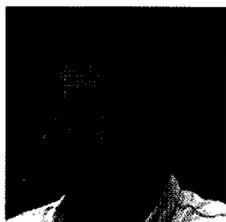


## ANÁLISIS REGIONAL Y TELEDETECCIÓN DE PROBLEMAS

# Satélites verdes



por José Parúelo

Ing. Agrónomo (Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires), 1983. M.Sc. Área Recursos Naturales (Facultad de Agronomía, UBA), 1991. Doctor of Philosophy, Dept. Rangeland Ecosystem Sciences (Colorado State University, USA), 1995. Profesor Adjunto de Ecología (UBA). Investigador Adjunto Sin Director (Conicet). Ha recibido el Premio al mejor desarrollo tecnológico, 1992 (Sociedad Rural Argentina y Consejo Profesional de Ingeniería Agronómica) y el Premio KONEX a la investigación ecológica, 1993 (Fundación KONEX, Argentina). Publicó 51 artículos en revistas científicas o en capítulos de libros con referato.

Muchos de los problemas de manejo de sistemas naturales o agropecuarios involucran escalas de tiempo y espacio que exceden las de las parcelas experimentales, el lote y la estación de crecimiento. El efecto de las inundaciones o las consecuencias de la desertificación llegan a ser percibidos cuando se analizan superficies de cientos o miles de km<sup>2</sup> y más de una estación de crecimiento. El análisis regional y la teledetección proveen los marcos conceptuales y las herramientas para analizar una amplia gama de problemas agronómicos y ambientales. En este artículo presentamos una breve descripción de los métodos asociados a la resolución de problemas en escala regional mediante el uso de datos aportados por satélites. Una serie de ejemplos basados en las actividades del LART ilustran el potencial de estas técnicas.

► ¿Cómo varía la productividad de forraje y la carga animal a lo largo del gradiente de precipitación que

va de Bariloche a Viedma? ¿Cuál es el efecto de la agricultura sobre la cantidad de carbono que fijan los ecosistemas pampeanos? ¿Cuánto cambia la cantidad de agua evapotranspirada cuando se reemplaza un pastizal natural por un cultivo forestal en Patagonia en Uruguay?

Una característica común de estas preguntas es la dificultad para contestarlas usando aproximaciones experimentales basadas exclusivamente en observaciones o experimentos a campo. Medir a campo la productividad de forraje en un área extensa no sólo consume mucho tiempo y esfuerzo sino que plantea problemas metodológicos serios, ya que no puede usarse la misma aproximación experimental en un matorral que en una estepa gramínea. Las mediciones puntuales de evapotranspiración son difíciles de extrapolar a toda una región. Los cambios de escala (de una hoja al canopeo o de un cultivo a la región) no son automáticos debido a problemas de agregación y extrapolación de muy difícil solución. La propagación de errores al pasar de la escala detallada a la regional puede incorporar una incertidumbre muy alta en las estimaciones a escala de poco detalle.

El análisis regional incluye un conjunto de técnicas, aproximaciones metodológicas y modelos conceptuales que permiten el análisis de patrones espaciales y temporales de atributos ecológicos y su relación con variables ambientales y antrópicas a escala de cientos a miles de km<sup>2</sup>. Este tipo de análisis parte del uso de bases de datos de características estructurales y funcionales de los ecosistemas. Estas bases de datos pueden o no estar georreferenciadas, es decir, vinculadas a un sistema de coordenadas geográfico. A partir de ellas es posible describir los patrones regionales de los distintos atributos del ecosistema. Para su construcción es necesario desarrollar protocolos de intrapolación y agregación de observaciones de campo (por ejemplo presencia o ausencia de determinadas especies o fisonomía de la vegetación). Las bases de datos pueden incluir información puntual (la descripción de los atributos de un determinado sitio)

o representar las características de una dada porción de terreno. Las técnicas geoestadísticas permiten intrapolar observaciones puntuales.

