

Estudio del NDVI mediante análisis multiescalar y series temporales utilizando imágenes SPOT, durante el período 1998-2012 en el Uruguay

Ceroni, M.^{1*}, Achkar, M.², Gazzano, I.³, Burgeño, J.⁴

¹ Centro Interdisciplinario Respuesta al Cambio y la Variabilidad Climática, Espacio Interdisciplinario, Universidad de la República, José E. Rodó 1843, Montevideo, Uruguay.

² Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Iguá 4225, Montevideo, Uruguay.

³ Departamento de Sistemas Ambientales, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Garzón 780, Montevideo, Uruguay.

⁴ Unidad de Estadística y Biométrica, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, Km 45 carretera México-Veracruz, Estado de México, México.

Resumen: Los índices de vegetación suponen una de las principales fuentes de información para el monitoreo y espacialización de la vegetación a distintas escalas, siendo el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) uno de los más utilizados. Este trabajo pretende describir y analizar la tendencia del NDVI en los sistemas ambientales de Uruguay, como una variable síntesis del comportamiento del sistema ambiental. Se aplicó un análisis multiescalar (país, cuenca, sitios), mediante la utilización del análisis de series temporales, siendo las imágenes SPOT 4 y 5, a través del programa del instrumento *Vegetation* (VGT) la fuente de información. Las series temporales analizadas mostraron un ajuste significativo del modelo de *Autocorrelación Integrado de Medias Móviles* (ARIMA), siguiendo una autocorrelación de orden 2, con nivel de integración de orden 1, ARIMA (211). Se observó una tendencia significativa a la baja del NDVI para el total de las unidades espaciales, siendo las unidades agrícolas (escala sitio) las que presentaron mayor tendencia a la baja. El desarrollo del estudio permitió construir una base de datos sin antecedentes en Uruguay, junto con la elaboración de una metodología precisa y robusta para el análisis espacio-temporal del NDVI. Se demuestra que la teledetección es una herramienta útil para la mejorar de la gestión de los sistemas ambientales.

Palabras clave: NDVI, series temporales, SPOT, enfoque multiescalar, percepción remota.

Study of the NDVI with multi-scale and time-series analysis using SPOT imagery during the period 1998-2012 in Uruguay

Abstract: Vegetation indices are a relevant source of information for spatial monitoring of vegetation at multiple scales. Among them, the *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) is one of the most commonly used. This study aims to describe and analyze the spatial patterns of the NDVI in terrestrial systems in Uruguay at the onset of the 21st Century. A multiscale approach (country, basin and sites) was applied using time series analysis of NDVI values obtained from SPOT 4 and 5 images through the program Instrument *Vegetation* (VGT). The analyzed time series showed a significant fit of the *Autocorrelated Integrated Moving Averages* (ARIMA) model, with an autocorrelation of order 2

* Autor para la correspondencia: mceroni@ei.udelar.edu.uy

and a level of integration of order 1, ARIMA (211). A significant decline of the NDVI over all spatial units was found, with agricultural units (site scale) showing the most negative slope. This study provides baseline data on changes in vegetation productivity for Uruguay, and develops an accurate and robust methodology for spatio-temporal analysis of NDVI series. Remote sensing techniques are shown to be relevant to improve the management of environmental systems.

Key words: NDVI, time series, SPOT, multi-scalar approach, remote sensing.

1. Introducción

Los territorios de la cuenca del Río de la Plata vienen atravesando una serie de transformaciones de la cobertura vegetal durante las últimas décadas, impulsadas por un fuerte proceso de intensificación agraria (IAI, 2011). Este proceso afecta al comportamiento y la dinámica espacio-temporal de la vegetación, alterando i) el clima, ii) el uso de la tierra, iii) la biodiversidad, iv) los ciclos biogeoquímicos (Vitousek, et al., 1997; Chapin, et al., 2000; Norris, et al., 2003; Hooper, et al., 2005). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección constituyen herramientas fundamentales que permiten evaluar estos cambios (Guerschman, et al., 2002; Seyler, et al., 2002; C. Zhang, et al., 2007).

Durante los últimos años existe un aumento sostenido en la utilización de imágenes satelitales de baja resolución para el monitoreo de la variación anual de la vegetación en escalas pequeñas de análisis. Las bajas resoluciones espaciales son contrarrestadas por altas resoluciones temporales (Carreras, et al., 2002; Guissard, et al., 2004; Tarnavsky, et al., 2008). La evolución y el comportamiento de la productividad primaria, asociados al desarrollo de diversas técnicas que buscan la medición temporal y espacial de la vegetación, suponen un desafío constante en la investigación a partir de técnicas de teledetección (Moulin, et al., 2003; Chiesi, et al., 2005).

En este contexto, los índices de vegetación se han convertido en las principales fuentes de información para el monitoreo y espacialización de la vegetación y sus variaciones. El más utilizado es el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), siendo el resultado de la aplicación de operaciones de álgebra de imágenes entre dos bandas espectrales (rojo e infrarrojo cercano). Este índice es un indicador directo de la cantidad de biomasa verde fotosintéticamente activa (Tucker y Sellers, 1986) y se encuentra fuertemente correlacionada con la

productividad primaria neta aérea (Prince, 1991; Paruelo, et al., 1997). El NDVI ha sido ampliamente utilizado a diversas escalas: locales (INIA-GRAS, 1999), regionales (Paruelo, et al., 2004), continentales y globales (Zhao y Running, 2010). El estudio de la vegetación con imágenes de alta y baja resolución, permite realizar cartografía de la distribución espacial y temporal, con altos niveles de precisión (Xiao, et al., 2002; Cihlar, et al., 2003). Esta metodología de trabajo permite interpretar la heterogeneidad espacial de la información contenida en las imágenes de NDVI (Chirici, et al., 2007).

El *Instrument Vegetation* (VGT) es un producto generado por la combinación de imágenes del satélite SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) del Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia y Bélgica en cooperación con la Agencia Espacial Europea. El sistema SPOT registra información en cuatro bandas espectrales (azul, rojo, IR cercano e IR medio) y permite disponer de imágenes diarias de 1000 metros de resolución espacial para casi la totalidad de la superficie terrestre del planeta. El instrumento VGT fue creado para ofrecer una fuente de información permanente para el monitoreo de la vegetación a nivel global y continental (GMES, 1998), a nivel regional (Carreras, et al., 2002; Telesca y Lasaponara, 2006) y a nivel nacional (Kinyanjui, 2011).

