la productividad de algunos de estos recursos. Las pasturas sobre suelos agrícolas de la zona sudoeste muestran un patrón más estacional que las de la zona oeste (Figura 3 A y B), con valores máximos de productividad parecidos, pero mínimos más bajos. Los valores máximos de la zona sudoeste son primaverales, mientras que en la zona oeste son estivales, lo cual es esperable de acuerdo a la composición específica de las pasturas de cada zona. Dentro de la zona sudoeste, en los meses de máxima productividad, las pasturas consociadas sobre suelos agrícolas tienen una productividad mucho mayor que las pasturas naturalizadas de agropiro ubicadas en los bajos, mientras que en los meses de mínima los valores de productividad son más similares (Figura 3 A y C). La variación interanual de productividad en todos los casos fue mayor en los meses de primavera y principios de verano. Se nota además que las pasturas de la zona oeste

fueron mucho más estables entre años que las de la zona sudoeste.

Ejemplo 2. Para el seguimiento de la productividad forrajera durante una campaña, se eligieron las pasturas consociadas ubicadas en suelos agrícolas de los grupos CREA 30 de Agosto-Marilauquen y Lamadrid, pertenecientes a las zonas oeste y sudoeste respectivamente. En estos grupos estas pasturas ocupan aproximadamente el 30% de la superficie total. Este ejemplo muestra un análisis que se podría hacer al recibir el informe en abril de 2007.

La Figura 4 permite comparar la productividad de las pasturas en la campaña 2006-2007, con la productividad promedio de la serie (2000-2001 a 2005-2006), y los máximos y mínimos valores registrados para cada mes. En el grupo 30 de Agosto-Marilauquen, los últimos meses fueron los peores de los últimos siete años, con valores promedio inferiores a la mínima registrada en el sistema. En cambio, en el grupo Lamadrid la productividad del período reciente fue bastante parecida a la de un año promedio. Este tipo de ejercicios pueden ser realizados mensualmente para saber en qué situación se encuentra la productividad actual con respecto a la histórica y pueden constituir una útil herramienta para tomar decisiones de manejo durante el transcurso de la campaña.

Ejemplo 3. Una forma de analizar los resultados productivos de la campaña es sobre la base de la eficiencia de transformación del alimento en carne. La Figura 5 muestra que este indicador fue muy variable para campos del grupo CREA Lamadrid en el ciclo de producción 2005-2006. A partir de este diagnóstico pueden priorizarse distintas estrategias a seguir: algunos campos necesitan aumentar su base forrajera, mientras que para otros sería más aconsejable concentrarse en la eficiencia de utilización y/o la calidad del forraje producido.