La teledetección o percepción remota es una fuente de información clave para generar bases de datos de atributos del ecosistema. Incluimos dentro de este conjunto de técnicas aquellas que hacen uso de sensores que perciben características de un objeto o superficie sin entrar en contacto con él. En general los sensores considerados registran energía electromagnética emitida o reflejada por un objeto o superficie. Los sensores pueden ser montados en distintos tipos de plataformas, desde un bastidor a campo a un satélite. Nos ocuparemos en particular de este último tipo de plataforma. Las imágenes satelitales proveen datos cualitativos y espacialmente continuos de la superficie. Los sensores a bordo de las plataformas satelitales registran la energía reflejada o emitida por la superficie terrestre en distintas bandas del espectro electromagnético. En tal sentido son mucho más que una fotografía. A partir de los datos espectrales medidos por los satélites pueden construirse índices que miden el albedo total (proporción de la radiación incidente que es reflejada), la productividad vegetal, la temperatura de la superficie o la evapotranspiración (**Caja 2**). La interpretación de estos índices depende de modelos biofísicos que relacionan las propiedades de las distintas superficies con sus características espectrales.

La combinación de las bases de datos estructurales y funcionales con información ambiental permite el desarrollo de modelos de la relación vegetación-ambiente. Estos modelos constituyen hipótesis acerca de la relación entre variables abióticas y procesos biológicos que deben ser evaluadas usando un conjunto independiente de observaciones. Además de sintetizar el conocimiento, los modelos de la relación vegetación ambiente posibilitan la reconstrucción de la vegetación potencial de un área modificada por la acción humana. La diferencia entre los patrones observados y los que surgen de la construcción de mapas de la vegetación potencial brinda una estimación del impacto antrópico sobre distintos atributos del ecosistema. Los análisis regionales incorporan el conocimiento generado en experimentos de campo o laboratorio a través del proceso de síntesis o la construcción de modelos. Los modelos de simulación, al incluir reglas acerca del funcionamiento del sistema, permiten evaluar su comportamiento a escalas de tiempo y espacio imposibles de cubrir con experimentos de campo. El proceso descrito permite mejorar nuestro conocimiento acerca de los siste-

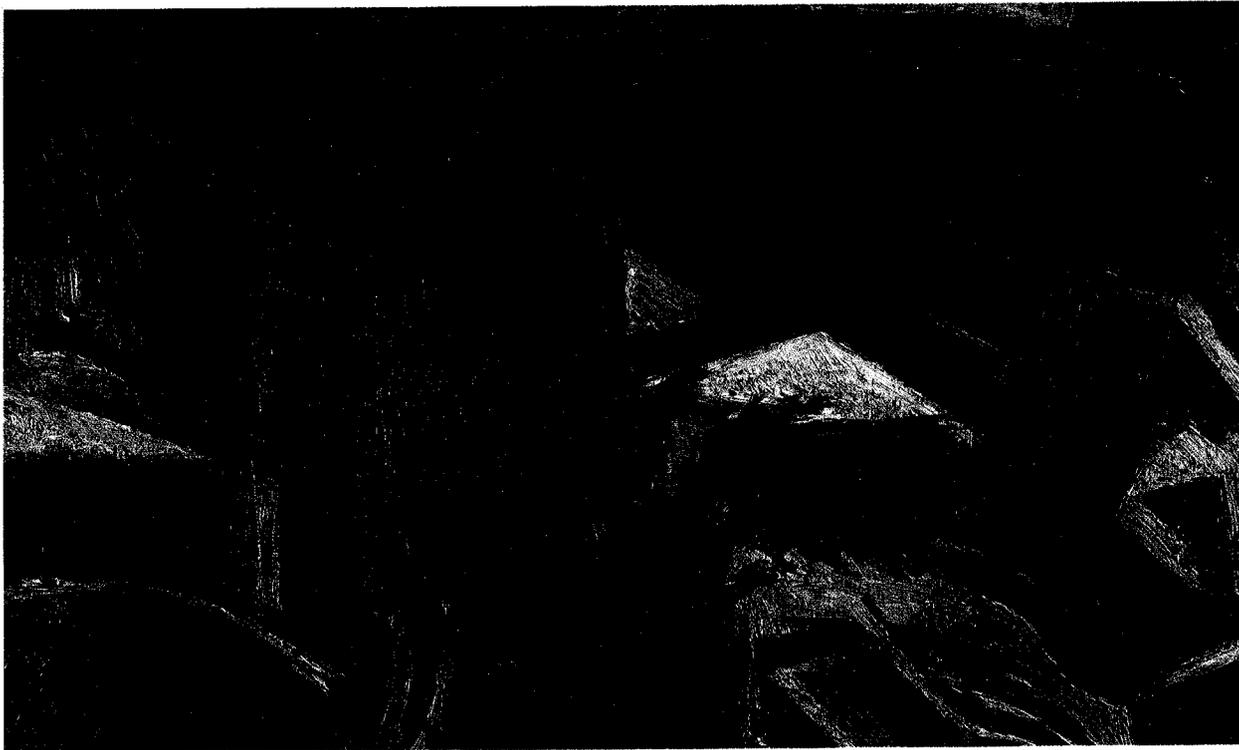
mas ecológicos a escala regional generandó nuevos y mejores modelos conceptuales de la relación entre los ecosistemas, los factores ambientales y el régimen de disturbios.