La expresión del NDVI se puede visualizar y analizar a distintas escalas espacio-temporales (Simic et al., 2004) siendo de gran utilidad para la identificación de tendencias en distintos territorios. La escala refiere a las dimensiones físicas de los fenómenos y las entidades observables que ocurren en un espacio y tiempo determinado (O'neill y King, 1998), en el marco de la interacción permanente entre sociedad y naturaleza. Un mismo fenómeno o proceso, al estar regulado por mecanismos distintos, puede generar patrones a distintas escalas espaciales (Wiens, 1989; Levin, 1992).

En este sentido, para el análisis espacial se va a utilizar la multiescalaridad, entendida como la conjunción de diferentes escalas espaciales, siendo un enfoque epistemológico distinto al análisis de las escalas por separado, y permite analizar la multidimensionalidad de los objetos en estudio (Funtowicz y Ravetz, 1991; Font, 2000). Para el análisis temporal se aplicarán análisis estadísticos de series temporales para identificar la evolución y tendencia del NDVI (Xiaoliang, *et al.*, 2007) utilizando modelos ARIMA (Jiménez, *et al.*, 2006).

2. Metodología

2.1. Unidades espaciales

En el desarrollo del trabajo se abarcan tres escalas espaciales: la escala país, la escala cuenca hidrográfica y la escala sitios. La escala país abarca la mayor superficie de las tres (176.215 km²), y se refiere a la totalidad del territorio de Uruguay. Esta escala de análisis está asociada directamente

a las decisiones de las políticas institucionales del Estado, que generan transformaciones en la orientación de la dinámica territorial del sector agropecuario en el Uruguay (García Préchac, *et al.*, 2010) y afectan a las dimensiones sociales, culturales, económicas y biofísicas de los territorios agrarios. Las diversas interacciones que se generan en los territorios agrarios producen un impacto en el comportamiento de la productividad primaria neta.

La segunda escala se refiere a la cuenca hidrográfica, siendo seleccionada la cuenca del arroyo Tomás Cuadra (Figura 1a y 1b). Esta unidad abarca una superficie de 1043 km², se localiza en el centro del país, íntegramente en el departamento de Durazno. Se refiere a una unidad de carácter natural que integra diversos procesos biofísicos, principalmente los relacionados con la dinámica del agua. La cuenca se localiza en un área de frontera agrícola que sufre transformaciones en la cobertura del suelo de manera acelerada, principalmente durante los últimos 10 años, pasando de

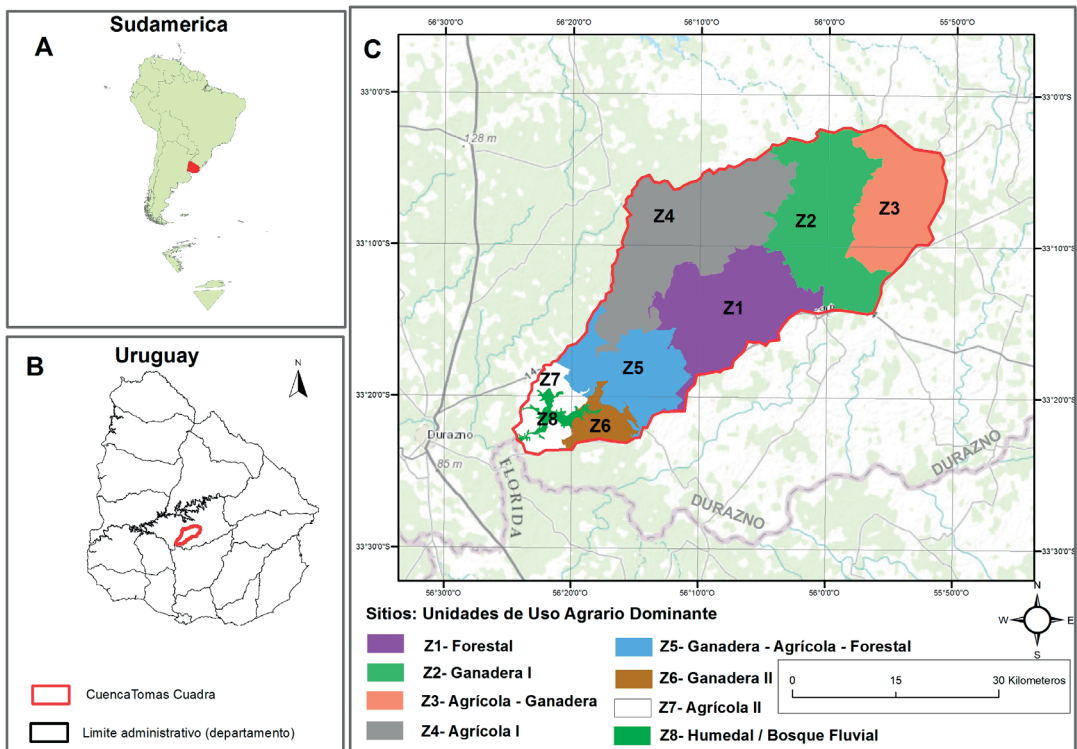


Figura 1. Localización del área de estudio A: Ubicación de Uruguay en relación a Sudamérica. B: Cuenca de Tomas Cuadra en relación a Uruguay. C: Unidades de uso agrario dominante. Para la interpretación de los colores consultar edición digital, <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3683>.

una superficie del 78,0% de pastizal destinado a la ganadería en el año 2000, al 51,9% para el año 2011. Este decrecimiento es producto del aumento de superficie agrícola y forestal. Actualmente, los usos de suelo se distribuyen espacialmente de la siguiente manera: 45% ganadería extensiva, 35% agrícola extensiva, 15% forestal y 5% bosque fluvial y humedal.