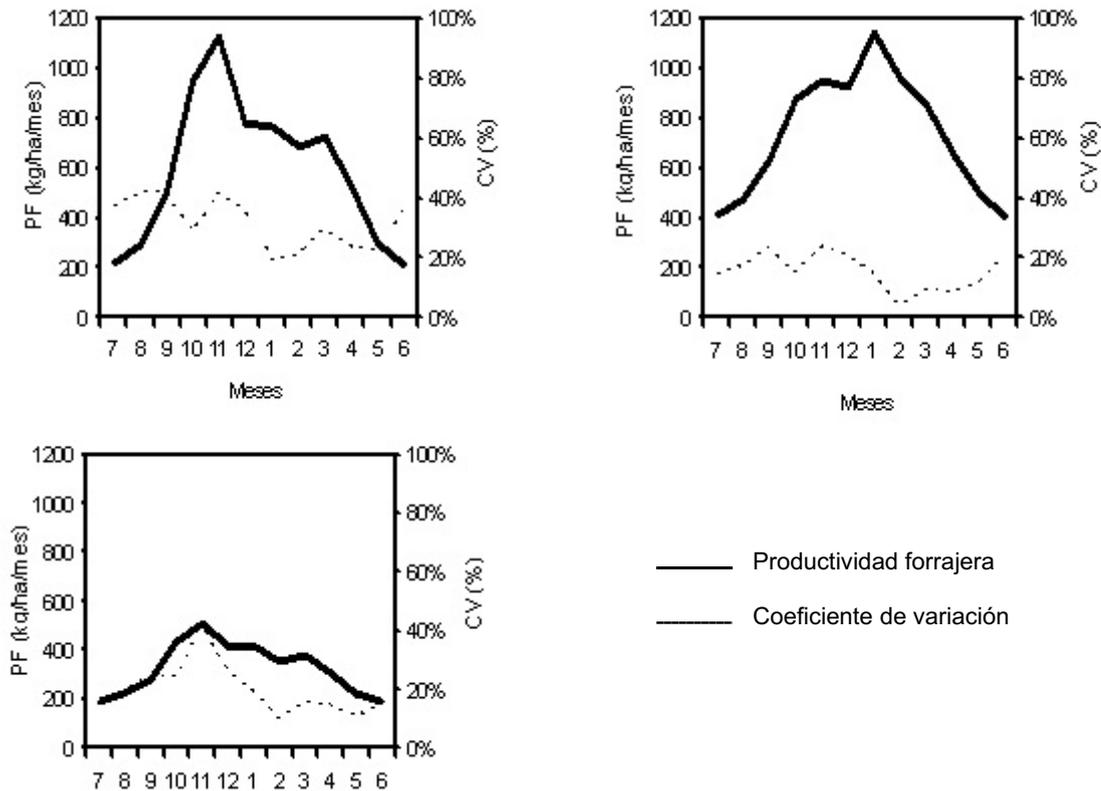


Figura 3: Productividad forrajera mensual (PF, línea llena) y coeficiente de variación (CV, línea punteada) de las pasturas consociadas ubicadas en suelos agrícolas de la zona sudoeste (A) y oeste (B), y de las pasturas naturalizadas de agropiro ubicadas en los bajos de la zona sudoeste (C). Las curvas surgen de promediar todas las campañas del período marzo de 2000 a diciembre de 2006 para 670 (A), 240 (B), y 470 (C) lotes.

Figure 3: Monthly forage productivity (PF, solid line) and coefficient of variation (CV, dashed line) for sown pastures located in paddocks under cropping rotation in the sudoeste (A) and oeste (B) regions, and for lowland naturalized pastures in the sudoeste region (C). Each curve is the average for all production cycles within the period March 2000 to December 2006, and for a number of 670 (A), 240 (B), and 470 (C) paddocks.