## **Las aplicaciones del análisis regional**

### **1. Descripción de la cobertura del suelo en la región pampeana**

La información acerca de la distribución espacial de los distintos tipos de cobertura del suelo es esencial para la planificación regional en el sector agrícola. Conocer la superficie sembrada, el tamaño de los lotes o la ubicación de las áreas con mayor densidad de un dado cultivo permite a numerosos actores (secretarías o ministerios nacionales o provinciales, organizaciones de productores, exportadores, proveedores de insumos) tomar decisiones más sólidas. La disponibilidad de este tipo de información aumenta la eficiencia del sector y la transparencia del proceso de comercialización de insumos y productos. Las estimaciones actuales se basan en estadísticas elaboradas por la Secretaría sobre la base de informantes calificados. Una dificultad básica de esta aproximación es su incertidumbre, no es posible evaluar cuán acertada es la estimación. Por otra parte no es posible conocer la distribución de cultivos dentro de un departamento o partido. Si bien se han hecho intentos por incorporar información satelital, este esfuerzo no dio los frutos esperados. Probablemente, la ausencia de un marco conceptual adecuado y de un modelo biofísico explícito conspiró contra el éxito de estos esfuerzos.

Investigadores del Laboratorio de Análisis Regional de la FAUBA junto a técnicos del Instituto de Clima y Agua (INTA Castelar) y de AACREA desarrollaron una metodología para la caracterización de la cobertura del suelo basada en el seguimiento de la productividad de la vegetación a lo largo del año (Guerschman et al., 2000). Esta aproximación se basa en un modelo biofísico explícito acerca de la relación entre un índice derivado de la radiación reflejada por el canopy en ciertas porciones del espectro electromagnético (el Índice Verde Normalizado) y la productividad de la vegetación (**Caja 2**) (Paruelo et al., 1997; Paruelo et al., 2000). El método hace uso de imágenes Landsat TM. Estas imágenes, provistas en la Argentina por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), tienen una resolución espacial de 30 m.



Haciendo uso de una extensa base de datos de uso de la tierra se caracterizaron las diferencias en la dinámica de la producción de los distintos cultivos (Figura 1). Así, el cultivo de invierno (trigo, avena y cebada) tiene valores muy altos de este índice en octubre (cuando alcanza su mayor biomasa) y muy bajos en verano (cuando esta seco o ya fue cosechado). Los cultivos de verano (maíz, soja o girasol) muestran un comportamiento contrastante. La Figura 1 muestra la distribución de cultivos en un partido de la provincia de Buenos Aires. La evaluación de la clasificación a partir de la comparación de lo predicho por el método y lo observado en un lote particular dio resultados muy satisfactorios. Las ventajas del método se basan en su clara conexión con los procesos biológicos que determinan las diferencias entre clases de cobertura y en la repetibilidad entre años y regiones. Estas características lo hacen muy apropiado para el desarrollo de sistemas altamente automatizados de evaluación del uso de la tierra por parte de organismos oficiales.