La tercera unidad de análisis corresponde a la escala sitio, que está integrada por unidades espaciales en función del uso agrario dominante. Las unidades están determinadas por la vegetación dominante, asociada a los atributos edáficos y geomorfológicos y configurando cierta uniformidad en la misma (Gasto, *et al.*, 1987). La cuenca del arroyo Tomas Cuadra está dividida en estas unidades en base a atributos biofísicos, siendo de menor tamaño que las escalas anteriores y de menor complejidad. Presentan la característica de ser unidades relativamente homogéneas en sus atributos de uso, más de un 70% de la unidad es ocupado por el uso productivo que la define. La elaboración fue basada en una clasificación de usos de suelo elaborada mediante imágenes Landsat 5 TM. De esta manera, se elaboró cartografía de la distribución espacial y temporal de la cobertura vegetal con altos niveles de precisión (Cihlar, *et al.*, 2003). A los efectos de minimizar errores en la clasificación, se analizan zafras de cultivos y cosechas opuestas, realizando un ajuste con salidas a terreno. Los atributos estructurales utilizados fueron edafología, geología y topografía. Se consideró la información elaborada por la Comisión Nacional de Estudio Agronómico de la Tierra (CONEAT) del año 1979 para la información edafológica. Para la información geológica, se utilizó la Carta Geológica a escala 1:500.000 (Preciozzi, *et al.*, 1985). Para el caso de la topografía, se elaboró un Modelo Digital del Terreno (MDT) con resolución de 30 m/píxel a partir del satélite Aster-NASA (D'Ozouville, *et al.*, 2008; Rödelberger, *et al.*, 2010). Las unidades de uso agrario dominante se realizaron en base a la integración espacial de las variables estructurales mencionadas anteriormente y de variables de uso del suelo, utilizando cuatro clases básicas (ganadería, agricultura, forestación y bosque-humedal) y sus combinaciones. Sobre la base de la distribución espacial de cada variable se identificaron, de forma cualitativa, patrones de uniformidad de los atributos, seleccionando el mejor ajuste espacial. Este procedimiento se elaboró

en base a la integración de la información en un Sistema de Información Geográfica para la cuenca. Utilizando esta metodología se identificaron 8 unidades de uso agrario dominante (Figura 1c).

2.2. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

El NDVI es un índice de vegetación que combina las bandas electromagnéticas del rojo y del Infrarrojo y se define como (Carlson y Ripley, 1997):

$$NDVI \equiv [(IR - R) \div (IR + R)] \quad (1)$$

donde *IR*: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie en la banda del infrarrojo cercano del espectro electromagnético, *R*: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie de la banda del rojo del espectro electromagnético.

Las imágenes del sistema SPOT-VGT están disponibles en la web a través de la plataforma de VITO (www.spot-vegetation.com) a partir de 1/4/1998. Para cumplir un ciclo completo de 14 años se obtuvieron imágenes síntesis cada 10 días (VGTS 10) mediante el método del máximo valor (Holben, 1986) desde el 1 de abril de 1998 hasta el 31 de marzo de 2012, 504 imágenes en total. Las imágenes síntesis obtenidas presentan su corrección radiométrica en todos los píxeles, basada en una función lineal que relaciona los valores de la imagen con los valores TOA (*top of atmosphere*), presentando un desplazamiento nulo en TOA (www.spot-vegetation.com). Estas imágenes presentan una resolución radiométrica de 8 bits, en donde los valores digitales originales (DN) se presentan en una escala de grises que varía entre 0 a 255. Se realizó una transformación de estos valores DN a valores de NDVI mediante una función lineal (fórmula 2) elaborada por el equipo técnico de SPOT. Finalmente, se aplicó el producto *Status Map* (SM) para filtrar los datos de NDVI con valores fuera del rango del NDVI (<0; >1).

$$NDVI \equiv [(a * DN) + (b)] \quad (2)$$

donde: $a = 0,004$ y $b = -0,1$

2.3. Construcción de la base de datos

La elaboración de las bases de datos consistió, en primer lugar, en la corrección geométrica de cada imagen. Este procedimiento se basa en transformar la imagen del sistema de referencia espacial original, a una imagen con sistema de referencia espacial acorde al área de estudio, considerándose en este caso el datum WGS84 bajo el sistema de proyección *Universal Transversa Mercator* (UTM) zona 21 sur. Para ello, se elaboró una máscara (600×600 píxeles) de dimensiones regulares, sobre la cual se realizó un grillado de 50×50 píxeles. Posteriormente, se identificaron diferentes puntos de control en el conjunto de la imagen, estableciéndose relaciones geométricas entre las imágenes. Esta georreferenciación se estableció mediante un ajuste de un polinomio de segundo grado (Campbell, 1996; Chuvieco, 2000) con un error medio cuadrático de 7 m. Este procedimiento no contó con normalizaciones de ajuste topográfico debido a la baja topografía que presenta el área de estudio (Riaño *et al.*, 2003).

En segundo lugar, todas las imágenes se transformaron de formato raster a vectorial. Dicha transformación es un paso intermedio para obtener una matriz única de datos donde en las filas se ubican los valores de los píxeles y en las columnas los valores de NDVI correspondientes a cada una de las fechas de la serie temporal. La construcción de esta matriz de datos (formato dbf) presenta dos grandes ventajas: la posibilidad de ampliación de la serie temporal de forma permanente y la facilidad de interfase entre programas de análisis estadístico y programas de análisis espacial. Además, de esta forma se minimizan las dificultades de construir un patrón de análisis (Zapata *et al.*, 2012) que permita complementar atributos de capas raster con atributos de capas vectoriales.

Seguidamente se compiló toda la base de datos, obteniendo 214.871 valores para cada imagen. La dimensión total de la matriz de datos (504×214.871) se redujo a nivel mensual, pasando a una matriz de 168×214.871. Finalmente, se seleccionaron los datos de la cuenca y de las unidades de uso agrario dominante para el análisis del comportamiento temporal.

2.4. Análisis estadístico de series temporales

El instrumento de análisis estadístico utilizado para reproducir el comportamiento de la variable a lo largo del tiempo, fue mediante el análisis de series temporales. La aplicación de estos métodos permite, por un lado, descubrir el comportamiento de la estructura de los datos observados y, por otro, ajustar modelos y realizar pronósticos sobre las variables analizadas (Jiménez *et al.*, 2006).

Para este trabajo se utiliza al enfoque Box-Jenkins como el mejor ajuste al comportamiento del modelado de la serie, ya que se considera que los datos tienen un comportamiento estocástico. Se entiende por proceso estocástico a una familia de variables aleatorias que, en general, están relacionadas entre sí y siguen una ley de distribución conjunta (González y Román, 2009). Dentro de este enfoque se trabajó con el modelo de *Autocorrelación Integrado de Medias Móviles* (ARIMA) (González y Román, 2009) para poder modelar la serie y posteriormente realizar los cálculos de la tendencia.