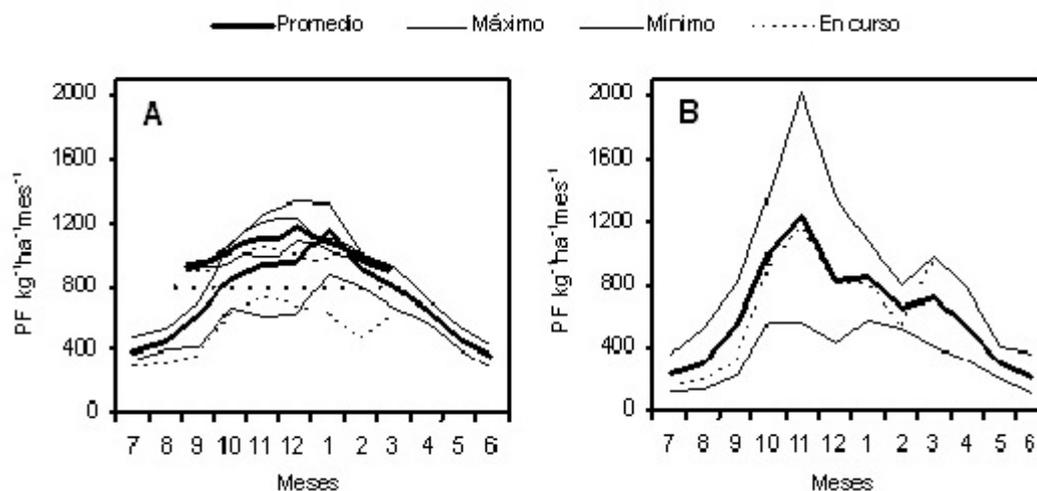


Figura 4: Productividad forrajera mensual promedio (línea gruesa), de los meses de máxima (línea delgada superior) y de los meses de mínima (línea delgada inferior) de la serie de campañas 2000-2001 a 2005-2006, comparada con la productividad de la campaña en curso (2006-2007, línea punteada) para pasturas consociadas ubicadas en suelos agrícolas de los grupos 30 de Agosto-Marilauquen (A) y Lamadrid (B). Las curvas son promedios de 110 (A) y 160 (B) lotes.

Figure 4: Forage productivity for the average (solid line), maximum (thin upper line) and minimum (thin downer A) monthly productivity within the time series 2000-2001 to 2005-2006, as compared to the current production cycle productivity (2006-2007, dashed line). Data for sown pastures located in paddocks under cropping rotation for AACREA groups 30 de Agosto-Marilauquen (A, average of 110 paddocks) and Lamadrid (B, average of 160 paddocks).

Conclusiones y perspectivas

Se cuenta con un sistema que, a partir de datos satelitales, información climática y estimaciones empíricas de la eficiencia en el uso de la radiación, estima la productividad de forraje, a nivel mensual y de lote, casi en tiempo real y para siete años atrás. El sistema permite cuantificar las variaciones intra e inter-anales de producción de los principales recursos forrajeros. Una encuesta piloto muestra que el sistema está siendo utilizado por asesores y parcialmente por productores. Por lo tanto, lo producido por este sistema se traslada a decisiones de manejo, como herramienta tanto de diagnóstico como de planificación.

El sistema plantea una serie de desafíos de investigación aún sin resolver. Entre otros, se pueden destacar los siguientes:

1. Relación entre índices de vegetación (imágenes satelitales) y la fracción de la radiación incidente absorbida. ¿Es posible mejorar el ajuste de estas relaciones utilizando otros índices, también derivados de las imágenes, y calibrando los parámetros de las relaciones para distintos recursos y/o suelos?

2. Continuidad de las misiones satelitales. El sensor satelital MODIS, utilizado en este sistema, dejará de operar aproximadamente en 2011 y no está aún confirmada la fecha en la que se dispondrá de imágenes de su sucesor, VIIRS. Además este nuevo sensor tendrá ciertas características distintas por lo que el sistema de seguimiento se deberá adaptar a una nueva fuente de información.

