

INCIDENCIA DE LA INTENSIFICACIÓN AGRARIA EN LA TENDENCIA DEL NDVI. URUGUAY 2000-2011

Ismael Díaz¹, Mauricio Ceroni² y Marcel Achkar³

¹ Universidad de la República/Facultad de Ciencias/ Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Iguá 4225, CP: 11.400, Montevideo-Uruguay. idadiaz@fcien.edu.uy

² Universidad Nacional Autónoma de México/Instituto de Geografía, Ciudad Universitaria, CP: 04510, DF - México. mceroni@comunidad.unam.mx

³ Universidad de la República/Facultad de Ciencias/ Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Iguá 4225, CP: 11.400, Montevideo-Uruguay. achkar@fcien.edu.uy

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue analizar la distribución espacio-temporal del NDVI en Uruguay, y explorar la variabilidad de su comportamiento en diferentes tipos y niveles de intensidad de uso del suelo.

La estrategia metodológica incluyó la generación de un índice de intensidad de uso del suelo a partir de información oficial de censos agropecuarios; el trabajo con imágenes satelitales SPOT 4 y 5 de resolución espacial 1km²; y el análisis de tendencia de NDVI mediante el uso de series temporales.

Los principales resultados evidencian una tendencia decreciente del NDVI en el espacio agrario uruguayo. Los mayores valores de NDVI se encontraron en zonas con bajos valores de intensidad de uso y en zonas de forestación exótica. Las zonas con mayores valores de NDVI se correlacionaron con las zonas que más se intensifican entre 2000 y 2011. Además se encontró que la tendencia al decrecimiento es mayor en las zonas con usos más intensivos. Estos resultados sugieren que además de las sequías, los cambios en el uso del suelo se presentan como una variable explicativa de los cambios en los valores del NDVI. Por otro lado, considerando que la intensificación se asocia a tendencias decrecientes del NDVI y que se manifiesta principalmente sobre las zonas que presentan mayores valores de NDVI, de no registrarse cambios significativos en las precipitaciones, es esperable una disminución aún mayor del NDVI en los próximos períodos.

Palabras clave: NDVI; Intensificación Agraria; Uruguay; SPOT.

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the spatial-temporal distribution of NDVI in Uruguay and explore the variability of its behavior in different types and levels of land use intensity.

Methodology includes, by using agricultural official information from national census, the generation of an index of intensity of land use; the work with satellite images of 1km² spatial resolution SPOT 4 and 5; and NDVI trend analysis using temporal series.

The main results showed a downward trend in NDVI in uruguayan agricultural area. Highest values of NDVI were found in areas with low values of intensity land use and in forestry areas. In addition, areas with higher NDVI values were correlated with areas that were intensified between 2000 and 2011. It was also found that the downward trend is greater in areas with more intensive land uses. These results suggest that, in addition to drought, land use changes are an explanatory variable of NDVI value changes. On the other hand, considering that intensification is associated with downward trend of NDVI and it occurs mostly on areas with higher values of NDVI, it is expected an even greater decrease of NDVI in the next periods if significant changes in rainfall are not recorded.

Keywords: NDVI, Agricultural intensification, Uruguay, SPOT

1. INTRODUCCIÓN

Los avances alcanzados en las técnicas de Sensoramiento Remoto así como el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se han consolidado respectivamente como importantes fuentes de datos y poderosas herramientas para la generación y análisis de información espacial. La utilización de imágenes satelitales de baja resolución espacial y alta resolución temporal ha posibilitado la utilización masiva y creciente de índices de vegetación.

Uno de los índices más utilizado es el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), el cual surge a partir de la operación de dos bandas del espectro electromagnético (rojo e infrarrojo cercano) y se presenta como un indicador directo de la cantidad de biomasa verde fotosintéticamente activa (Tucker y Sellers, 1986), presentando una relación lineal y positiva con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa (Sellers et al., 1992) y por ende también con la productividad primaria (Prince, 1991).

Por otro lado, numerosos estudios demuestran la asociación positiva entre la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) y el funcionamiento de los sistemas ambientales (Fisher et al., 2009, Laterra et al., 2011). Lo anterior sugiere la posibilidad de avanzar en el conocimiento de las alteraciones en el funcionamiento de los sistemas ambientales a partir del análisis de las alteraciones espacio-temporales de la PPNA. Por estos motivos, la PPNA se ha posicionado como un indicador robusto del funcionamiento de estos sistemas.