El procedimiento consistió en varias etapas: en primer lugar se elaboró la curva del gráfico de los datos originales para tener una primera aproximación del comportamiento de la serie original. Esto permite identificar si a priori la serie presenta una distribución cíclica, con tendencia pronunciada o con estacionalidad. Posteriormente, se obtuvo la distribución de los residuos para analizar la estacionalidad según la media y la varianza, lo que permite eliminar la tendencia determinística existente e identificar la variabilidad de los datos en relación a la media. En esta etapa se aplicó el test Dickey-Fuller (*Test DF*) para verificar si la serie de datos sigue un comportamiento aleatorio no estacionario o alternativamente un proceso autorregresivo estacionario. Tras identificar la estacionalidad, se analizó la serie mediante la autocorrelación simple y parcial para identificar los retardos de los datos y cómo el valor (n-1) puede estar afectando al valor (n) o (n+1). Finalmente, para asegurar la validez del modelo, se realizó la autocorrelación parcial de los residuos de los datos modelados, observándose si más del 90% de los valores se encuentran dentro del rango de confianza del 95%. Después de la validación del modelo se ajustó el comportamiento de la tendencia utilizando el modelo de regresión lineal generalizado, calculando: el

coeficiente angular (a), el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de regresión (r) con su correspondiente significación.

Para poder identificar la distribución espacial de la tendencia de la cuenca se aplicó el modelo ARIMA para cada uno de los píxeles, obteniendo un mapa de tendencia del NDVI para el período temporal analizado.

2.5. Integración multiescalar

El análisis de tendencias se utiliza como un parámetro estadístico del comportamiento de la productividad primaria neta aérea, ya que permite la comparación directa de las diferentes escalas espaciales y, a su vez, ayuda a entender cómo evoluciona temporalmente la productividad. En definitiva, sintetiza la lectura de la evolución de los datos del NDVI.

3. Resultados y discusión

Para tener una primera aproximación del comportamiento del NDVI para los 14 años considerados se generaron gráficos de la evolución del NDVI

a lo largo de cada año para todas las unidades espaciales analizadas (Figura 2). Lo primero que se observa en la figura 2 es que existen dos años (1999 y 2009) donde el NDVI presenta valores bajos y, a partir del año 2001, se registra un incremento sostenido. Si bien no se ha realizado un análisis estadístico causal de por qué existe una disminución sensible en esos años, varios estudios (Fang et al., 2001; Mohamed et al., 2004; Zhang et al., 2011) afirman que existe una relación estadística positiva entre el NDVI y la precipitación. En este sentido se puede afirmar que la disminución del NDVI coincide con dos sequías importantes que se registraron en el país, y el incremento del NDVI con un aumento por encima de la media de la precipitación.

La figura 3 sintetiza los comportamientos más diferenciados. En ella se evidencia que la unidad forestal (Z1) presenta valores de NDVI más elevados que el resto de las unidades, debido a la mayor cantidad de biomasa fotosintéticamente activa que existe en las plantaciones forestales artificiales (eucaliptos y pinos). La unidad humedal/bosque fluvial (Z8) presenta los valores más bajos producto de ser una unidad natural donde su vegetación

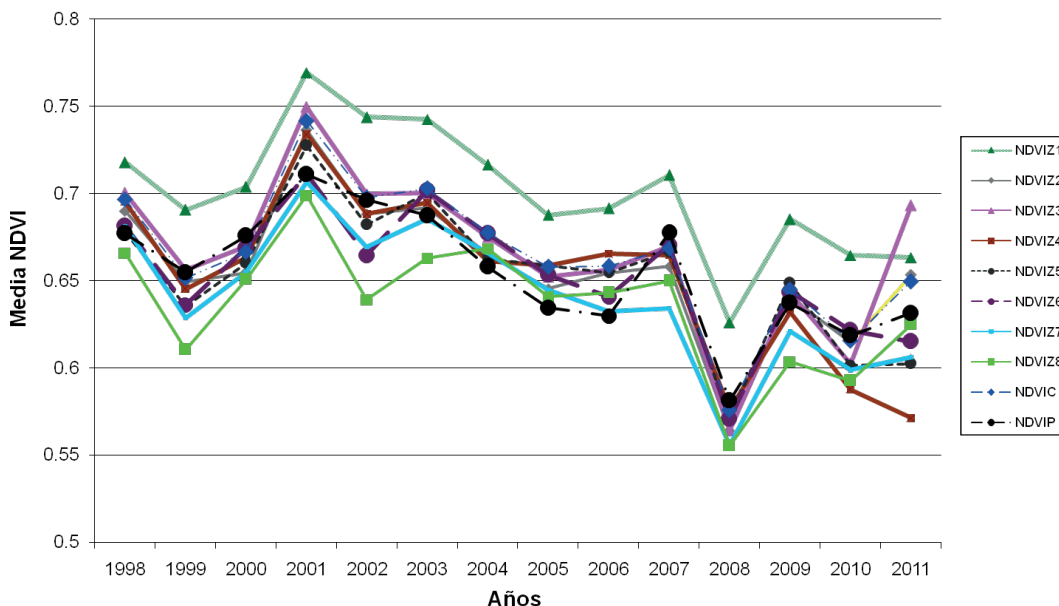


Figura 2. Distribución de la media anual de la serie temporal del NDVI para cada una de las unidades espaciales, para el período abril 1998-marzo 2012. Para la interpretación de los colores consultar edición digital, <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3683>

