

La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos

J.M. Paruelo ¹

(1) Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección – IFEVA y Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires y CONICET. C1417DSE Buenos Aires, Argentina.

➤ Recibido el 22 de agosto de 2008, aceptado el 8 de septiembre de 2008.

Paruelo, J.M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17(3):4-22.

La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos: Los sensores remotos han sido valiosos auxiliares de los ecólogos en las últimas décadas. El uso más frecuente de estas herramientas ha sido la caracterización estructural del paisaje. En general, se ha recurrido a la interpretación visual de imágenes y la clasificación digital. En estos casos, un atributo de la superficie terrestre (por ej. un tipo dado de cobertura) se relaciona con un comportamiento espectral determinado (valores de reflectancia o emisión de la superficie terrestre en distintas longitudes de onda) sin conocer los mecanismos del vínculo. Si bien este uso de la teledetección ha permitido avances importantes en Ecología, parece estar por debajo de su potencial. Entre las diferentes alternativas que permitirían hacer un uso más eficiente de la información generada por sensores a bordo de satélites, en este artículo se pone énfasis en la descripción de procesos biofísicos a nivel de ecosistema a partir de la información registrada por los sensores. Para ello, se discute el vínculo entre los datos registrados por los sensores a bordo de satélites de observación terrestre y dos procesos funcionales del ecosistema: la productividad primaria y la evapotranspiración.

Palabras clave: satélites, teledetección, productividad primaria neta, evapotranspiración, índices espectrales.

Paruelo, J.M. (2008). Functional characterization of ecosystems using remote sensing. *Ecosistemas* 17(3):4-22.

Functional characterization of ecosystems using remote sensing: Over the last decades, remote sensors provided a valuable service to ecologists. The most frequent use of this tool has been the structural characterization of landscape. Generally visual interpretation of images and digital classification have been the most common approaches. In these cases, a surface attribute (for example, a type of land cover) is related to a certain spectral behavior (reflectance values or terrestrial surface emissions in different wave lengths) without knowing the linking mechanisms. Even though this use of remote sensing allowed important advances in ecology, it seems to be below its full potential. Among the different alternatives that would allow a more efficient use the information generated by remote sensors on board satellites, this article emphasizes on the description of bio-physical processes at the ecosystem level from the information registered by the sensors. For that purpose, the link between the data registered by the sensors on board terrestrial observation satellites and two functional processes of the ecosystem: primary productivity and evapotranspiration, is being discussed.

Key Words: satellites, remote sensing, net primary productivity, evapotranspiration, spectral indexes.

Introducción

Los primeros satélites de observación terrestre comenzaron a operar a principios de la década de 1970. Desde entonces el sistema científico-técnico ha puesto a disposición de la sociedad herramientas y modelos conceptuales que traducen los datos registrados por los sensores remotos en conocimiento útil para la toma de decisiones en múltiples áreas incluyendo las ciencias ambientales y la conservación. Los sensores a bordo de satélites registran energía electromagnética emitida o reflejada por un objeto o superficie en distintas bandas del espectro electromagnético. Las imágenes satelitales proveen entonces datos cuantitativos y espacialmente continuos de la superficie y, en tal sentido, son mucho más que una fotografía. La Ecología como ciencia ha incorporado la teledetección en una gran variedad de estudios (ver síntesis en Wessman 1992; Kerr y Ostrovsky 2003; Pettorelli et al. 2005).

Si bien en la última década la mayor disponibilidad de imágenes (en cantidad y tipo) y las facilidades para su adquisición han popularizado su empleo, el uso más generalizado de esta información por parte de los ecólogos ha sido la caracterización

estructural del paisaje. Este uso de la información provista por los sensores remotos tiene un enorme impacto ya que brinda la posibilidad de, por un lado, describir la heterogeneidad estructural del territorio y, por otro, describir patrones espaciales de las categorías estructurales. La identificación de patrones espaciales es un paso crucial en la elaboración de hipótesis acerca de los controles de procesos ecológicos. Las técnicas más comúnmente usadas con estos fines han sido la interpretación visual de imágenes y la clasificación digital (Lillesand y Kiefer 2000; Chuvieco 2002). En estos casos, hay, en general, una aproximación de “caja negra” en donde un atributo de la superficie terrestre (por ej. un tipo dado de cobertura) se relaciona con un comportamiento espectral determinado (valores de reflectancia o emisión de la superficie terrestre en distintas longitudes de onda) sin conocer los mecanismos del vínculo. Si bien este uso de la teledetección ha permitido avances importantes en ecología, no explota todo el potencial de la información espectral.

Entre las diferentes alternativas que permitirían hacer un uso más eficiente de la información generada por sensores a bordo de satélites, en este artículo pondremos énfasis en la descripción de procesos biofísicos a nivel de ecosistema (ver también Yebra y Chuvieco 2008, en este número). Para ello, revisaremos los fundamentos del uso de sensores remotos en la descripción de dos procesos funcionales del ecosistema: la productividad primaria y la evapotranspiración. Discutiremos a su vez algunas aplicaciones que hacen uso de las técnicas y modelos conceptuales discutidos (la definición de tipos funcionales de ecosistemas o la evaluación de desertificación).

Funcionamiento ecosistémico

El funcionamiento ecosistémico se refiere al intercambio de materia y energía entre la comunidad biótica y la atmósfera (Virginia y Wall 2001). Su caracterización involucra entonces la medición de flujos. Estos incluyen, entre otros, la productividad primaria neta aérea (PPNA), la evapotranspiración, la productividad neta del ecosistema, la mineralización neta de N y las pérdidas totales de nutrientes. Entre estas variables la PPNA y su dinámica estacional adquieren particular relevancia dado que sintetizan muchos otros aspectos del funcionamiento ecosistémico. En las últimas décadas, la proliferación de diversas técnicas (eddy covariance, isótopos estables, sensores remotos, etc.) ha permitido mejorar la medición directa de diversos aspectos del funcionamiento ecosistémico (Sala et al. 2000). Pese a estos avances, cuestiones logísticas limitan el número y tipo de flujos a usar en la caracterización del funcionamiento ecosistémico. Por otro lado, el grado de intangibilidad que estas variables conservan, mayor que el que se asocia a por ejemplo el inventario de especies, ha limitado su difusión.

La caracterización funcional de los ecosistemas, complementaria de la estructural, presenta algunas características particularmente atractivas en estudios ecológicos, especialmente a escala regional. Por un lado, permiten una valoración cuantitativa directa de los servicios ecosistémicos, en especial de aquellos definidos como de soporte (productividad primaria, dinámica del agua) (Millenium Assessment 2003). Por otro, los atributos funcionales suelen responder más rápido a los cambios en las condiciones ambientales debido a la inercia en la respuesta de los atributos estructurales (Pennington 1986; Milchunas y Lauenroth 1995). Por ejemplo, en muchas áreas del planeta se han detectado aumentos en las ganancias de C durante las últimas dos décadas (Hicke et al. 2002; Nemani et al. 2003; Paruelo et al. 2004) pero, sin embargo, en la mayoría de las áreas que experimentan esos cambios, la fisonomía de la vegetación no ha experimentado modificaciones detectables. El uso de datos espectrales provistos por sensores remotos para caracterizar el funcionamiento ecosistémico agrega una serie de ventajas. La teledetección permite disponer de una cobertura completa del territorio y no es necesario, por lo tanto, definir protocolos de intra o extrapolación de observaciones puntuales (Paruelo et al. 2001; Alcaraz-Segura et al. 2006). La creciente disponibilidad de sensores y plataformas que proveen los datos espectrales necesarios para el cálculo de atributos funcionales del ecosistema con distinta resolución espacial, permite el estudio de un mismo proceso (por ej. la evapotranspiración o la productividad primaria) a distintas escalas espacio-temporales usando el mismo protocolo de observación. La caracterización funcional amplía y complementa el uso más tradicional de los sensores remotos para descripciones estructurales basadas en clasificaciones y fotointerpretación.

Índices espectrales y variables sintéticas

El proceso de generación de una aplicación concreta de la información espectral implica la “traducción” de la medición de radiación reflejada o emitida realizada por el satélite en una variable o índice con un significado biofísico (**Fig. 1**). Si bien los cálculos específicos variarán con la resolución espectral con la que se trabaje, la traducción tiene una serie de aspectos en común. Cuando se trata de radiación reflejada (visible e infrarrojo cercano y medio) el primer paso incluye el cálculo de la reflectancia o sea el cociente entre lo registrado por el sensor (expresado en unidades de radiancia) y la radiación incidente sobre la superficie. En el caso de energía emitida en la porción térmica del infrarrojo, la inversión de la Ley de Stephan-Boltzmann (que postula que la radiación emitida por un cuerpo es proporcional a su temperatura a la cuarta potencia) permite la estimación de la temperatura superficial a partir de datos provistos por sensores remotos.