## **2. Caracterización de la evapotranspiración de la región pampeana**

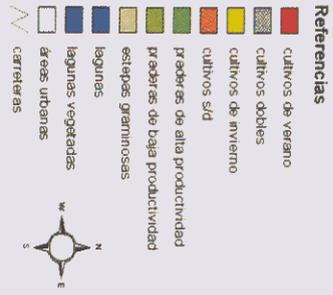
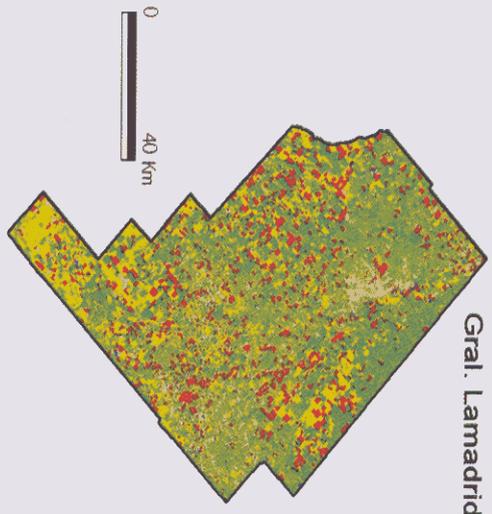
La productividad de cultivos, pasturas y pastizales naturales en la región pampeana está frecuentemente limitada por agua. Caracterizar el estado hídrico de un área es entonces muy importante para detectar déficit o evaluar el potencial de produc-

ción de un área. Las estimaciones a campo del estado hídrico de la vegetación tienen muchas dificultades, ya que una gran cantidad de factores (edáficos, meteorológicos o de manejo) contribuye a su definición. En conjunto con el Instituto de Clima y Agua (INTA Castelar), la FAUBA desarrolló una metodología para estimar la evapotranspiración (la suma del agua evaporada por el suelo y transpirada por la vegetación) en la región Pampeana (Di Bella et al., 2000). La aproximación usada se basa en la estimación a partir de datos espectrales provistos por los satélites de la serie NOAA/AVHRR de algunos los términos de la ecuación de balance de energía de una superficie. El método permite generar mapas de evapotranspiración cada 10 días y con una resolución de 100 ha. La FAUBA y el INTA han puesto los resultados de este proyecto en Internet a disposición de técnicos y productores ([www.evapotranspiracion.org](http://www.evapotranspiracion.org)).

## **3. La producción de forraje en las zonas templadas de Argentina**

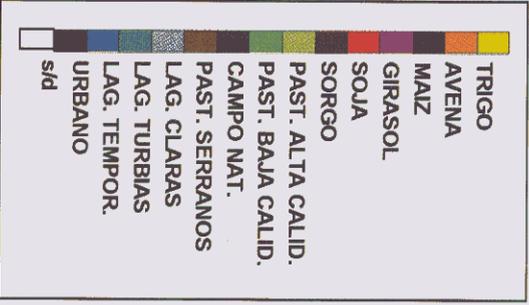
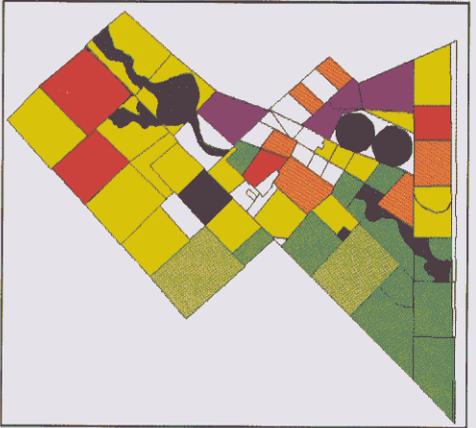
El Índice Verde Normalizado permite el cálculo de un atributo muy importante del funcionamiento de los ecosistemas, la productividad primaria neta aérea, o sea la tasa con la cual se acumula biomasa vegetal (Caja 2). La productividad primaria neta aérea es el principal determinante de la carga animal. La figura 2 muestra un escenario de productividad