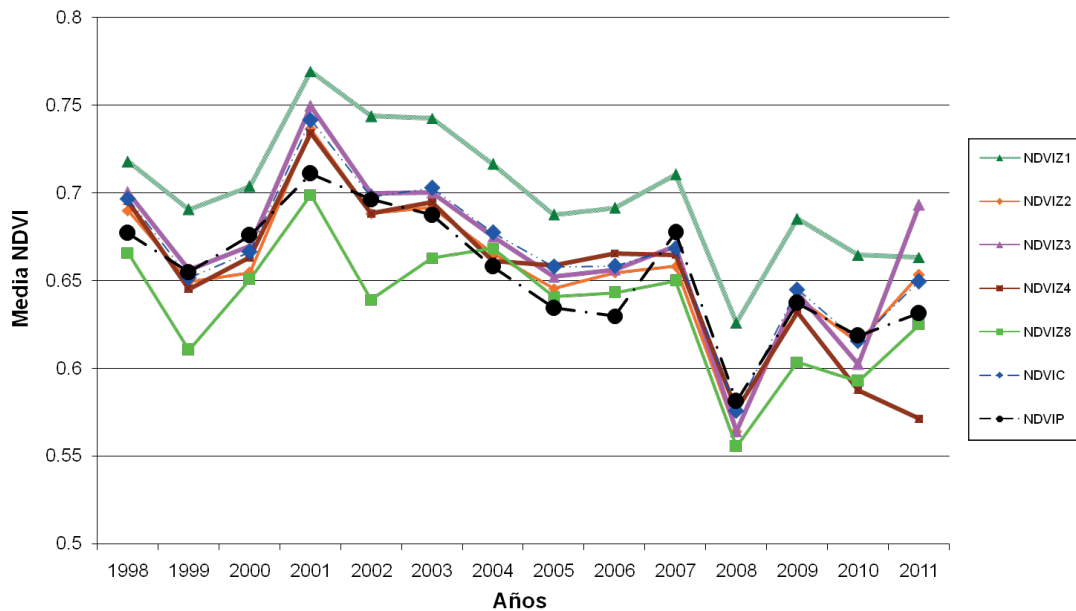


Figura 3. Distribución de la media anual de la serie temporal del NDVI para las unidades espaciales (escala país, escala cuenca, escala sitio (Z1, Z2, Z3, Z4, Z8)) para el período abril 1998-marzo 2012. Para la interpretación de los colores consultar edición digital, <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3683>.

es constante durante todo el año, no sufriendo grandes variaciones y buscando equilibrios entre los excesos de nutrientes que pueda recibir de la cuenca y los déficits de agua durante las sequías. Las restantes unidades espaciales presentan un comportamiento similar durante el período, diferenciándose el último año, donde la unidad agrícola-ganadera (Z3) presenta un incremento elevado en relación al resto de las unidades. Esta unidad presentó un cambio de uso de suelo de pastizal a agricultura, lo que conduce a un aumento de la mineralización de la materia orgánica del suelo durante los primeros años del cultivo (Santos y Camargo, 1999), generando un incremento de la productividad agronómica (Deng *et al.*, 2006; Yan *et al.*, 2009).

El modelo utilizado para el análisis de las series temporales del NDVI fue ARIMA (2,1,1), lo que establece una autocorrelación de orden 2, con un nivel integración de orden 1 y una media móvil de orden 1. En la figura 4 se observa la distribución temporal del NDVI mensual promedio de la totalidad de los píxeles para cada una de las unidades

espaciales analizadas, integrando los datos originales (puntos rojos) y la línea del modelo ARIMA (azul). Además de la distribución de la serie se trazó el modelo de tendencia lineal general (MLG) con sus correspondientes coeficientes. Estos resultados proporcionan una fuerte evidencia de que se registra una tendencia general a la baja del NDVI, concordante con las tendencias encontradas para la región pampeana (Zhao y Running, 2010; Samanta *et al.*, 2011; Barbosa *et al.*, 2013).

El análisis multiescalar permite un avance en la interpretación de las tendencias identificadas en las distintas escalas. Los procesos y decisiones que se toman en las distintas escalas influyen en las manifestaciones del territorio. Así, las escalas consideradas no generan unidades espaciales de comportamiento y, por lo tanto, de análisis, independientes. En especial, las políticas agrarias a escala nacional asociadas a la producción global de materias primas (*commodities*) en función del mercado internacional, influyen en las decisiones prediales que toman los productores. Estas decisiones individuales tienen una expresión particular