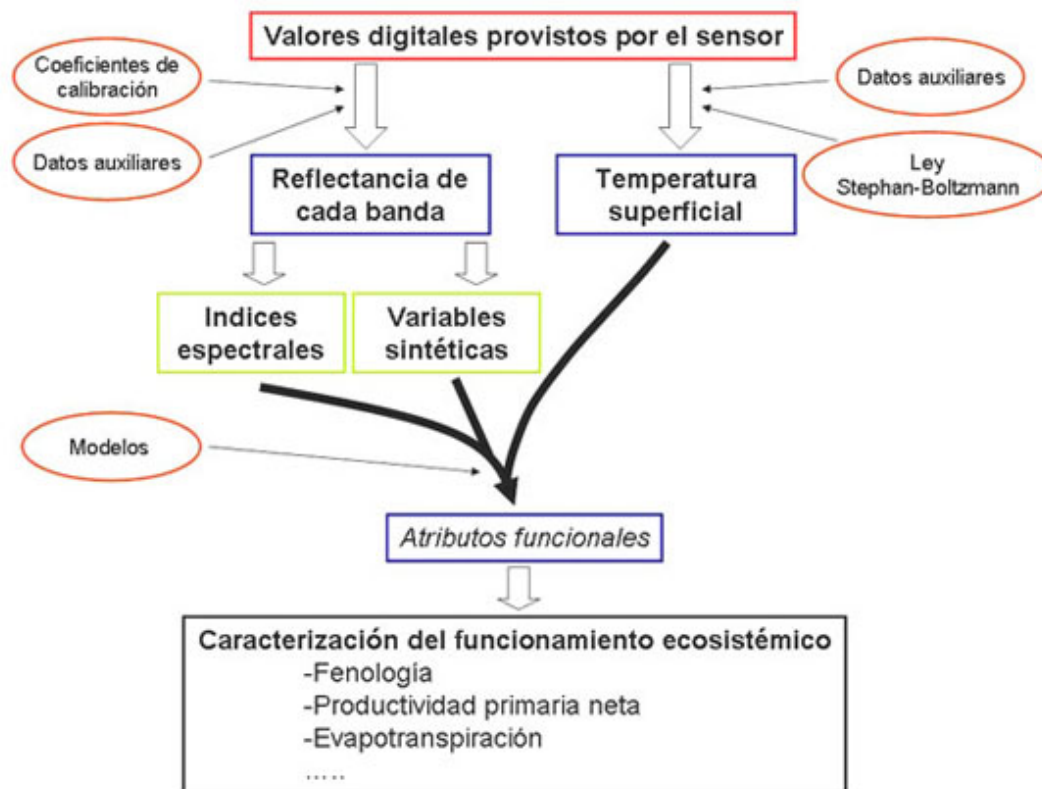


Figura 1. Esquema del procesamiento de datos espectrales para derivar estimaciones de variables funcionales del ecosistema.

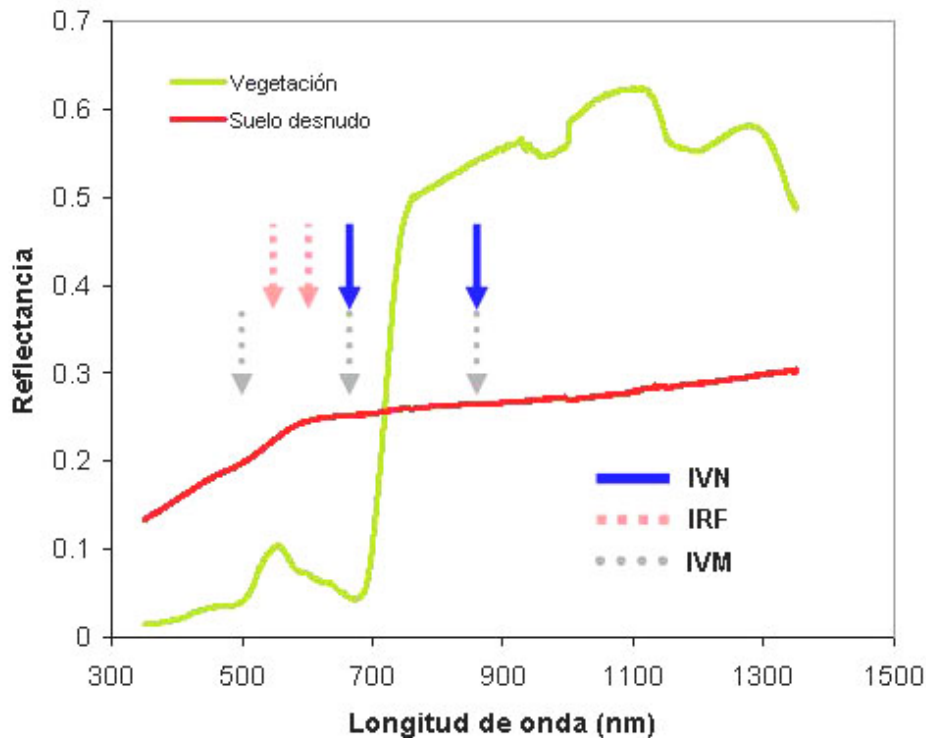
El análisis del comportamiento espectral de las superficies en las distintas porciones del espectro electromagnético (bandas) permite derivar algunos índices o variables sintéticas asociadas a procesos biofísicos. Estas resultan de operaciones algebraicas con bandas correspondientes a distintas porciones del espectro electromagnético. Algunos de estos índices y variables incluyen el Índice de Vegetación Normalizado (IVN), el Índice de Vegetación Mejorada (IVM), el Índice de Reflectancia Fotoquímica (IRF) y el albedo de la superficie. Todos estos índices pueden relacionarse de manera directa con atributos biofísicos de la superficie (por ej., la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes o la eficiencia en el uso de la radiación) (**Fig. 1**).

El Índice de Vegetación Normalizado

Varios índices espectrales han sido propuestos como estimadores de la presencia y condición de la vegetación (Choudhury 1987; Baret y Guyot 1991; Ridao et al. 1998; Fensholt et al. 2004), sin embargo, el Índice de Vegetación Normalizado (o *Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) ha sido y es el más usado. La primera cita bibliográfica de este índice corresponde a Rouse et al. (1973), un investigador de Texas A&M University en los EEUU. Sin embargo, fue Compton Tucker, del Goddard Space Flight Center de la NASA, quien instauró al IVN como un descriptor de la vegetación (ver por ej., Tucker 1979; Tucker et al. 1985). El IVN integra dos aspectos claves del comportamiento espectral de los tejidos fotosintéticos: la baja reflectancia en longitudes de onda correspondientes al rojo (debido a la absorción por parte de la clorofila) y la alta reflectancia en la porción del infrarrojo cercano (debido a la estructura del mesofilo de las hojas). El IVN se calcula como:

$$IVN = (IR - R) / (IR + R)$$

en donde R e IR corresponden a la reflectancia en la porción roja e infrarroja del espectro respectivamente (**Fig. 2**). El IVN es equivalente a la relación simple ($RS = IR/R$), $IVN = (RS - 1) / (RS + 1)$. El IVN ha mostrado tener una fuerte relación con la biomasa (Tucker 1977; Gerberman et al. 1984; Ripple 1985; Sellers 1985), el índice de área foliar (IAF) (Curran 1983; Asrar et al. 1984; Baret et al. 1989) o la productividad primaria neta aérea (PPNA) (Prince 1991; Paruelo et al. 1997). Estas relaciones dieron lugar a numerosas aplicaciones del IVN en estudios de ecología regional, que en Iberoamérica incluyen clasificaciones de tipos de cobertura (Guerschman et al. 2003a; Paruelo et al. 2004; Baldi et al. 2006; Baldi y Paruelo 2008), definición de Tipos Funcionales de Ecosistemas (Paruelo et al. 2001; Alcaráz et al. 2006; Baeza et al. 2006), evapotranspiración (Di Bella et al. 2000; Noretto et al. 2005), estimaciones de densidad de herbívoros (Oosterheld et al. 1998; Posse y Cingolani 2000; 2004) o de sus parámetros demográficos (Hall y Paruelo 2006).



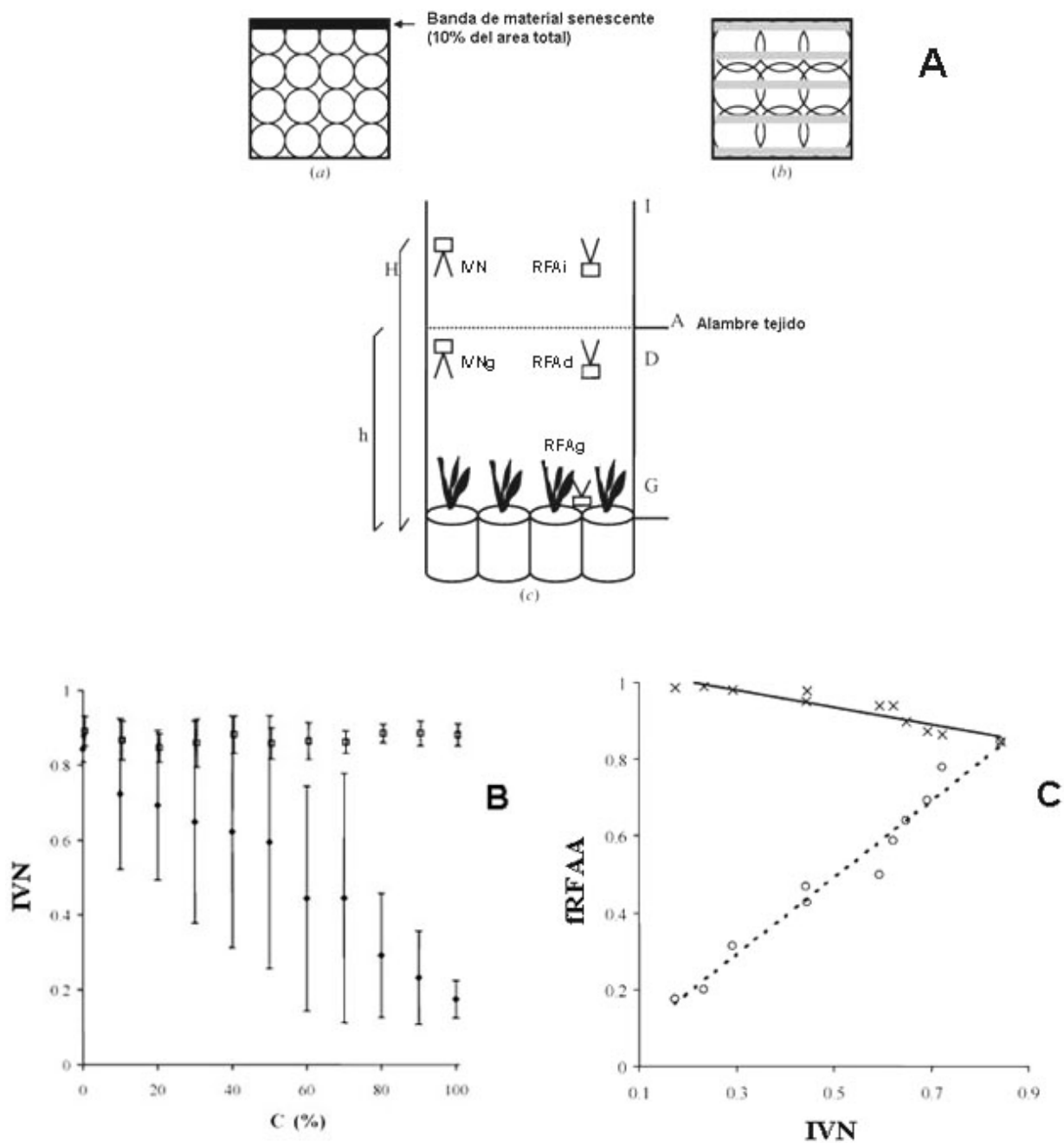
Índice o variable	Sensor	Vegetación	Suelo desnudo
IVN	Landsat TM	0.828	0.020
	MODIS	0.831	0.020
	AVHRR/NOAA	0.803	0.038
IVM	MODIS	0.795	0.019
IRF escalado	MODIS	0.658	0.460
	ASD	0.488	0.476
Albedo (vis)	Landsat TM	0.058	0.217