Gral. Lamadrid



Clase	Has.	% de superficie
Cultivos Invernales	91867	19
Cultivos estivales	62429	13
Estepas gramíneas	48849	10
Praderas de alta productividad	85241	18
Praderas de baja productividad	184934	39
Lagunas	152	0
Laguna vegetada	3335	1

Uso de la tierra "real"  
observado a campo



Uso de la tierra predicho  
mediante la clasificación



Figura 1. Mapa de clases de cobertura del suelo para la campaña 1996-1997 para el partido de Gral. Lamadrid en la provincia de Buenos Aires. Los esquemas inferiores muestran la distribución de clases de cobertura declarada por el productor y la derivada de la metodología basada en la información satelital para un establecimiento rural.

primaria promedio para áreas ganaderas de Argentina (Paruelo et al., 1999). Los gráficos que acompañan el mapa presentan los cambios estacionales promedio en distintas áreas del país. Esta información es de gran importancia para la planificación forrajera ya que permite identificar momentos de déficit y excesos de forraje durante el año. Los patrones de productividad primaria fueron generados a partir de una base de datos satelitarios generada por la NASA en los EE.UU. que cubre 20 años. Esto permite analizar la variabilidad entre años de la productividad forrajera. De este análisis surgen algunas regularidades. Por ejemplo, la variabilidad relativa de la productividad disminuye a medida que aumenta la precipitación (Oosterheld et al., 1998). Esto indica que los ambientes más áridos no sólo producen menos sino que presentan las mayores diferencias entre años extremos.

#### **4. Patrones de funcionamiento de los ecosistemas en las zonas templadas**

Tradicionalmente los mapas de vegetación fueron construidos a partir de observaciones de las especies presentes o de fisonomía de sitios particulares. Cómo generar un mapa a partir de esas observaciones puntuales fue siempre uno de los grandes problemas que enfrentaron los biogeógrafos. Los satélites, al cubrir de manera continua una superficie extensa, aparecieron como una solución para el problema de extrapolar datos. Sin embargo, generar mapas de características estructurales (composición florística, unidades de vegetación, cobertura, etc.) a partir de imágenes presenta el problema de la calibración de los datos espectrales. La dificultad básica es que los datos registrados por el satélite no guardan a priori una relación con las especies presentes. Esa relación debe identificarse y cuantificarse. De hecho sólo existe en la medida en que la presencia de un dado carácter estructural modifique la cantidad de radiación reflejada o emitida por la superficie en las longitudes de onda que registra el satélite. El grupo de análisis regional y teledetección de la FAUBA desarrolló un método según el cual la descripción de la vegetación se basa en índices derivados algebraicamente de los valores de reflectancia medidos directamente por el satélite (Paruelo et al., 2001). Numerosas evidencias tanto empíricas como teóricas muestran que uno de estos índices (el IVN) muestra una relación lineal y positiva con la cantidad de radiación absorbida por la vegetación. La radiación absorbida es a su vez el principal control de la productividad primaria. Usando información satelital de alta resolución temporal (36

imágenes por año) es posible registrar para cada porción de 64 km<sup>2</sup> de las áreas templadas de Sudamérica los cambios estacionales de la productividad. Los cambios a lo largo del año pueden ser descriptos por tres atributos de la marcha anual del IVN: la integral anual (el área bajo la curva), la diferencia entre los valores máximos y mínimos divididos por la integral y la fecha del valor máximo (figura 3). El primer atributo captura las diferencias en productividad total y los otros dos distintos aspectos de la estacionalidad. El uso combinado de estos tres atributos permite derivar clasificaciones funcionales de la cobertura del suelo. Estas clasificaciones permiten describir la vegetación actual de una región a partir de variables espectrales con un claro significado biológico (la dinámica de la productividad primaria). Este tipo de descripciones puede ser repetido en el tiempo permitiendo una caracterización dinámica del uso del suelo.