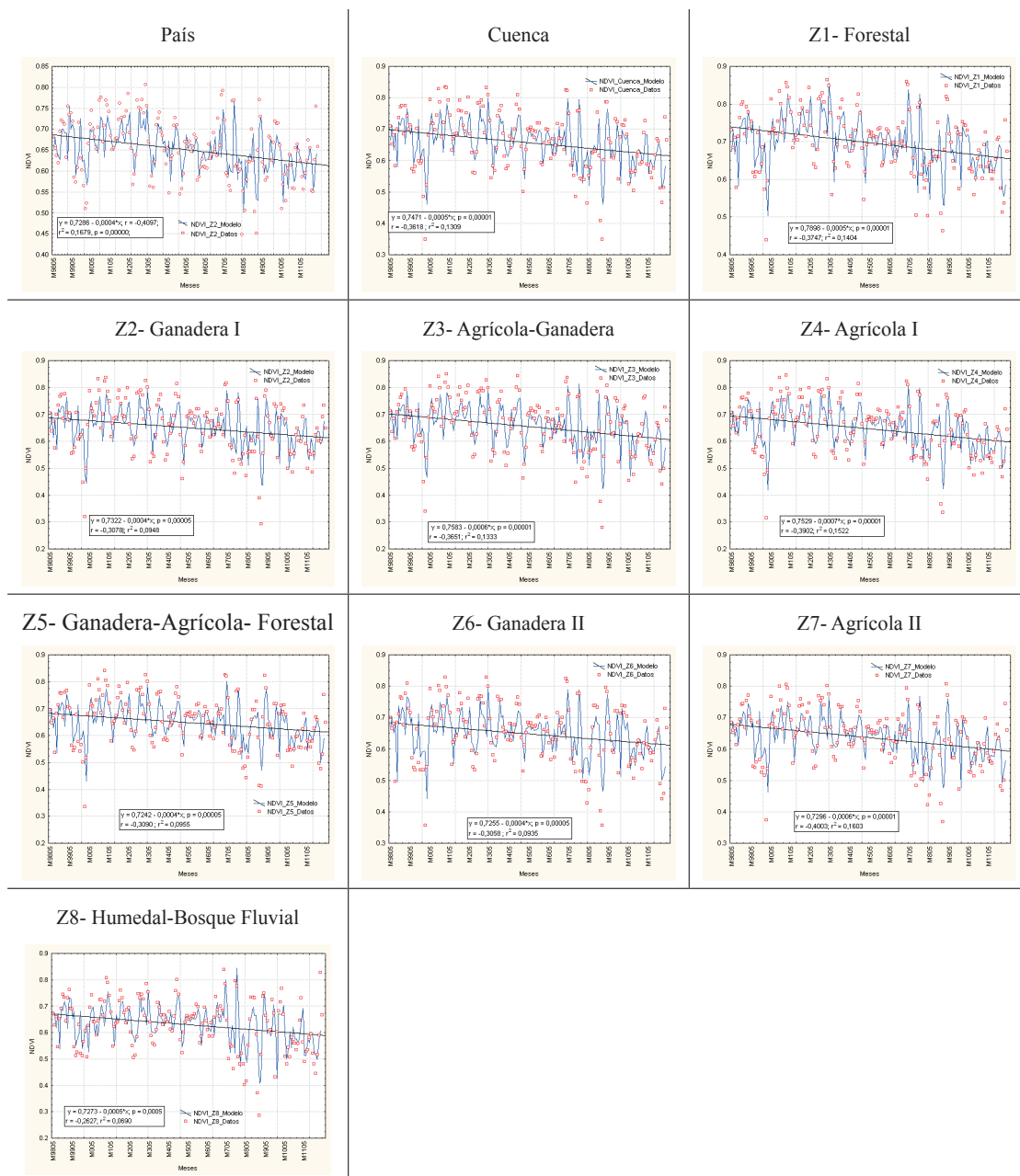


Figura 4. Evolución mensual del NDVI asociado al modelo ARIMA (2,1,1) para el período abril 1998-marzo 2012 correspondiente a cada una de las unidades espaciales consideradas. Para la interpretación de los colores consultar edición digital, <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3683>

en el funcionamiento de la cuenca. En la figura 4 es posible identificar tres grupos de comportamiento del NDVI: a) las unidades agrícolas (Z4, Z7) con el mayor descenso; b) la cuenca, la unidad forestal (Z1), la unidad agrícola-ganadera (Z3) y el humedal (Z8), en situación media y c) el país, la

unidad agrícola-ganadera-forestal (Z5) y las unidades ganaderas (Z2, Z6) con la menor disminución del NDVI. Estos resultados se evidencian de forma más clara en la figura 5, en donde las unidades agrícolas muestran una tendencia más clara a la baja, seguidas de las unidades forestales y en

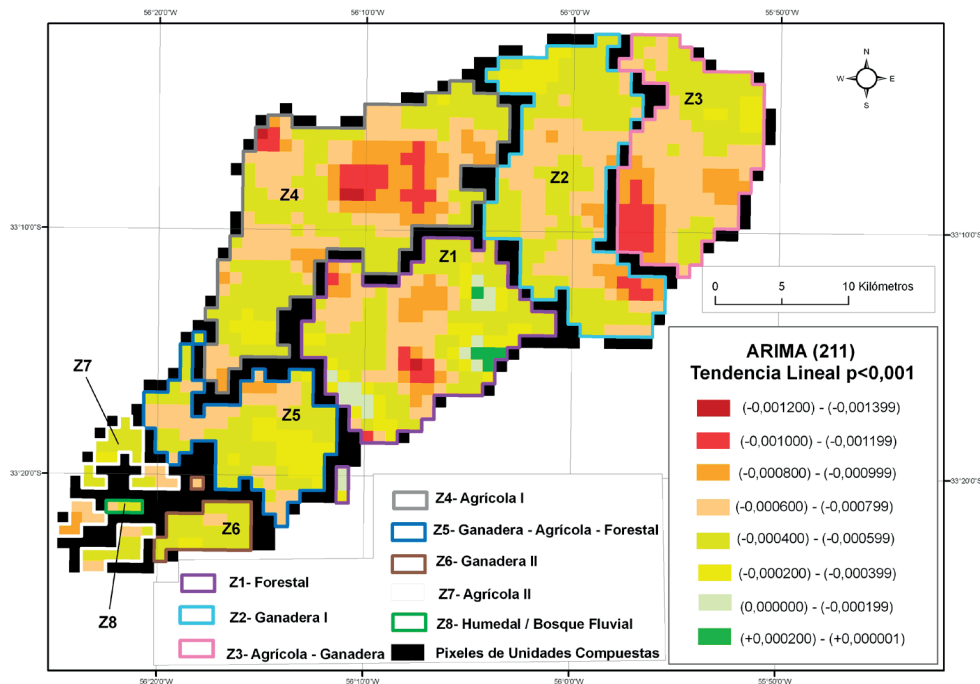


Figura 5. Distribución espacial de la tendencia del NDVI-ARIMA (2,1,1) para el período abril 1998-marzo 2012 de cada una de las unidades de uso agrario dominante. Para la interpretación de los colores consultar edición digital, <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3683>.

menor medida de las unidades ganaderas. Merece destacar que sólo el 0,5 % de la cuenca registró tendencia positiva asociada a la unidad forestal, esto se debe a que son píxeles localizados en zonas recientes de plantación forestal (eucaliptos y pinos).

Este comportamiento diferencial, conjuntamente con el aumento de los rendimientos de las cosechas agrícolas de secano (DIEA, 2013), sugiere considerar que no solamente al factor climático puede ser una explicación de las tendencias registradas, sino que se deben considerar también los factores de intensificación agraria en el marco del cambio ambiental global que existe en la región.

El análisis multiescalar del NDVI permite evidenciar cómo el comportamiento local de la variabilidad del NDVI ayuda a mejorar la interpretación de los resultados obtenidos por Zaho y Running (2010), Samanta *et al.*, (2011) y Barbosa *et al.*, (2012), que realizando un análisis global reportan un descenso del NDVI para la región pampeana.

4. Conclusiones

Se ha presentado un análisis espacial y temporal del NDVI para el Uruguay en un contexto de intensificación agraria, elaborando una base de datos sin antecedentes en el país.

Del análisis de los resultados se desprende que el descenso del NDVI es producto de un conjunto de factores que operan de forma interrelacionada en todas las escalas analizadas. Se evidenció que a escala local (sitio), donde se encuentran los sistemas más intensivos (agrícolas), los valores de NDVI presentan una mayor tendencia a la baja que los sistemas extensivos (ganaderos), siendo el uso del suelo un factor relevante en esta escala. En la escala regional (cuenca) se podría interpretar que la disponibilidad hídrica es un factor que influye en mayor medida sobre el descenso de los valores de NDVI. Por último, a escala nacional (país) el factor climático asociado a los factores anteriores y a las decisiones de las políticas del estado-nación, parecen ser determinantes para la tendencia a la baja del NDVI.