Figura 2. Espectro de reflectancia de una superficie vegetada y de suelo desnudo. Se indican con flechas el centro de las bandas de distintos sensores a bordo de plataformas satelitales usadas para calcular distintos índices espectrales (ver tabla): índice de vegetación Normalizado, IVM: índice de vegetación mejorado, IRF escalado = $(IRF + 1) / 2$ en donde IRF es el índice de reflectancia fotoquímico.

Pero, ¿qué aspecto de la vegetación “mide” efectivamente el IVN? Diversos trabajos han demostrado tanto desde una perspectiva teórica como empírica que este índice es un estimador lineal de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes (fRFAA) (Baret and Guyot 1991; Sellers et al. 1992; Gamon et al. 1995; Myneni et al. 1995). En base a consideraciones teóricas, Sellers y sus colaboradores (1992) demostraron que la naturaleza exponencial de la relación entre fRFAA y el índice de área foliar (IAF) puede ser descrita mediante un coeficiente de extinción (k_f RFAA) que muestra la atenuación de la radiación en el dosel. El IVN también se relaciona con el IAF de manera exponencial y esta relación se caracteriza a su vez por un coeficiente de extinción k_{IVN} (Asrar et al. 1984). Como los valores de k_f RFAA y de k_{IVN} son similares, fRFAA e IVN están linealmente relacionados (Sellers et al. 1992). Estos mismos autores muestran que los modelos teóricos de transferencia radiativa en un dosel indican que la RFAA puede ser estimada si se conoce la cantidad de radiación reflejada en el visible y en una longitud de onda para la cual el coeficiente de extinción sea el doble que el de la luz visible (que disperse mucha más radiación). Esa longitud de onda corresponde al IR cercano.

La relación entre el IVN y variables de estado como el IAF o la biomasa dependen de la arquitectura de la cubierta vegetal y de la cantidad de material senescente presente. La relación entre IVN y fRFAA está mucho menos afectada por la presencia de material senescente que la relación entre el IVN y la cobertura o el índice de área foliar. Di Bella et al. (2004) investigaron la influencia del material senescente sobre el IVN y la fRFAA de todo el dosel y de la porción verde aislando ambos tipos de tejido (**Fig. 3A**). El IVN de los tejidos verdes (debajo del material senescente) se mantuvo constante pero el de todo el dosel disminuyó (**Fig. 3B**). La fRFAA de todo el dosel (tejidos verdes y senescentes) disminuyó ligeramente con el aumento de la

cobertura de material no fotosintético a causa de un aumento del albedo. La *fRFAA* de los tejidos verdes mantuvo una relación lineal y positiva con el IVN de todo el dosel (**Fig. 3C**).



(Modificado de Di Bella et al. 2004)

Entre los índices espectrales derivados del NDVI se encuentra el *Perpendicular Vegetation Index* (PVI: Richardson y Wiegand 1977), el *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI: Huete 1988), el *Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI: Kaufman y Tanre 1992) y el *Global Environment Monitoring Index* (GEMI: Pinty y Verstraete 1992). La difusión de estos índices, principalmente debido a la necesidad de datos adicionales a la reflectancia en el R y el IR, ha sido limitada. Una de las mayores ventajas del IVN es la posibilidad de calcularlo a partir de la información provista por la mayoría de los sensores de las plataformas de observación terrestre y muchos de los satélites meteorológicos. La normalización del índice, por otra parte reduce el efecto de diferencia en iluminación de la superficie, sombra de nubes, algunas distorsiones asociadas a la topografía, etc. El IVN exhibe algunos problemas relacionados con la saturación a altos niveles de biomasa y con su sensibilidad al sustrato debajo del dosel.

El Índice de Vegetación Mejorado

El Índice de Vegetación Mejorado IVM (Enhanced Vegetation Index, EVI) es similar al IVN pero incorpora otras bandas espectrales para "optimizar" la señal de la vegetación, particularmente en niveles altos de biomasa. El IVM busca a su vez desacoplar la señal del sustrato y la vegetación y minimizar la influencia de la atmósfera. Fue desarrollado por Huete et al. (2002) específicamente para el sensor MODIS y se expresa como

$$EVI = 2.5 \times (IR - R) / (IR + C1 \times R - C2 \times A + L)$$

Donde A, R e IR son las reflectancias corregidas atmosféricamente correspondientes a la porción del azul (459-479nm), del rojo (620-670 nm) y del infrarrojo (841-876 nm) cercano del espectro electromagnético, respectivamente (**Fig. 2**). L es un ajuste de acuerdo al sustrato que tiene en cuenta la transferencia de la radiancia roja e infrarroja a través de la cubierta vegetal. C1 y C2 son coeficientes que tienen en cuenta la presencia de aerosoles y que usan la banda correspondiente al azul para corregir la reflectancia en la porción roja. Los coeficientes adoptados en el algoritmo del sensor MODIS son L = 1, C1 = 6 y C2 = 7.5. A partir de 2000 con el lanzamiento de los satélites Terra y Aqua (ambos equipados con el sensor MODIS) por parte de la NASA, se ha generalizado el uso del IVM en análisis ecológicos regionales.

Índice de Reflectancia Fotoquímico

Gamon et al. (1992) propusieron el Índice de Reflectancia Fotoquímico IRF (*Photochemical Reflectance Index, PRI*) para evaluar cambios en el rendimiento cuántico o la eficiencia en el uso de la radiación de la vegetación:

$$IRF = (R531 - R570) / (R531 + R570)$$

Siendo R531 y R570 las reflectancias en esas respectivas longitudes de onda (**Fig. 2**). Este índice se basa en que parte de la energía absorbida por la clorofila en la fotosíntesis se pierde como calor o fluorescencia. Un cambio en la tasa fotosintética va a afectar la fluorescencia y la disipación de energía y, por lo tanto, la medición de la fluorescencia provee una medida de la eficiencia fotoquímica de la fotosíntesis o rendimiento cuántico (o sea: moles C fijados / moles de fotones incidentes) (Peñuelas et al. 1995). El rendimiento cuántico es un determinante importante de la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR). La fluorescencia bajo luz ambiente (F) y bajo un pulso de saturación de luz (F*) permiten estimar la eficiencia fotoquímica del sistema fotosintético como (F-F*)/F*. Estos cambios en fluorescencia generan una respuesta en la reflectancia en el entorno de los 531 nm. La eficiencia fotoquímica está relacionada a su vez con la interconversión de las xantofilas y con cambios en la conformación de los cloroplastos. Ambos aspectos generan una respuesta diferente en la absorbancia en 505 y 529 nm (Peñuelas et al. 1995). El IRF estaría entonces capturando esas respuestas. La banda correspondiente a 570 nm no presenta respuesta a estos factores y se la incluye como una referencia.

Si bien, numerosos estudios de campo o realizados en condiciones controladas muestran una buena correlación entre la EUR y el IRF (Filella et al. 1996; Guo y Trotter 2004; Inoue y Peñuelas 2006; Nichol et al. 2006; Nakaji et al. 2007), el uso del IRF estuvo limitado por la disponibilidad de sensores a bordo de satélites con una resolución espectral que incluyera bandas centradas en los 531 y 570 nm. Aún cuando el sensor MODIS no cuenta con una banda centrada en los 570 nm, el IRF calculado usando como referencia otras bandas (bandas MODIS 1,620–670 nm, 4,545–565 nm, 12, 546–556 nm y 13, 662–672 nm) y la banda 11 de este sensor (531 nm) muestra una alta correlación con estimaciones de Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) estimadas en campo (Drolet et al. 2005). Garbulsky et al. 2008, en este número, muestran que el Índice de Reflectancia Fotoquímica (PRI), calculado a partir de la reflectancia obtenida con el sensor MODIS, presentó una alta correlación con la variabilidad estacional de la EUR estimada a escala de ecosistema con técnicas de covarianza turbulenta en dos bosques mediterráneos, a lo largo de cinco años. Si bien es necesario resolver algunos problemas metodológicos, el IRF tiene un enorme potencial para estimar la EUR del dosel (Grace et al. 2007).