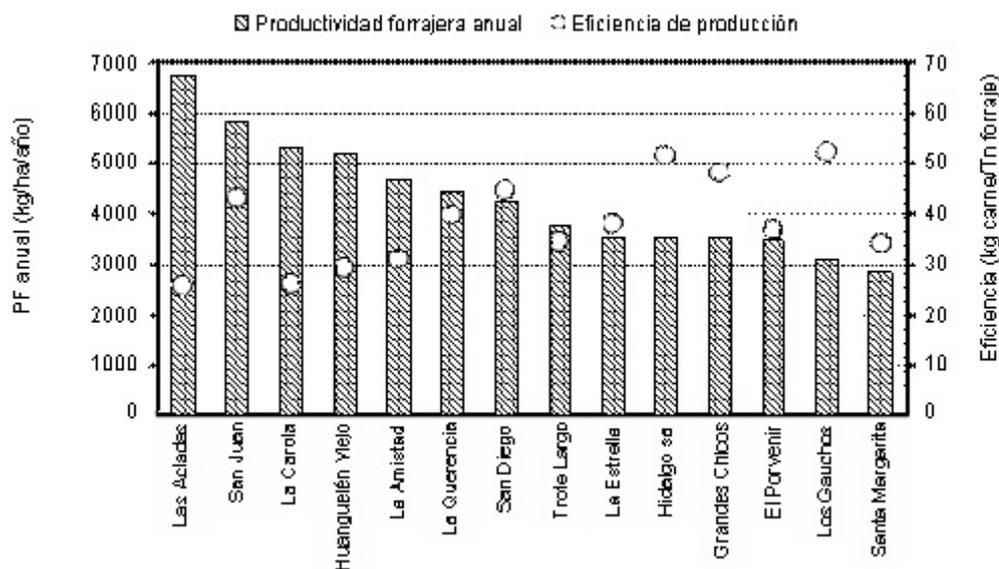


Figura 5: Productividad forrajera anual (promedio del establecimiento) y eficiencia de producción (definida como kg de carne producidos por tonelada de forraje producida, descontando la carne producida a expensas de suplementación) para los campos del grupo CREA Lamadrid en el ciclo de producción 2005-2006.

Figure 5: Annual forage productivity (grey bars) and production efficiency (white dots, defined as kg of beef produced per ton of forage produced, discounting the amount of beef produced from supplementation) for Lamadrid AACREA group farms in the production cycle 2005-2006.

3. Variaciones de la eficiencia en el uso de la radiación en función de variables ambientales. Poder predecir el efecto del estrés hídrico o nutricional, por ejemplo, sobre la EUR nos permitiría avanzar hacia un modelo más mecanístico y posiblemente más preciso.

4. Discriminación del componente forrajero y no forrajero del recurso. En ciertos sistemas productivos una cantidad variable de la productividad no es consumible por el ganado y entonces sería crítico para el sistema poder diferenciarla.

5. Sistemas productivos con presencia de leñosas. Este es un caso extremo dentro de la problemática anterior, ya que no solo una

parte de la productividad no es forrajera sino que además ese estrato leñoso interfiere en la estimación de la productividad de las herbáceas cuando se utiliza teledetección. Este importante desafío debe ser resuelto para utilizar el sistema de seguimiento en regiones con monte.

6. Facilitación de la utilización de la herramienta. En este punto es importante avanzar tanto en la generación de nuevas aplicaciones con base en la información generada (problema agronómico) como en el diseño de una interfase cada vez más amigable entre la información y los usuarios finales (problema informático).

Agradecimientos

Federico del Pino y numerosos técnicos del LART (Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección) cuyos nombres se pueden ver en www.agro.uba.ar/lart ayudaron en aspectos de coordinación y logística fundamentales para el sistema de seguimiento. Víctor Suárez realizó la implementación informática del sistema, Juan Pablo Guerschman aportó conocimiento sobre el uso de las imágenes MODIS, y Gervasio Piñeiro sobre las relaciones entre IV-fRFA. José Paruelo ha actuado valiosamente desde los comienzos de este proyecto. Él y Rodolfo Golluscio son responsables por el trabajo en Patagonia. Los datos de cosechas de biomasa utilizadas para caracterizar la EUR fueron obtenidos por Martín Arzadun, Estación Experimental Coronel Suárez, Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires (bajo requerimiento del grupo CREA Lamadrid) y por la zona Oeste de AACREA. Agradecemos a los miembros, asesores y coordinadores de AACREA por participar activamente en el proyecto. Particularmente a Juan A. Lafontaine por su permanente entusiasmo y apoyo. Esta investigación fue financiada por la Universidad de Buenos Aires y el FONCyT. Durante el proyecto, Gonzalo Grigera fue estudiante de doctorado financiado por la Universidad de Buenos Aires.