#### **5. Estimación del comienzo de la estación de crecimiento en la Patagonia**

La producción de corderos en Patagonia es altamente dependiente de la disponibilidad de forraje para las ovejas durante la última parte de la gestación y en los momentos previos a la parición. Estos períodos coinciden con el fin del invierno y comienzo de la primavera. En estos momentos la disponibilidad de forraje puede variar marcadamente entre años, haciendo incierto el resultado productivo. Mediante el análisis de imágenes AVHRR/NOAA, Jobbagy et al. (2002) encontraron que el momento de comienzo de la estación de crecimiento muestra una alta correlación con la temperatura media de julio. Esta relación se verifica tanto entre sitios como entre años. Así, en un año particularmente frío en invierno el comienzo de la estación de crecimiento puede atrasarse más de un mes (hasta fin de setiembre) respecto de años cálidos. Tales retrasos en el aumento de la disponibilidad y calidad de forraje tienen un impacto muy grande sobre la producción. El desarrollo de sistemas de pronóstico basados en esta relación permitiría conocer en julio-agosto que los animales no van a disponer de suficiente forraje en el momento más crítico. Esto permite planificar con anticipación las necesidades de suplementación y estabilizar la producción ovina. ◀

Figura 3

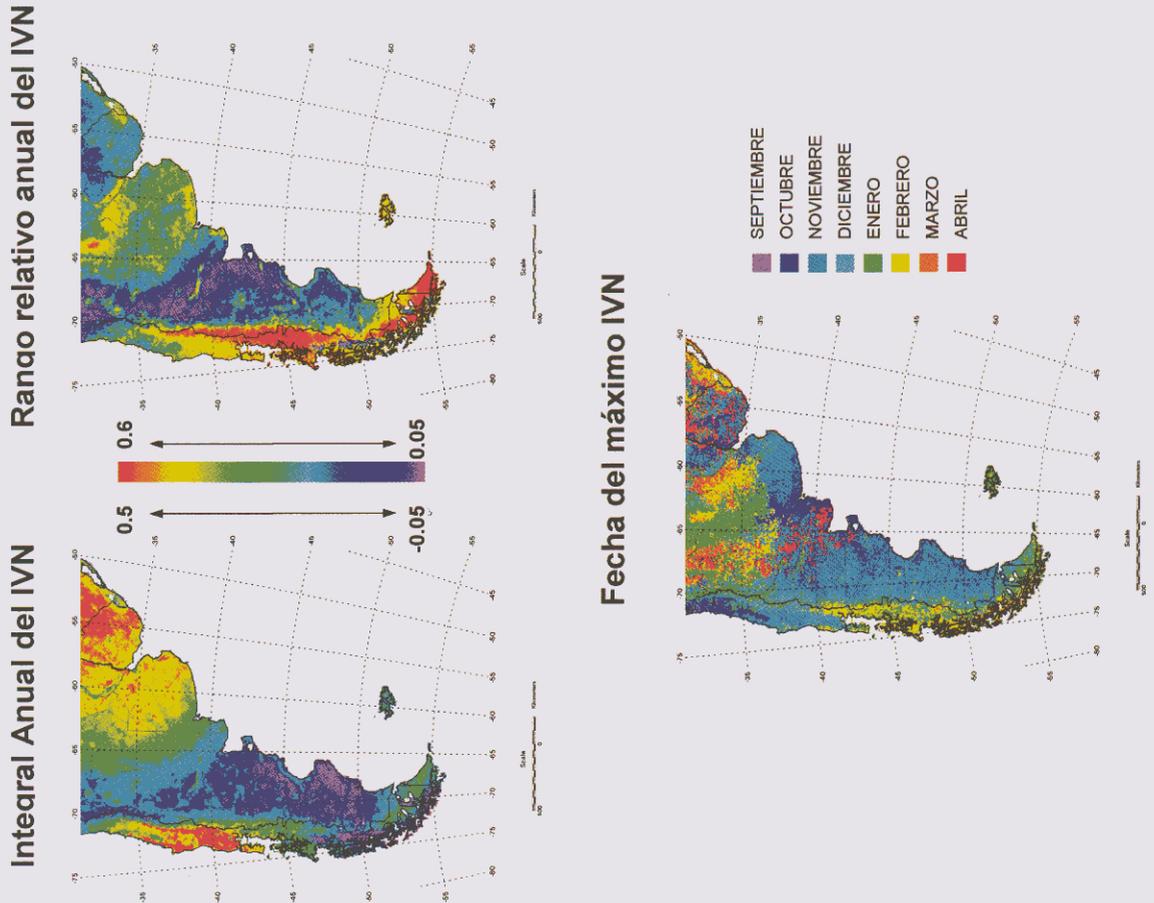


Figura 2

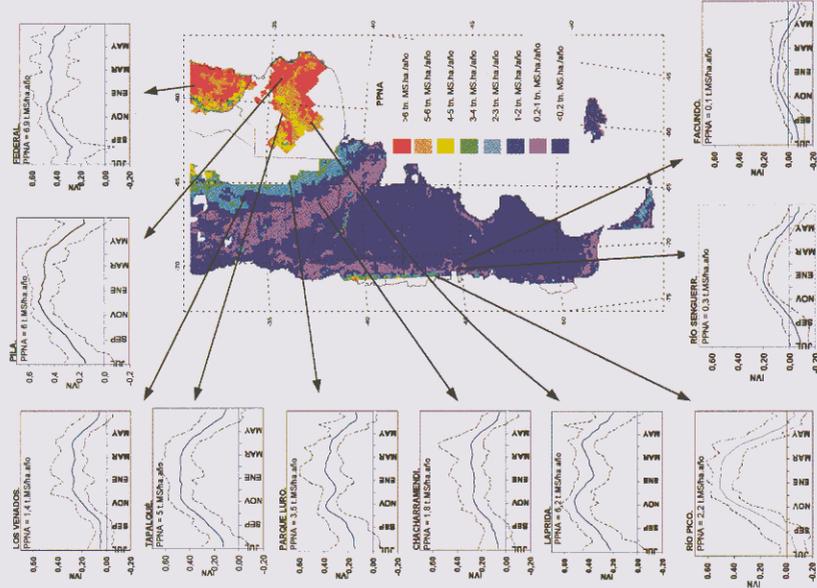


Figura 2. Valores de Productividad Primaria Neta Aérea (ton/ha/año) promedio para el período 1981-1993 para áreas ganaderas de las zonas templadas de Argentina. Los gráficos muestran para una serie de localidades de la marcha estacional de la productividad promedio y los valores extremos. (Tomado de Paruelo et al., 1999)

Figura 3. Mapa de la variación de tres atributos de la marcha anual del Índice Verde Normalizado (IVN) en las zonas templadas de Argentina: la integral anual (el área bajo la curva anual de IVN), el rango relativo o la diferencia entre los valores máximos y mínimos divididos la integral y la fecha del valor máximo. El IVN es un índice espectral derivado de datos espectrales provistos por los sensores a bordo de los satélites de la serie AVHRR/NOAA y que muestran una estrecha relación con la productividad (Tomado de Paruelo et al., 2001).