Albedo

El albedo es uno de los atributos más importante en la caracterización del balance de energía de la superficie, y cambios en su magnitud tienen consecuencias en procesos climáticos y biofísicos (Dickinson 1995). Su estimación es crítica en muchas aplicaciones ecológicas, por ejemplo la evaluación de impactos de cambios en el uso del suelo en la cantidad total de energía que ingresa al ecosistema. Los sensores con una resolución espectral tal que provea varias bandas en la porción reflectiva del espectro permiten la descripción de la variación de este atributo en el tiempo y el espacio. Muchos estudios han relacionado el albedo de onda corta medido en el terreno con observaciones remotas, o con los resultados de modelos de transferencia radiativa (por ej. Russell et al. 1997; Stroeve et al. 1997). Liang (2000) aplicó un algoritmo que permite separar la reflectancia de la superficie en distintas bandas en simulaciones de modelos de transferencia radiativa. Este ejercicio lo realizó para distintas superficies diferentes y una gran variedad de condiciones atmosféricas. Esto le permitió desarrollar una serie de formulas que permiten calcular el albedo total, visible o del IR cercano a partir de las bandas reflectivas de varios sensores incluyendo ASTER, AVHRR, ETM+/TM, GOES y MODIS. En el caso de Landsat TM y ETM las ecuaciones propuestas por Liang para albedo de onda corta (alb OC) y visible (alb VIS) son las siguientes:

$$\text{alb OC} = 0.356 \times B_1 + 0.130 \times B_3 + 0.373 \times B_4 + 0.085 \times B_5 + 0.072 \times B_7 - 0.0018$$

$$\text{alb VIS} = 0.443 \times B_1 + 0.317 \times B_2 + 0.240 \times B_3$$

en donde B_i corresponde a las bandas 1,2,3,4,5 y 7 de los sensores TM y ETM+ a bordo de los satélites de la serie Landsat.

El modelado de procesos ecosistémicos

Dos procesos ecosistémicos clave pueden ser descritos a partir de los índices espectrales o de las variables sintéticas descritas más arriba; **la productividad primaria neta** y **la evapotranspiración (Fig. 1)**. Discutiremos a continuación los modelos conceptuales en los que se basan estas estimaciones.

Productividad Primaria Neta (PPN)

Monteith (1972) propuso que la productividad primaria neta (PPN) de una cubierta vegetal es proporcional a la cantidad total de radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA), a la fracción de esa radiación interceptada por los tejidos verdes (fRFA) y a la eficiencia en el uso de la radiación (EUR):

$$\text{PPN}(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}) = \text{RFA}(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}) \times \text{fRFA} \times \text{EUR}(\text{gMS} \cdot \text{MJ}^{-1})$$

Este modelo, conceptualmente muy sólido, no pudo tener una aplicación operativa inmediata dada las dificultades que plantea la estimación en campo de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) por el dosel. La estimación de RFAA implica la medición de la radiación incidente, la reflejada por el dosel, la transmitida y la reflejada por el suelo. Por lo menos tres problemas hacen compleja la estimación de la RFAA por los tejidos verdes: (i) el tamaño del dosel (ej. un bosque con árboles de más de 20 m), (ii) la presencia de material no fotosintetizante (ramas, hojas senescentes) y (iii) la heterogeneidad espacial de las cubiertas vegetales. Cómo se indicaba antes, la fRFAA puede ser estimada a partir del IVN o del IVM. La forma precisa de esa relación varía entre biomas, y una serie de relaciones semi-empíricas han sido propuestas: (a) lineales (Choudhury 1987; Goward y Huemmrich 1992; Ruimy et al. 1994; Moreau et al. 2003) (b) no-lineales (Potter et al. 1993; Sellers et al. 1994) y (c) una combinación de ambas (Los et al. 2000).

En el caso de métodos lineales se fija un valor máximo de IVN o IVM al cual corresponde un fRFAA de 95%. Este valor puede ser el máximo IVN registrado o el correspondiente al percentil 98. Valores de IVN o IVM superiores al valor del percentil 98 corresponderán a una fRFAA de 95%. Para la situación de intercepción 0 (FRFAA = 0) (suelo desnudo) se asume un valor de los índices espectrales (por ejemplo IVN = 0.01). Piñeiro et al. (2006) para pastizales del Río de la Plata en Argentina y Uruguay usa la siguiente ecuación:

$$\text{fRFAA} = \min [(1.38 \times \text{IVN}) - 0.014, 0.95].$$

Para métodos no lineales, Potter et al. (1993), recomiendan valores máximos y mínimos de IVN de 0.67 y 0.004, respectivamente. Esto equivale a una relación IR/R (RS) de 5.13 y 1.08. La ecuación no-lineal toma la siguiente forma:

$$\text{fRFAA} = \min [RS / (RS_{\text{max}} - SR_{\text{min}}) \times SR_{\text{min}} / (SR_{\text{max}} - SR_{\text{min}}), 0.95]$$

Para un pastizal o cultivo, la EUR tiene un máximo comparable con el rendimiento fotosintético a nivel de hoja en condiciones óptimas. Sin embargo, las bajas temperaturas y las restricciones hídricas y nutricionales, entre otros factores, reducen en el

campo el valor máximo de EUR (Prince 1991; Field et al. 1995; Gamon et al. 1995; Gower et al. 1999; Nouvellon et al. 2000). La estimación empírica de la EUR requiere de la medición simultánea de la PPN (generalmente la PPN aérea) y de la RFAA. La síntesis de las mediciones de EUR llevadas a cabo en distintos sistemas muestra una importante variación entre biomas (Ruimy et al. 1994; Field et al. 1995). Field et al (1995) indican EUR que van de $0.270 \text{ gMS.MJ}^{-1}$ para desiertos a $0.708 \text{ gMS.MJ}^{-1}$ para selvas tropicales. La EUR varía a su vez estacionalmente. Piñeiro et al. (2006) muestran (para pastizales) variaciones de EUR entre estaciones que van de 0.2 a 1.2 gMS.MJ^{-1} . Estos autores elaboraron un modelo que permite estimar las variaciones estacionales de la EUR para los pastizales del Río de la Plata en Sudamérica a partir de variables climáticas. La EUR aumenta con la precipitación y disminuye con la temperatura. Como señalábamos más arriba la EUR puede, además, ser estimada de manera directa por medio de sensores remotos a través del IRF.

La posibilidad de usar información suministrada por sensores remotos para estimar dos factores clave del modelo de Monteith (fRFAA y EUR) hace que la estimación de la PPN mediante el modelo de Monteith sea no sólo conceptualmente sólida sino también operativamente posible. Running et al. (2000) muestran el desarrollo de estimaciones globales de PPN a partir de esta aproximación usando datos provistos por los sensores MODIS.

Evapotranspiración

La estimación de la evapotranspiración mediante el uso de sensores remotos se basa en el balance energético de la superficie terrestre:

$$R_n = LET + H + G + S + P$$

En donde R_n es la radiación neta (W.m^{-2}), LET es el flujo de calor latente (producto del calor latente de vaporización, L ($2.49 \times 10^6 \text{ W. m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ a 20°C) y la evapotranspiración ET (mm), H es el flujo de calor sensible (W.m^{-2}), G es el flujo de calor geotérmico, S es la energía acumulada en la cubierta vegetal y P es la energía utilizada en el proceso de fotosíntesis. En general, los últimos tres términos son cuantitativamente menos importantes que LET y H .

Courault et al. (2003) identifican tres grandes aproximaciones para la estimación de ET con sensores remotos: i) métodos empíricos directos, ii) métodos residuales del balance de energía y iii) métodos indirectos. Los **métodos empíricos** son los más sencillos de utilizar pero a su vez los menos precisos y solo pueden aplicarse en la zona en que fueron generados. Los **métodos** que utilizan el **balance de energía** son en general un poco más complejos pero muy versátiles. Los **métodos indirectos** son los más sofisticados ya que describen de manera muy detallada (a intervalos de tiempo muy cortos -segundo, hora-) todos los procesos físicos que definen la evapotranspiración.