Bibliografía

- Bradford, J.B., Hicke, J.A. and Lauenroth, W.K. 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, 246-255.
- Chapin III, F.S., Matson, P.A. and Mooney, H.A. 2002. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer-Verlag, New York.
- Diaz-Solis, H., Kothmann, M.M., Grant, W.E. and De Luna-Villarreal, R. 2006. Application of a Simple Ecological Sustainability Simulator (SESS) as a Management Tool in the Semi-Arid Rangelands of Northeastern Mexico. *Agricultural Systems*, 88, 514-527.
- Diaz-Solis, H., Kothmann, M.M., Hamilton, W.T. and Grant, W.E. 2003. A Simple Ecological Sustainability Simulator (SESS) for Stocking Rate Management on Semi-Arid Grazinglands. *Agricultural Systems*, 76, 655-680.
- Donnelly, J.R., Freer, M., Salmon, L., Moore, A.D., Simpson, R.J., Dove, H. and Bolger, T.P. 2002. Evolution of the Grazplan Decision Support Tools and Adoption by the Grazing Industry in Temperate Australia. *Agricultural systems*, 74, 115-119.
- Grigera, G., Oesterheld, M. and Pacín, F. 2007. Monitoring forage production for farmers' decision making. *Agricultural Systems*, 94, 637-648.
- Hill, M.J., Donald, G.E., Hyder, M.W. and Smith, R.C.G. 2004. Estimation of Pasture Growth Rate in the South West of Western Australia from AVHRR NDVI and Climate Data. *Remote Sensing of Environment*, 93, 528-545.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. and Ferreira, L.G. 2002. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the Modis Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213.
- Lauenroth, W.K., Hunt, H.W., Swift, D.M. and Singh, J.S. 1986. Estimating aboveground net primary production in grasslands: a simulation approach. *Ecological Modelling*, 33, 297-314.
- Monteith, J. 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747-766.
- Nouvellon, Y., Seen, D.L., Rambal, S., Begue, A., Moran, M.S., Kerr, Y. and 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, 43-55.
- Oesterheld, M., Di Bella, C. and Herdiles, K. 1998. Relation between NOAA-AVHRR Satellite Data and Stocking Rate of Rangelands. *Ecological applications*, 8, 207-212.
- Oesterheld, M., Sala, O.E. and McNaughton, S.J. 1992. Effect of Animal Husbandry on Herbivore-Carrying Capacity at a Regional Scale. *Nature*, 356, 234-236.

- Paruelo, J.M., Oesterheld, M., Di Bella, C., Arzadum, M., Lafontaine, J., Cahuepé, M. and Rebella, C. 2000. Estimation of Primary Production of Subhumid Rangelands from Remote Sensing Data. *Applied Vegetation Science*, 3, 189-195.
- Piñeiro, G., Oesterheld, M. and Paruelo, J.M. 2006. Seasonal variation in aboveground production and radiation-use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*, 9, 357-373.
- Reeves, M.C., Winslow, J.C. and Running, S.W. 2001. Mapping Weekly Rangeland Vegetation Productivity Using Modis Algorithms. *Journal of Range Management*, 54, 90-105.
- Rosati, A., Metcalf, S.G. and Lampinen, B.D. 2004. A simple method to estimate photosynthetic radiation use efficiency of canopies. *Annals of Botany*, 93, 567-574.
- Sala, O.E. and Austin, A.T. 2000. Methods of Estimating Aboveground Net Primary Productivity. Pages 31-43 in O. E. Sala, R. B. Jackson, H. A. Mooney, and R. W. Howarth, editors. *Methods in Ecosystem Science*. Springer, New York
- Scott Green, D., Erickson, J.E. and Kruger, E.L. 2003. Foliar morphology and canopy nitrogen as predictors of light-use efficiency in terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 115, 163-171.
- Sellers, P.J. 1985. Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1335-1372.
- Stuth, J.W., Hamilton, W.T., Conner, J.C., Sheehy, D.P. and Baker, M.J. 1993. Decision Support Systems in the Transfer of Grassland Technology, p. 234-242, In: M.G. Baker, ed. *Grassland for Our World*. Sir Publishing, Wellington.
- Tucker, C.J. 1980. A critical review of remote sensing and other methods for non-destructive estimation of standing crop biomass. *Grass and Forage Science*, 35, 177-182.
- Turner, D.P., Urbanski, S., Bremer, D., Wofsy, S.C., Meyers, T., Gower, S.T. and Gregory, M. 2003. A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. *Global Change Biology*, 9(3), 383-395.
- Vallentine, J.F. 2001. *Grazing Management*. 2 ed. Academic Press, San Diego.
- Walker, J. 1995. Viewpoint: Grazing Management and Research Now and in the Next Millennium. *Journal of Range Management*, 48, 350-357.