A partir de este trabajo, integrando nuevas escalas de análisis se logra una mejor comprensión de la vinculación entre los cambios en el uso del suelo y el comportamiento regional del NDVI.

Un aspecto central a considerar sobre el comportamiento del NDVI es la limitante temporal de la serie de datos analizada, ya que se cuenta con una serie de 14 años, debido a la disponibilidad de datos SPOT-VGT. En este sentido, surge la interrogante sobre la escala temporal. Efectivamente, se logra identificar una tendencia robusta del NDVI que indica un cambio del sistema ambiental, más allá de lo esperado por la variabilidad debida a la dinámica interna del sistema. El hecho de considerar 14 años de datos, parecería ser una serie mínima para poder entender este comportamiento, seguramente el avance sobre los procesos con series de mayor duración temporal permitirá generar mejores conclusiones que las obtenidas en este estudio.

Finalmente, los resultados de este trabajo permiten, por un lado, disponer de mayor información de base sobre el comportamiento de los sistemas ambientales, y por otro, avanzar aún más sobre el conocimiento de las transformaciones y la dinámica del territorio, siendo la base para mejorar la gestión de los bienes naturales.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo fue realizado bajo el apoyo del Espacio Interdisciplinario (EI) y la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República.

Referencias

Barbosa, H., Tote, C., Kumar, L., Bamutaze, Y. 2013. Harnessing Earth Observation and Satellite Information for Monitoring Desertification, Drought and Agricultural Activities in Developing Countries. En S. S. Young y S. E. Silvern (Eds.), *Environmental Change and Sustainability* (Vol. 1, pp. 91-121). <http://dx.doi.org/10.5772/55499>

Campbell, J. B. 1996. *Introduction to remote sensing*. London: Taylor & Francis.

Carlson, T. N., Ripley, D. A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241-252. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)

Carreras, J., Shimabukuro, J., Pereira, Y. 2002. Fraction images derived from SPOT-4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil. *International Journal Remote Sensing*, 23(23), 4983-4987. <http://dx.doi.org/10.1080/0143116021000016743>

Cihlar, J., Latifovic, R., Beaubien, J., Guindon, B., Palmer, M. 2003. Thematic Mapper (TM) based accuracy assessment of a land cover product for Canada derived from SPOT4/VGT data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(2), 154-170. <http://dx.doi.org/10.5589/m02-091>

Chapin, F., Zavaleta, E., Eviner, V., Naylor, R., Vitousek, P., Reynolds, H., Hooper, D., Lavorel, S., Sala, O. E., Hobbie, S. E., Mack, M. C., Díaz, S. 2000. Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405, 234-242. <http://dx.doi.org/10.1038/35012241>

Chiesi, M., Maselli, F., Bindi, M., Fibbi, L., Cherubini, P., Arlotta, E., Tirone, G., Matteucci, G., Seufert, G. 2005. Modelling carbon budget of Mediterranean forests using ground and remote sensing measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 135(1), 22-34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.09.011>

Chirici, G., Barbati, A., Maselli, F. 2007. Modelling of Italian forest net primary productivity by the integration of remotely sensed and GIS data. *Forest Ecology and Management*, 246(2), 285-295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.04.033>

Chuvieco, E. 2000. *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Rialp.

D'Ozouville, N., Deffontaine, B., Benveniste, J., Wegmüller, U., Violette, S., Marsily, G. 2008. DEM generation using ASAR (ENVISAT) for addressing the lack of freshwater ecosystems management, Santa Cruz Island, Galapagos. *Remote Sensing of Environment*, 112(11), 4131-4147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.017>

Deng, X., Huang, J., Rozelle, S., Uchida, E. 2006. Cultivated land conversion and potential agricultural productivity in China. *Land Use Policy*, 23(4), 372-384. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2005.07.003>

DIEA. 2013. *Anuario 2012*. Obtenido de <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2012,O,es,0>, Acceso: abril de 2015.

Fang, J., Piao, S., Tang, Z. 2001. Interannual Variability in Net Primary Production and Precipitation. *Science*, 293(5536), 1723. <http://dx.doi.org/10.1126/science.293.5536.1723a>

Font, N. 2000. Local y Sostenible. En: N. Font y J. Subirats (Eds.), *Local y Sostenible: La agenda 21 local de España* (pp. 9-29). Barcelona: Icaria.