Dentro de los métodos indirectos se destaca una aproximación sencilla, y ampliamente utilizada, desarrollada por Jackson et al. (1977) y denominada método simplificado (**Fig. 4**). La evapotranspiración diaria (ET_d) se estima a partir de la diferencia instantánea (i) entre la temperatura superficial (T_s) y la temperatura del aire (T_a):

$$ET_d = R_n - B (T_s - T_a)^n$$

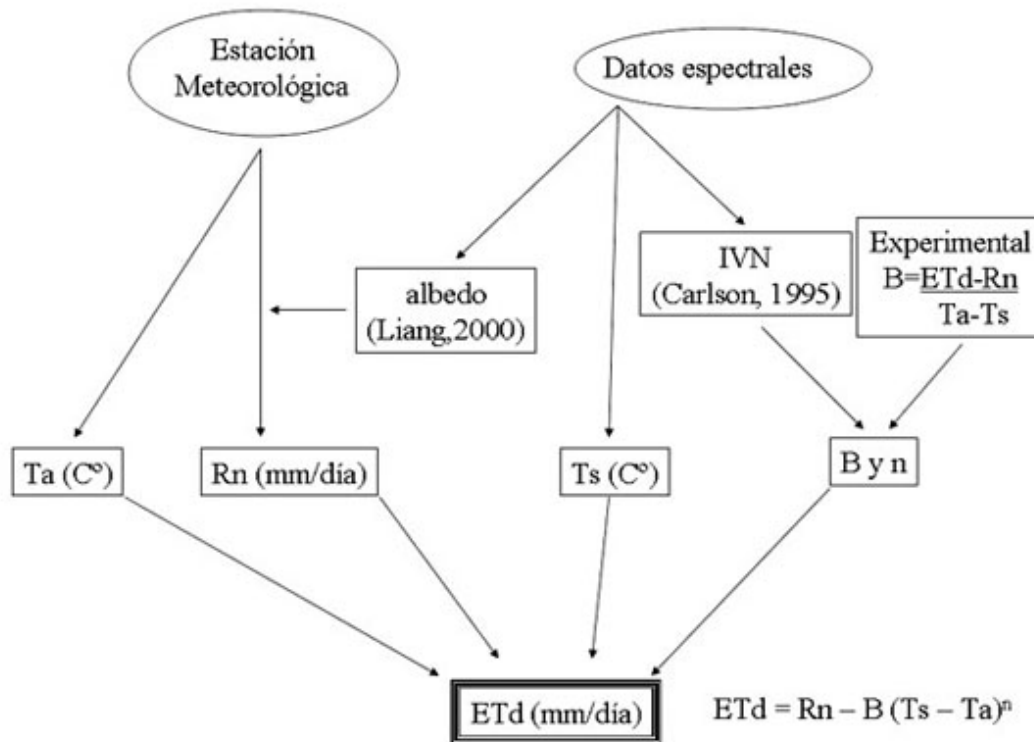


Figura 4. Esquema método simplificado desarrollado por Jackson et al. (1977) para la estimación de la evapotranspiración. ETd: tasa de evapotranspiración diaria, Ta: temperatura del aire, IVN: Índice de Vegetación Normalizado, Ts: temperatura superficial, Rn: Radiación Neta.

El modelo calcula Ts a partir de la radiación registrada por sensores remotos en el infrarrojo térmico (por ejemplo la banda 6 del sensor TM o ETM+ de Landsat). La radiación neta (Rn) es el balance de las sumas de la radiación de onda corta (Rc) y larga (Rl) entrante (↓) y saliente (↑):

$$Rn = (Rc_{\downarrow} + Rl_{\downarrow}) - (Rc_{\uparrow} + Rl_{\uparrow})$$

Rn puede obtenerse de manera empírica estimando o midiendo la radiación de onda corta incidente y calculando el albedo de la superficie a partir de las bandas reflectivas siguiendo el método propuesto por Liang (2000) (comentado anteriormente). La Rl puede a su vez medirse o estimarse a partir de Rc de acuerdo a Granger y Gray (1990). Nasetto et al. (2005) dan detalles de estos cálculos. Los valores de Ta se obtienen de estaciones meteorológicas y se refieren a una altura de 50 m. El método incorpora dos supuestos: i) que la relación entre el calor sensible (H) y la radiación neta (Rn) permanece constante a lo largo del día y ii) que el flujo geotérmico (G) es nulo. El coeficiente B o de intercambio representa una conductancia promedio del flujo de calor sensible y el coeficiente n es una corrección por condiciones de estabilidad. Si bien estos coeficientes dependen de la velocidad del viento y de la rugosidad de la superficie, son particularmente sensibles al tipo de cobertura y pueden estimarse a partir de un algoritmo propuesto por Carlson et al. (1995) que usa el IVN para describir el tipo de cobertura del suelo. Para ello, calcula el índice de vegetación normalizado escalado (IVN*) (Choudhury et al. 1994):

$$IVN^* = (IVN - IVN_{min}) / (IVN_{max} - IVN_{min})$$

En donde los valores máximos y mínimos de IVN presentes en la imagen representan áreas con máxima cobertura y suelo desnudo. A partir del IVN* se calculan B y n

$$B = 0.0109 + 0.051 (IVN^*)$$

$$n = 1.067 - 0.372 (IVN^*)$$

Aplicaciones en estudios ecológicos

La posibilidad de estimar flujos de C y agua mediante sensores remotos brinda enormes posibilidades en estudios ecológicos

regionales ya que permite cuantificar variables ecosistémicas de manera directa sobre áreas extensas sin necesidad de recurrir a protocolos de extrapolación de mediciones puntuales. El uso de estimaciones de variables ecosistémicas funcionales derivadas de la teledetección tiene varios antecedentes en la literatura (ver Kerr y Ostrovsky 2003; Pettorelli et al. 2005). Pettorelli et al. (2005) resumen los atributos que pueden calcularse a partir de las curvas estacionales de IVN derivadas de datos suministrados por plataformas con alta resolución temporal (AVHRR/NOAA o MODIS, por ejemplo) (**Tabla 1, Fig. 5**). Resumiremos aquí dos ejemplos del uso de atributos ecosistémicos en estudios ecológicos: la definición de Tipos Funcionales de Ecosistemas y la evaluación de la desertificación.

Atributo	Tipo de medida	Definición	Significado biológico	Comentarios	Fuente
IVN-I	Productividad total y biomasa	Suma de valores positivos de IVN en un período de tiempo	Productividad anual de la vegetación	No es relevante cuando la calidad es tan importante como la cantidad (por ej. herbívoros muy selectivos)	Tucker et al. (1985)
Máximo IVN	Productividad total y biomasa	Máximo IVN en el año	Productividad anual de la vegetación	Sensible a falsos picos y 'ruido'	Paruelo y Lauenroth (1998)
Rango relativo de IVN	Variabilidad intra-anual en productividad	(Máximo IVN - Mínimo IVN) / IVN-I	Permite comparaciones de estacionalidad	Sensible a falsos rangos debidos a "outliers"	Guerschman et al. (2003b)
Tasa de incremento o decremento de IVN	Fenología	Pendiente entre valores de IVN en diferentes fechas; Pendiente de la curva logística de una serie temporal de valores de IVN	Tasa de brotado y senescencia	Sensible a falsos picos y 'ruido'	Paruelo y Lauenroth (1998)
Fecha de comienzo o final de estación de crecimiento	Fenología	Fechas estimadas a partir de valores umbral o con el método de medias móviles	Comienzo de brotado	La precisión esta ligada a la escala temporal de los datos (mayor frecuencia trae aparejado peor calidad de datos)	Reed et al. (1994)
Duración de la estación de crecimiento	Fenología	Tiempo con valores de IVN > 0 o período entre inicio y final de estación de crecimiento	En sistemas con marcada estacionalidad, número de días con producción de biomasa	Sensible a falsos picos y 'ruido'	Ludeke et al. (1996)
Momento de máximo IVN	Fenología	Fecha en la que se registra el valor máximo de IVN	Momento de máxima producción de materia seca	Sensible a falsos picos y 'ruido'	Paruelo et al. (2001), Guerschman et al. (2003b)

Tabla 1. Atributos derivados de la curva estacional del IVN y sus características (tomado de Pettorelli et al. 2005).

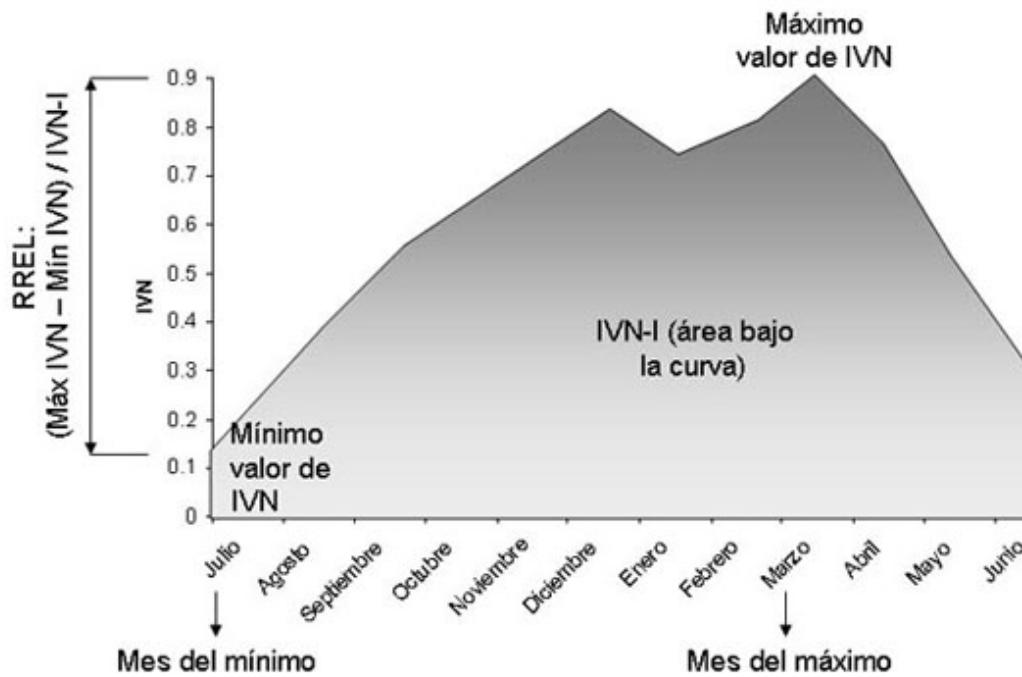


Figura 5. Curva estacional del IVN y atributos usados en la caracterización del funcionamiento ecosistémico.