## Referencias

- Di Bella, C. M.; Rebella, C. M. and Paruelo, J. M. (2000), "Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina". International Journal of Remote Sensing 21:791-797.
- Guerschman, J. P.; Paruelo, J. M.; Di Bella, C. M.; Giallorenzi, M. C. and Pacin, F. (en prensa), "Land classification in the Argentine pampas using multi-temporal landsat TM data". International Journal of Remote Sensing.
- Jobbagy, E. G.; Sala, O. E. and Paruelo, J. M. (2002), "Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach". Ecology 83:307-319.
- Oesterheld, M.; Di bella, C. M. and Kerdiles, H. (1998), "Relation between NOAA-AVHRR satellite data and stocking rate of rangelands". Ecological Applications. 8: 207-212.
- Paruelo, J. M.; Epstein, H. E.; Lauenroth, W. K. y Burke, I. C. (1997), "ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the US". Ecology 78:953-958.
- Paruelo, J. M.; Garbulska, M. F.; Guerschman, J. P. y Oesterheld, M. (1999), "Caracterización regional de los recursos forrajeros de las zonas templadas de Argentina mediante imágenes satelitarias". Revista Argentina de Producción Animal 19: 125-131.
- Paruelo, J. M.; Oesterheld, M.; Di Bella, C. M.; Arzadum, M.; Lafontaine, J.; Cahuepe, M. and Rebella, C. M. (2000), "A calibration to estimate primary production of subhumid rangelands from remotely sensed data". Applied Vegetation Science 3:189-195.
- Paruelo, J. M.; Jobbagy, E. G. and Sala, O. E. (2001), "Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America". Ecosystems 4: 683-698.
- Caja 1. El Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección (LART). Un proyecto estratégico de la Universidad de Buenos Aires para la evaluación y seguimiento de los recursos naturales y los agroecosistemas**  
El LART es un proyecto estratégico de la Universidad de Buenos Aires enfocado a la investigación, formación de profesionales y desarrollo de tecnología en el área de la teledetección y el análisis regional. Funciona en la Facultad de Agronomía en el ámbito del IFEVA (Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas Vinculadas a la Agricultura), un instituto de la UBA y CONICET. En el LART trabajan investigadores y docentes de distintas cátedras de la FAUBA (Ecología, Forrajes, Ovinos, Sociología). Mantiene fuertes vínculos con la Escuela para Graduados "Alberto Soriano" a través de la participación de sus miembros en el dictado de cursos y en la dirección de tesis de maestría y doctorado. Sus productos científicos se traducen en numerosos artículos en revistas internacionales de alto impacto. La misión básica del LART es conectar la generación de conocimiento con el sistema productivo y social. En tal sentido ha establecido vínculos y convenios de desarrollo tecnológico con empresas, asociaciones de productores e instituciones públicas del país y el exterior para la solución de problemas productivos o de conservación de los recursos naturales.
- Caja 2. La teledetección en la evaluación de la productividad primaria**  
La Productividad Primaria Neta (PPN) se define como la tasa de acumulación de materia seca en un ecosistema y representa el alimento potencialmente disponible para los herbívoros. La PPN se mide como cantidad de materia seca por unidad de superficie y tiempo, usualmente kg-ha-2-año-1 o g-m-2-día-1. Conocer la PPN de un ecosistema es de especial interés, ya que representa la cantidad de energía que los vegetales incorporan y queda disponible para los siguientes niveles tróficos del sistema y para el hombre. En los últimos años se han desarrollado técnicas que permiten estimar la PPN mediante sensores ubicados en los satélites de observación terrestre. Estas técnicas se basan en el hecho de que los vegetales absorben la radiación solar fundamentalmente en un rango de longitudes de onda que va de 400 nm (violeta) a 800 nm (rojo). Las longitudes de onda mayores a 800 nm (infrarrojo) no son absorbidas por los pigmentos vegetales y por lo tanto son transmitidas y reflejadas. Las plantas, entonces, reflejan poca radiación en el rojo y mucha radiación en el infrarrojo, y esto las diferencia de cualquier otro elemento que se puede encontrar sobre la superficie terrestre (suelo, agua, nieve, etc.). Sobre la base de esto se construyen índices de vegetación a partir de los datos obtenidos por sensores remotos. Un índice muy difundido es el Índice Verde Normalizado (IVN) que se calcula como la diferencia entre la radiación reflejada en el infrarrojo y el rojo, dividido la suma de ambas ( $IVN = (IR - R) / (IR + R)$ ). El IVN es un estimador de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el canopy (FRFAA). Esta relación provee la base teórica de la conexión entre el IVN y la PPN. La PPN es directamente proporcional a la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el canopy (RFAA). La constante de proporcionalidad  $\Sigma$  corresponde a la eficiencia de conversión de energía radiante en biomasa ( $PPN = \Sigma \times RFAA$ ). Numerosos trabajos utilizan el IVN para estimar la PPN o la PPNA (la porción aérea de la PPN) en bosques, sabanas, pastizales y cultivos. Los sensores remotos ubicados en satélites ofrecen dos ventajas fundamentales con respecto a otros métodos de estimación: la facilidad para abarcar grandes superficies y la posibilidad de repetir las estimaciones en el tiempo.



Two roads.

Óleo.

GUILLERMO ROUX, 1961



Casa roja.

Óleo.

GUILLERMO ROUX, 1961