- Funtowicz, S., Ravetz, J. 1991. A New Scientific Methodology for Global Environmental Issues. En: R. Constanza (Ed.), *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability* (pp. 137-152). New York: Columbia University Press.
- García Préchac, F., Ernst, O., Arbeletche, P., Bidegain, M. P., Pritsch, C., Ferenczi, A., Rivas M. (eds.). 2010. *Intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural*. Montevideo: Universidad de la República. CSIC.
- Gasto, J., Panario, D., Morato, E., Gallardo, S. 1987. *Sitio en el sistema de clasificación de pastizales*. Santiago: Central de Apuntes de Ingeniería.
- GMES. 1998. Global Monitoring for Environment and Security. Obtenido de: <http://www.boss4gmes.eu/indexa9e4.html?id=55>. Último acceso: 3 de marzo, 2014.
- González, M., Román, M. 2009. Expansión agrícola en áreas extrapampeanas de la Argentina. Una mirada desde los actores sociales. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 62(6), 99-120. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11712701006>. Acceso: abril de 2015.
- Guerschman, J., Paruelo, J., Di Bella, M., Giallorenzi, M., Pacin, F. 2003. Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. *International Journal Remote Sensing*, 24(17), 3381-3402. <http://dx.doi.org/10.1080/0143116021000021288>
- Guissard, V., Defourny, P., Ledent, J. 2004. Crop specific information extraction based on coarse resolution pixel sampling. *Proceedings VEGETATION 2004*, 1(1), 391-398. Obtenido de http://references.vgt.vito.be/references_edit.php?ID=300. Acceso: abril de 2015.
- Holben, B. N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1417-1434. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168608948945>
- Hooper, D., Chapin, F., Ewel, J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Hawton, J., Naeem, D., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A., Vandermeer, J., Wardle, D. 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75(1), 3-35. <http://dx.doi.org/10.1890/04-0922>
- IAI. 2011. *Newsletter*. San Pablo: Inter-American Institute for Global Change Research (IAI).
- INIA-GRAS. 1999. NDVI. Último acceso: 14 de diciembre, 2014, obtenido de: <http://www.inia.org.uy/gras/>
- Jiménez, J. F., Sánchez, R., Gázquez, J. C. 2006. La capacidad predictiva en los métodos Box- Jenkins y Holt-Winters: una aplicación al sector turístico. *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa*, 15(3), 185-197. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2150087>. Acceso: abril de 2015.
- Kinyanjui, M. J. 2011. NDVI-based vegetation monitoring in Mau forest complex, Kenya. *African Journal of Ecology*, 49(2), 165-174. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2028.2010.01251.x>
- Levin, S. 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 73(6), 1943-1967. <http://dx.doi.org/10.2307/1941447>
- Mohamed, M., Babiker, I., Chen, Z., Ikeda, K., Ohta, K., Kato, K. 2004. The role of climate variability in the inter-annual variation of terrestrial net primary production (NPP). *Science of the Total Environment*, 332(1-3), 123-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.03.009>
- Moulin, S., Zurita, R., Guérif, M., Baret, F. 2003. Characterizing the spatial and temporal variability of biophysical variables of a wheat crop using hyper-spectral measurements. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*, vol. 4. <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294390>
- Norris, R., Caswell-Chen, E., Kogan, M. 2003. Ecosystems biodiversity and IPM. En: R. Norris (Ed.), *Concepts in integrated pest management*. USA: Prentice Hall.
- O'Neill, R. V., King, A. W. 1998. Homage to St. Michael; or why are there so many books on scale? En: D. L. Peterson y V. T. Parker (Eds.), *Ecological Scale: Theory and Applications* (pp. 3-15). New York: Columbia University Press.
- Paruelo, J., Epstein, H., Lauenroth, W., Burke, I. 1997. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 78(3), 953-958. [http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[0953:AEFNFT\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[0953:AEFNFT]2.0.CO;2)
- Paruelo, J., Garbulsky, M., Guerschman, J., Jobbágy, E. G. 2004. Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change. *International Journal Remote Sensing*, 25(14), 2793-2806. <http://dx.doi.org/10.1080/0143116031001619526>
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W., Rossi, R. 1985. *Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay del Uruguay a la escala 1:500.000*.

- Prince, S. D. 1991. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal Remote Sensing*, 12(6), 1313-1330. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169108929728>
- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Aguado, I. 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. *Geoscience and Remote Sensing*, 41(5), 1056-1061. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2003.811693>
- Rödelsperger, S., Becker, M., Gerstenecker, C., Läufer, G., Schilling, K., Steineck, D. 2010. Digital elevation model with the ground-based SAR IBIS-L as basis for volcanic deformation monitoring. *Journal of Geodynamics*, 49(3), 241-246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2009.10.009>
- Samanta, A., Costa, M., Nunes, E., Vieira, S., Xu, L., Myneni, R. 2011. Comment on "Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 200 Through 2009". *Science*, 333(6049), 1093-1094. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1199048>
- Santos, G., Camargo, F. 1999. *Fundamentos da matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Gênese.
- Seyler, F., Chaplot, V., Muller, F., Cerri, C. E. P., Bermoux, M., Ballestar, V., Feller, C., Cerri, C. C. 2002. Pasture mapping by classification of Landsat TM images. Analysis of the spectral behaviour of he pasture class in a real medium-scale environment : the case of the Piracicaba Catchment (12400 km², Brazil). *International Journal Remote Sensing*, 23(23), 4985-5004. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160210146217>
- Simic, A., Chen, J. M., Liu, J., Csillag, F. 2004. Spatial scaling of net primary productivity using subpixel information. *Remote Sensing of Environment*, 93(1-2), 246-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.008>
- Tarnavsky, E., Garrigues, S., Brown, M. 2008. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 535-549. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.008>
- Telesca, L., Lasaponara, R. 2006. Quantifying intra-annual persistent behaviour in SPOT-VEGETATION NDVI data for Mediterranean ecosystems of southern Italy. *Remote Sensing of Environment*, 101(1), 95-103. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.12.007>
- Tucker, C., Sellers, P. 1986. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal Remote Sensing*, 7(11), 1395-1416. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168608948944>
- Vitousek, P., Mooney, H., Lubchenco, J., Melillo, J. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 277(5325), 494-499. <http://dx.doi.org/10.1126/science.277.5325.494>
- Wiens, J. A. 1989. Spatial scaling in ecology. *Functional Ecology*, 3(4), 385-397. Obtenido de <http://links.jstor.org/sici?sici=0269-8463%281989%293%3A4%3C385%3ASSIE%3E2.0.CO%3B2-7>. Acceso: abril de 2015.
- Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Liu, M. 2002. Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 Vegetation sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 82(2-3), 335-348. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00051-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00051-2)
- Xiaoliang, L., Ronggao, L., Jiyuan, L., Shunlin, L. 2007. Removal of Noise by Wavelet Method to Generate High Quality Temporal Data of Terrestrial MODIS Products. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(10), 1129-1139.
- Yan, H., Liu, J., Huang, H. Q., Tao, B., Cao, M. 2009. Assessing the consequence of land use change on agricultural productivity in China. *Global and Planetary Change*, 67(1-2), 13-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.12.012>
- Zapata, C., Toro, M., Marín, I. 2012. Definición de un método basado en patrones de análisis para la interoperabilidad entre sistemas de información geográfica Número. *Revista EIA*, 9(18), 179-194. <http://repository.eia.edu.co/revistas/index.php/reveia/article/view/269/262>
- Zhang, C., Jordan, C., Higgins, A. 2007. Using neighbourhood statistics and GIS to quantify and visualize spatial variation in geochemical variables: An example using Ni concentrations in the topsoils of Northern Ireland. *Geoderma*, 13(3), 466-476. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.10.018>
- Zhang, G., Kang, Y., Han, G., Sakurai, K. 2011. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia. *Global Change Biology* 17(1), 377-389. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02237.x>
- Zhao, M., Running, S. 2010. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 200 Through 2009. *Science*, 329(5994), 940-942. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1192666>