Definición de Tipos Funcionales de Ecosistemas

Un objetivo frecuente en Ecología es describir la diversidad de entidades biológicas (ya sean genes, especies o ecosistemas). En el caso de los ecosistemas la escala a la cual se manifiestan los atributos que los definen (flujos de materia y energía) hace particularmente difícil su caracterización. Los “tipos funcionales de ecosistemas” (TFE) identifican grupos que comparten características relacionadas con la dinámica de los intercambios de materia y energía entre biota y atmósfera y que, además, responden de manera semejante ante factores ambientales (Soriano y Paruelo 1992). Los TFE equivalen, a un nivel jerárquico superior, a los tipos funcionales de plantas (TFP). La identificación de TFE ha permitido describir los patrones regionales de las ganancias de C por parte de la vegetación y la diversidad funcional de los ecosistemas templados de Sudamérica (Paruelo et al. 2001; Baeza et al. 2006) e ibéricos (Alcázar et al. 2006). En este último caso la definición de TFE se basó en el IVN obtenido de imágenes obtenidas por los satélites AVHRR/NOAA para el período 1982 y 1999. Cada unidad de muestreo (cada píxel de 64 km²) se caracterizó por medio de la curva estacional de IVN promedio para el período. De dicha curva (ver **Fig. 5**) se extrajeron los siguientes atributos funcionales (ver **Tabla 1**): 1) la integral anual (IVN-I), un estimador de la absorción total de radiación por parte de los tejidos verdes, obtenida como la media de los 12 valores mensuales de IVN; 2) el rango relativo anual (RREL), un indicador de la estacionalidad en la absorción de radiación (la diferencia entre el máximo y el mínimo IVN, dividida por la integral); y 3) el mes con máximo IVN (MMAX), que describe la fenología —la variación con las estaciones— de la vegetación. La absorción de radiación (el principal determinante de la productividad primaria) (IVN-I) decrece desde el NO al SE, con valores mayores en el N y NO peninsular (región atlántico-pirenaica) y en las altas montañas mediterráneas (**Fig. 6a**). La estacionalidad (RREL) es baja en los territorios atlánticos y en las montañas mediterráneas, mientras que es alta en los picos de la Cordillera Cantábrica y los Pirineos, en los grandes ríos, las llanuras agrícolas, los humedales y el sudeste árido (**Fig. 6b**). El momento del máximo IVN (MMAX) fue el verano en el N y NO ibéricos y en las altas montañas, humedales y regadíos de la región mediterránea; el otoño e invierno temprano en el resto de las áreas montañosas; y la primavera en las zonas semiáridas, depresiones fluviales y llanuras continentales (**Fig. 6c**).

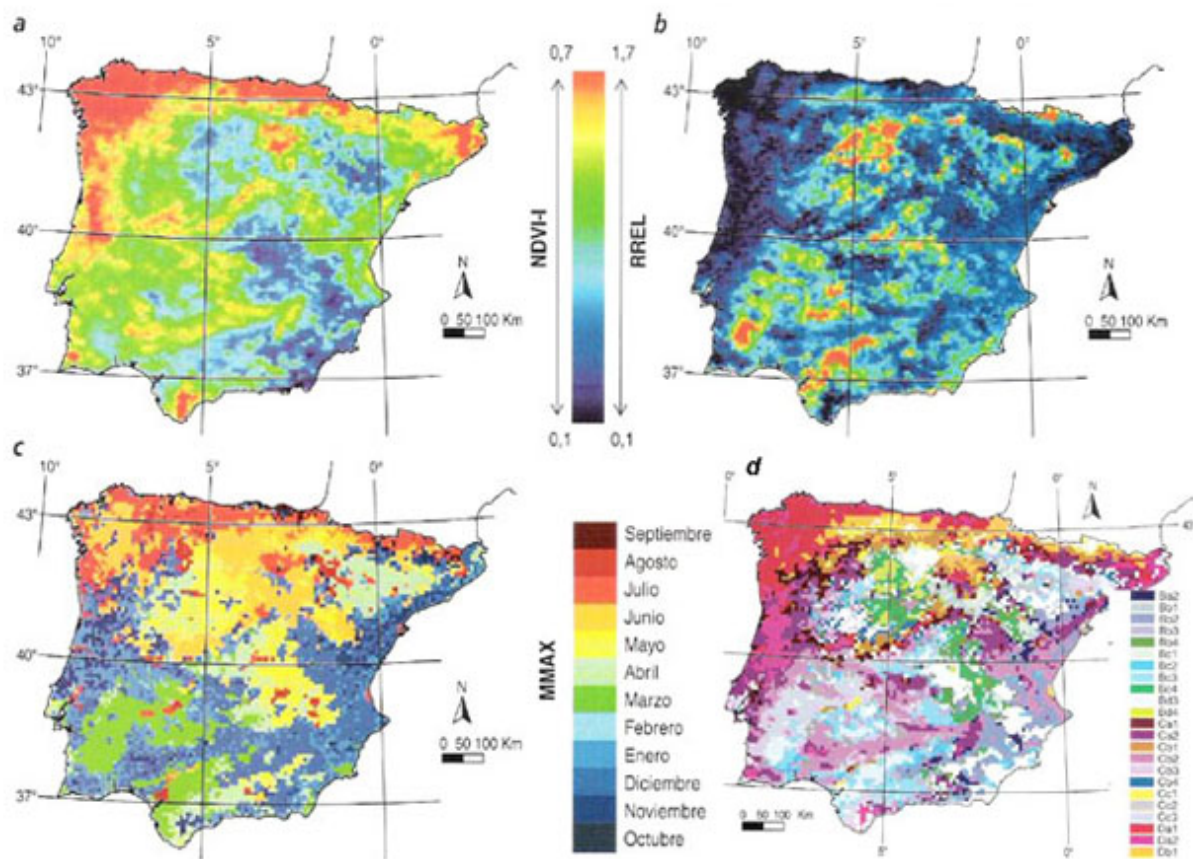


Figura 6. Patrones geográficos de los atributos funcionales derivados de la curva anual del IVN provisto por el sensor AVHRR/NOAA para el período 1982-1999 (ver Figura 5) para la Península Ibérica: **a.** Integral del IVN (NDVI-I en sus siglas en inglés), **b.** Rango relativo (RREL), **c.** mes del máximo IVN (MMAX), **d.** corresponde a los Tipos Funcionales de Ecosistemas definidos a partir de los atributos presentados en los paneles a, b y c. Los TFE mostrados suman el 90% de la Península. Cada unidad recibe un código de 3 colores. El primero, en mayúsculas, indica cuatro categorías para el NDVI-I, siendo A las unidades menos productivas y D las más productivas. La segunda letra (minúscula) representa cuatro categorías de RREL y el último carácter indica la estación del año (1 verano, 2 otoño y comienzo del invierno, 3 invierno y principios de primavera, 4 primavera). Tomado de Alcaraz-Segura et al. (2006).

La categorización de los gradientes de estas características y su combinación permitió agrupar los píxeles en unidades funcionales (TFE) que integran en un solo mapa (**Fig. 7**) todos los patrones de intercepción de radiación descritos. No se puede hablar de correspondencia total entre tipos funcionales y estructura de la vegetación: algunas áreas pertenecientes a un TFE pueden presentar distinta estructura, y otras con igual estructura pueden tener diferente dinámica y, por tanto, pertenecer a dos TFE. La correlación entre los TFE y los usos antrópicos del suelo en un 15 % del territorio ibérico pone de manifiesto el impacto humano sobre el funcionamiento ecosistémico. El bioclima resultó ser el principal control en los TFE asociados con la vegetación menos modificada por la intervención humana: el 22 % de la Península.

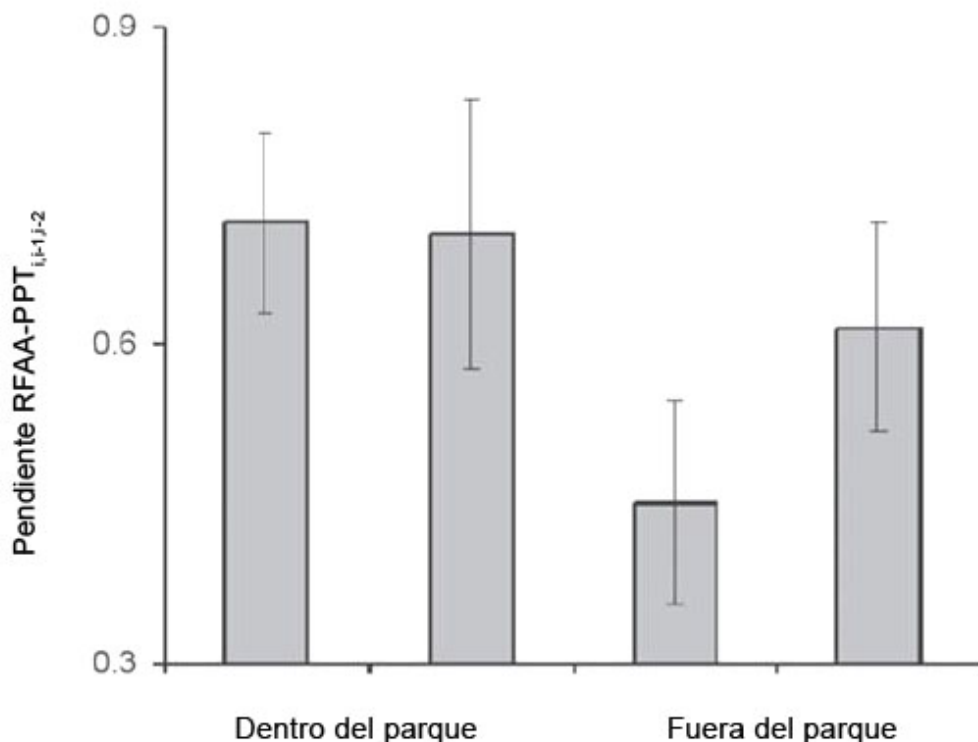


Figura 7. Pendiente de la relación entre RFAA y la precipitación de los últimos tres años (una medida de la Respuesta Marginal de la Precipitación) para áreas correspondientes a píxeles de imágenes PAL AVHRR/NOAA (resolución espacial 8x8 km) dentro y fuera del Parque Natural Cabo de Gata-Níjar (Almería, España). Las barras indica la desviación estándar de la estimación de la pendiente de la relación. Tomado de Paruelo et al. (2005).

Evaluación de la desertificación

Uno de los problemas ambientales sobresalientes de este siglo es la desertificación. De hecho, en 2006 el PNUMA dedicó el día del medio ambiente a este problema. La definición de este concepto no ha estado exenta de controversias, Glantz y Orlovsky 1983 recopilaron más de 100 definiciones de desertificación que involucran múltiples escalas de tiempo y espacio y frecuentemente sugieren interpretaciones dispares. Si bien hoy existe cierto consenso en torno a la definición de desertificación de las Naciones Unidas (1994) (Reynolds y Stafford Smith 2002) este adelanto no ha sido suficiente para eliminar la percepción de que la desertificación es un mito. La falta de una metodología que permita estimar la extensión e intensidad de la desertificación de manera objetiva junto con la utilización caprichosa de las estimaciones existentes por parte de la prensa y el ámbito científico y político (Reynolds y Stafford Smith 2002; Thomas 1997) continúan generando escepticismo en la sociedad. Verón et al. (2006) revisaron las metodologías para la estimación de la desertificación e identificaron como un particular adelanto el uso de indicadores de funcionamiento ecosistémico. La degradación de la tierra a la que hace referencia la definición de las Naciones Unidas (1994) constituye la pérdida o reducción de la productividad biológica o económica y de la complejidad de los ecosistemas. La productividad primaria neta (un atributo funcional clave de los ecosistemas) puede ser utilizada como un buen estimador de la productividad biológica ya que representa toda la energía disponible para el resto de los organismos y está muy asociada a aspectos estructurales (por ej. biomasa de herbívoros, materia orgánica del suelo, diversidad de especies) y funcionales (por ej. ciclo de los principales nutrientes o productividad secundaria) de los ecosistemas. Prince et al. (1998) y Nicholson et al. (1998) fueron de los primeros en usar variables ecosistémicas como indicadores de la desertificación. Para ello, recurrieron a la eficiencia en el uso de la precipitación (EUP), o sea el cociente entre la productividad primaria neta aérea y la precipitación anual. Este índice había sido sugerido por Le Houérou (1984) pero Prince et al. lo tornan operativo al estimar la productividad primaria mediante sensores remotos. Prince et al. (1998) argumenta que la desertificación aumenta las pérdidas por escurrimiento y evaporación en detrimento de la transpiración, lo cual reduciría la productividad primaria. Prince et al. (1998) y Nicholson et al. (1998) a partir de mediciones de EUP concluyen que no existe evidencia de una desertificación extensiva en el Sahel (África) ya que esta variable no muestra una tendencia decreciente en el tiempo.

En un estudio en la porción más árida de Europa (Almería, España), Paruelo et al. (2005) encuentran que la RFAA, estimada con el IVN calculado a partir de datos de los sensores AVHRR/NOAA, tiene una relación significativa con la suma de la precipitación de la estación de crecimiento presente y de las dos previas. Más aún cuando se comparan áreas protegidas y

no protegidas, aquellas con mayor modificación antrópica (fuera de los parques) tienen una menor sensibilidad a cambios en la precipitación que aquellas bajo protección. Estos autores proponen la pendiente de la relación entre RFAA y la precipitación (Respuesta Marginal de la Precipitación, RMP) como la base de un sistema de monitoreo del deterioro en sistemas áridos y semiáridos. Verón et al. (2006) extiende este concepto y sugiere el uso combinado de la RMP y la EUP para evaluar la desertificación. La disponibilidad de datos de precipitación y de estimaciones de productividad primaria neta o RFAA en base a sensores remotos asegura su aplicación a escala regional. Estos indicadores de desertificación, al estar basados en variables funcionales, tienen una mayor capacidad de percibir procesos de deterioro incipientes que aquellos basados en características edáficas (signos de erosión, por ejemplo), dando mayores posibilidades a acciones de remediación o restauración antes que ocurran cambios irreversibles.

Agradecimientos

Este artículo se realizó en base al aporte provisto por CONICET, FONCYT y UBA (Argentina), los proyectos FPTA-175 (INIA, Uruguay) y Sensor - TTC project grant No. 003874 (UE) y de un subsidio del Inter-American Institute for Global Change Research (IAI, CRN II 2031), el cual se financia a partir de US National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

Referencias

- Alcaraz-Segura, D., Paruelo, J.M., Cabello, J. 2006. Current distribution of ecosystem functional types in the Iberian peninsula. *Global Ecology and Biogeography* 15:200-210.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., Hatfield, J.L. 1984. Estimation absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal* 76:300-306.
- Baeza, S., Paruelo, J.M., Altesor, A. 2006. Caracterización funcional de la vegetación del Uruguay mediante el uso de sensores remotos. *Interciencia* 31:382-387.
- Baldi, G., Guerschman J.P., Paruelo J.M. 2006. Landscape fragmentation in the Río de la Plata Grasslands of Argentina. *Agricultural Ecosystems and Environment* 116:197-208.
- Baldi, G., Paruelo J.M. 2008. Land use and land cover dynamics in South American temperate grasslands. *Ecology and Society* 13: 6. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art6/>
- Baret, F., Guyot, G., Major, D.J. 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. *Photogrammetria* 43:241-256.
- Baret, F., Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35:161-173.
- Carlson, T., Capehart, W., Gillies, R. 1995. A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment* 54:161-167.
- Choudhury, B.J. 1987. Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment* 22:209-233.
- Choudhury, B.J., Ahmed, N.U., Idso, S.B., Reginato, R.J., Daughtry, C.S.T. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment* 50:1-17.
- Chuvieco, E. 2002 *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia, Barcelona, España.
- Courault, D., Seguin, B., Oliosio, A. 2003. Review to estimate evapotranspiration from remote sensing data:some examples from the simplified relationship to the use of mesoscale atmospheric models. ICID. Workshop on Remote sensing of ET for large regions. 17 Sept 2003.
- Currnan, P.J. 1983. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 309:257-270.
- Di Bella, C.M., Rebella, C.M., Paruelo, JM. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 21:791-797.

- Di Bella, C.M., Paruelo, J.M., Becerra, J.E., Bacour, C., Baret, F. 2004. Experimental and simulated evidences of the effect of senescent biomass on the estimation of fPAR from NDVI measurements on grass canopies. *International Journal of Remote Sensing* 25:5415–5427.
- Dickinson, R.E. 1995. Land processes in climate models. *Remote Sensing of Environment* 51:27-38.
- Drolet, G.G., Heumrich, K.F., Hall, F.G., Middleton, E.M., Black, T.A., Barr, A.G., Margolis, H.A. 2005. A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest. *Remote Sensing of Environment* 98:212-224.
- Fensholt, R., Sandholt, I., Rasmussen, M.S. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment* 91:490-507.
- Field, C.B., Randerson, J.T., Malmstrom, C.M. 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 51:74-88.
- Filella, I., Amaro, T., Araus, J.L., Peñuelas, J. 1996. Relationship between photosynthetic radiation-use efficiency of barley canopies and the photochemical reflectance index (PRI). *Physiologia Plantarum* 96:211-216.
- Gamon, J.A., Peñuelas, J., Field, C.B. 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment* 41:35-44.
- Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., Peñuelas, J., Valentini, R. 1995. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis, in three Californian vegetation types. *Ecological Applications* 5:28-41.
- Garbulsky, M. F., Peñuelas, J., Ourcival, J. M., 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(3):89-97.
- Glantz, M.H., Orlovsky, N.S. 1983. Desertification: a review of the concept. *Desertification Control Bulletin* 9:12-22.
- Gerberman, A.J., Cuellar, J.A., Gausman, H.W. 1984. Relationship of sorghum canopy variables to reflected infrared radiation for 2 wavelengths and 2 wavebands. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 50:209-214.
- Goward, S.N., Huemmrich, K.F. 1992. Vegetation canopy PAR absorbance and the normalize difference vegetation index: an assessment using the SAIL model. *Remote Sensing of Environment* 39:119-40.
- Gower, S.T., Kucharik, C.J., Norman, J.M. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 70:29-51.
- Grace, J., Nichol, C., Disney, M., Lewis, P., Quaife, T., Bowyer, P. 2007. Can we measure terrestrial photosynthesis from space directly, using spectral reflectance and fluorescence? *Global Change Biology* 13:1484-1497.
- Granger, R., Gray, D.M. 1990. A net radiation model for calculating daily snowmelt in open environments. *Nordic Hydrology* 21: 217–234.
- Guerschman, J.P., Paruelo, J.M., Di Bella, C.M., Giallorenzi, M.C., Pacin, F. 2003a. Land classification in the Argentine pampas using multitemporal landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing* 17:3381-3402.
- Guerschman J.P, Paruelo, J.M., Sala O.E., Burke I.C. 2003b. Land use in temperate Argentina: environmental controls and impact on ecosystem functioning. *Ecological Applications* 13:616-628
- Guo, J., Trotter, C.M. 2004. Estimating photosynthetic light-use efficiency using the photochemical reflectance index: variations among species. *Functional Plant Biology* 31:255-265.
- Hall, S.A., Paruelo, J.M. 2006. Environmental controls on lambing rate in Patagonia (Argentina): A Regional Approach. *Journal of Arid Environments* 64:713-735.
- Hicke, J.A., Asner, G.P., Randerson, J.T., Tucker, C., Los, S., Birdsey, R., Jenkins, J.C., Field, C. 2002. Trends in North American net primary productivity derived from satellite observations, 1982-1998. *Global Biogeochemical Cycles* 16:1-22.

- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83:195-213.
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25:53-70.
- Inoue, Y., Peñuelas, J. 2006. Relationship between light use efficiency and photochemical reflectance index in soybean leaves as affected by soil water content. *International Journal of Remote Sensing* 27:5109-5114
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., Idso, S.B. 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research* 13:651-656
- Kaufman, Y.J., Tanre, D. 1992. A Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. En: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium A92*, pp: 261-270, IEEE, New York, USA.
- Kerr, J.T., Ostrovsky, M. 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution* 18:299-305.
- Le Houérou, H.N. 1984. Rain use-efficiency: a unifying concept in arid-land ecology. *Journal of Arid Environments* 7:213-247.
- Liang, S. 2000. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo. I Algorithms. *Remote Sensing of Environment* 76:213-238.
- Lillesand, T. M., Kieffer, R.W. 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Los, S.O., Pollack, N.H., Parris, M.T., Collatz, G.J., Tucker, C.J., Sellers, P.J., Malmstrom, C.M., DeFries R.S., Bounoua, L., Dazlich, D.A. 2000. A global 9-yr biophysical land surface dataset from NOAA AVHRR data. *Journal of Hydrometeorology* 1:183-199.
- Ludeke, M.K.B., Ramage, P.H., Kohlmaier, G.H. 1996. The use of satellite NDVI data for the validation of global vegetation phenology models: application to the Frankfurt Biosphere Model. *Ecological Modelling* 91:255-270
- Milchunas, D.G., Lauenroth, W.K. 1995. Inertia in plant community structure: state changes after cessation of nutrient enrichment stress. *Ecological Applications* 5:1995-2005.
- Millennium Ecosystem Assessment Series. 2003. *Ecosystems and Human Well-Being. A Framework for Assessment*. 212p. Island Press. Washington DC, USA
- Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 9:747-66.
- Moreau, S., Bosseno, R., Gu, X.F., Baret, F. 2003. Assessing the biomass dynamics of Andean bofedal and totora high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR. *Remote Sensing of Environment* 85:516-29.
- Myneni, R.B., Hall, F.G., Sellers, P.J., Marshak, A.L. 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33:481-486.
- Naciones Unidas. 1994. UN Earth Summit. Convention on Desertification. *UN Conference in Environment and Development*, Rio de Janeiro, Brazil, June 3-14, 1992. DPI/SD/1576. United Nations, New York. USA.
- Nakaji, T., Ide, R., Oguma, H., Saigusa, N., Fujinuma, Y. 2007. Utility of spectral vegetation index for estimation of gross CO₂ flux under varied sky conditions. *Remote Sensing of Environment* 109:274-284
- Nemani, R.R., Keeling C.D., Hashimoto H., Jolly W.M., Piper S.C., Tucker C.J., Myneni R.B., Running S.W. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science* 300:1560-1563.
- Nichol, C.J., Rascher, U., Matsubara, S., Osmond, B. 2006. Assessing photosynthetic efficiency in an experimental mangrove canopy using remote sensing and chlorophyll fluorescence. *Trees* 20:9-15
- Nicholson, S.E., Tucker, C.J., Ba, M.B. 1998. Desertification, drought and surface vegetation: an example from the West

African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79:815-829.

Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Paruelo, J.M. 2005. Land use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology* 11:1-17

Nouvellon, Y., Lo Seen, D., Rambal, S., Bégué, A., Moran, M.S., Kerr, Y., Qi, J. 2000. Time course of radiation use efficiency in a shortgrass ecosystem: consequences for remotely sensed estimation of primary production. *Remote Sensing of Environment* 71:43-55.

Oesterheld, M., Di Bella, C. M., Kerdiles, H. 1998. Relation between NOAAVHRR satellite data and stocking rate in grasslands. *Ecological Applications* 8:206-212.

Paruelo, J.M., Epstein, H. E., Lauenroth, W.K., Burke, I.C. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the US. *Ecology* 78:953-958.

Paruelo, J.M., Lauenroth, W.K. 1998. Interannual variability of NDVI and their relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography* 25:721-733.

Paruelo, J.M., Jobbágy, E.G., Sala O.E. 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems* 4:683-698.

Paruelo, J.M., Garbulsky, M.F., Guerschman, J.P., Jobbágy, E.G. 2004. Two decades of NDVI in South America: identifying the imprint of global changes. *International Journal of Remote Sensing* 25:2793-2806.

Paruelo, J.M., Piñeiro, G., Oyonarte, C., Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Escribano, P. 2005. Temporal and spatial patterns of ecosystem functioning in protected arid areas of Southeastern Spain. *Applied Vegetation Science* 8:93-102.

Pennington, W. 1986. Lags in adjustment of vegetation to climate caused by the pace of soil development: evidence from Britain. *Vegetatio* 67:105-118.

Peñuelas, J., Fillela, I., Gamon, J. 1995. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytologist* 131:291-296.

Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J., Stenseth, N.C. 2005. Using the satellite-derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess ecological effects of environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* 20:503-510.

Pinty, B., Verstraete, M.M. 1992. GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites, *Vegetatio* 101:15-20.

Piñeiro, G., Oesterheld, M., Paruelo, J.M. 2006. Seasonal variation in aboveground production and radiation use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems* 9:357-373.

Posse, G., Cingolani, A.M. 2000. Environmental controls on NDVI and sheep production in the Tierra del Fuego steppe of Argentina. *Applied Vegetation Science* 3:253-260.

Posse, G., Cingolani, A.M. 2004. A test of the use of NDVI data to predict secondary productivity. *Applied Vegetation Science* 7:201-208.

Potter, C.S., Randerson, J.T., Field, C.B., Matson, P.A., Vitousek, P.M., Mooney, H.A., 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. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 12:1313-1330.

Prince, S.D., Brown de Colstoun, E., Kravitz, L.L. 1998. Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology* 4:359-374.

Reed, B.C., Brown, I.F., VanderZee, D., Loveland, T.R., Merchant, I.W., Ohlen, D.O. 1994. Variability of land cover phenology in the United States. *Journal of Vegetation Science* 5: 703- 714

- Reynolds, J.F., Stafford Smith, D.M. 2002. *Global Desertification: Do Humans Cause deserts?* vol. 88. Dahlem University Press, Berlin, Germany.
- Richardson, A.J., Wiegand C.L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 43:1541-1552.
- Ridao, E., Conde, J., Minués, I. 1998. Estimating fAPAR from nine vegetation indices for irrigated and nonirrigated faba bean and semileafless pea canopies. *Remote Sensing of Environment* 66:87-100.
- Ripple, W. J. 1985. Asymptotic reflectance characteristics of grass vegetation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 43:1915-1921.
- Rouse, J.W., Haas, Jr. R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 93p. (NTIS No. E73-106393).
- Ruimy, A., Saugier, B., Dedieu, G. 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research* 99:5263-83.
- Running, S.W., Thornton, P.E., Nemani, R.R., Glassy, J.M. 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System. En: Sala, O.E., Jackson, R.B., Mooney, H.A., Howarth, R.W. (Eds.) *Methods in ecosystem science*, pp. 44-57. Springer-Verlag, New York, USA.
- Russell, M., Nunez, M., Chladil, M., Valiente, J., Lopez-Baeza, E. 1997. Conversion of nadir, narrowband reflectance in red and nearinfrared channels to hemispherical surface albedo. *Remote Sensing of the Environment* 61:16-23.
- Sala, O.E., Jackson, R.B., Mooney, H.A., Howarth, R.W. 2000. *Methods in Ecosystem Science*. Springer Verlag, New York, USA.
- Sellers, P.J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. *International Journal of Remote Sensing* 6:1335-1372.
- Sellers, P.J., Berry, J.A., Collatz, G.J., Field, C.B., Hall, F.G. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing of Environment* 42:187-216.
- Sellers, P.J., Tucker, C.J., Collatz, G.J., Los, S.O., Justice, C.O., Dazlich, D.A., Randall, D.A. 1994. A global 1o by 1o NDVI data set for climate studies. Part 2. The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing* 15:3519-3545.
- Soriano, A., Paruelo, J.M. 1992. Biozones: Vegetation units of functional character identifiable with the aid of satellite images. *Global Ecology and Biogeography Letters* 2:82-89.
- Stroeve, J., Nolin, A., Steffen, K. 1997. Comparison of AVHRR-derived and in-situ surface albedo over the Greenland ice sheet. *Remote Sensing of the Environment* 62:262-276.
- Thomas, D.S.G. 1997. Science and the desertification debate. *Journal of Arid Environments* 37:599-608.
- Tucker, C. J. 1977. Resolution of grass canopy biomass classes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 43:1059-1067.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8:127-150.
- Tucker, C.J., Townshend, J.R., Goff, T.E. 1985. African land-cover classification using satellite data. *Science* 227:369-375.
- Veron, S.R., Paruelo, J.M., Oesterheld M. 2006. Assessing desertification. *Journal of Arid Environments* 66:751-763.
- Virginia, R.A., Wall, D.H. 2001. Principles of ecosystem function. En: Levin, S. (Ed.) *Encyclopedia of Biodiversity*, pp: 345-352. Elsevier, The Netherlands.

Wessman, C. 1992. Spatial scales and global change: bridging the gap from plots to GCM grid cells. *Annual Review of Ecology and Systematic* 23:175-200.

Yebra, M., Chuvieco, E. 2008. Modelos de simulación de reflectividad en ecología: potencialidades y problemas. *Ecosistemas* 17(3):23-38