En las últimas décadas, diversos estudios han analizado la evolución de la productividad a diversas escalas. Nemani et al., (2003) han encontrado un incremento de la productividad a escala global para el período 1982-1999. Por otro lado Zhao y Running (2010) han encontrado un descenso de la productividad a escala global para el período 2000-2009 y posteriormente Samanta et al. (2011) en respuesta a lo planteado por Zhao y Running (2010), sostienen que el 15% de estos cambios al sur de los 70º N son significativos.

Las tendencias de la productividad primaria hallada para los diferentes períodos han presentado claras diferencias a nivel espacial, habiendo zonas del planeta donde la productividad crece, otras donde decrece y otras donde se mantiene relativamente estable.

La productividad en el continente sudamericano ha mostrado un crecimiento en el período 1981-2000, el que ha estado asociado principalmente al incremento de la productividad de los bosques lluviosos y de las sabanas (Paruelo et al. 2004). Estos autores proponen como explicación a este incremento el aumento de CO₂ en la atmósfera, al aumento de la temperatura y la expansión de los cultivos forestales y agrícolas.

Para las zonas templadas del continente sudamericano, las pampas, Zhao y Running (2010) y Samanta et al. (2011) en un estudio a escala global, reportan un decremento de la productividad primaria neta, el cual se encuentra asociado principalmente a las sequías ocurridas en el continente en el período 2000-2009.

Además de los controles generados por la disponibilidad de agua, la temperatura, la incidencia de la radiación solar, el contenido de CO₂ en la atmósfera y otros (Nemani et al., 2003) la productividad, naturalmente, se encuentra en función del tipo de cobertura vegetal. De esta manera, los cambios en los usos del suelo generan cambios en el NDVI (Paruelo et al. 2004).

La Pampa sudamericana integrada en su totalidad por Paraguay y Uruguay, el Centro-Norte de Argentina, el Este y el Noreste Boliviano y Centro-Oeste, y Sur de Brasil, ha presentado en las últimas décadas cambios sin precedentes en el uso del suelo asociados a procesos de expansión de la frontera agrícola e intensificación agraria. El conjunto de estos países durante los últimos 10 años presentan un crecimiento en: a) las exportaciones de bienes primarios; b) índice de concentración de la tierra (GINI); c) la superficie de la silvicultura; d) la superficie agrícola; e) la superficie de tierras arables; f) la superficie regada; g) uso de fertilizantes y plaguicidas (CEPAL, 2015).

El análisis de la evolución del NDVI y su asociación con cambios en los usos del suelo se presenta como una herramienta de alto potencial para poder analizar cambios en el funcionamiento de los ecosistemas y su potencialidad para la generación de servicios, a partir de una variable síntesis. En este contexto el objetivo

general del trabajo fue analizar la distribución espacio-temporal del NDVI en Uruguay, y explorar la variabilidad en su comportamiento en diferentes tipos y niveles de intensidad de uso del suelo.

2. ÁMBITO DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde a todo el territorio terrestre de Uruguay (situado entre los 30° 05' y 34° 58' de latitud sur y los 53° 11' y 58° 26' de longitud oeste) (Figura 1). La superficie total supera los 17 millones de hectáreas (176.000 km²), el clima es templado y húmedo, con precipitaciones acumuladas anuales que varían entre 900mm y 1500mm entre el oriente y el occidente del país, y temperaturas medias que varían entre 17°C y 20°C de occidente a oriente.

La gran mayoría de la superficie del espacio agrario presenta una cobertura vegetal de pastizales naturales y un uso ganadero extensivo (más de 12 millones de hectáreas) (Figura 1). Seguidamente se destacan los cultivos de secano, cerealeros y oleaginosos localizados al oeste del país (principalmente la soja con aproximadamente 1 millón de hectáreas), y los cultivos de regadío al este del país (principalmente el arroz con aproximadamente 200.000 de hectáreas). Además se destaca una importante superficie destinada a la forestación de especies exóticas (aproximadamente 1 millones de hectáreas), localizada mayoritariamente en 4 regiones principales.

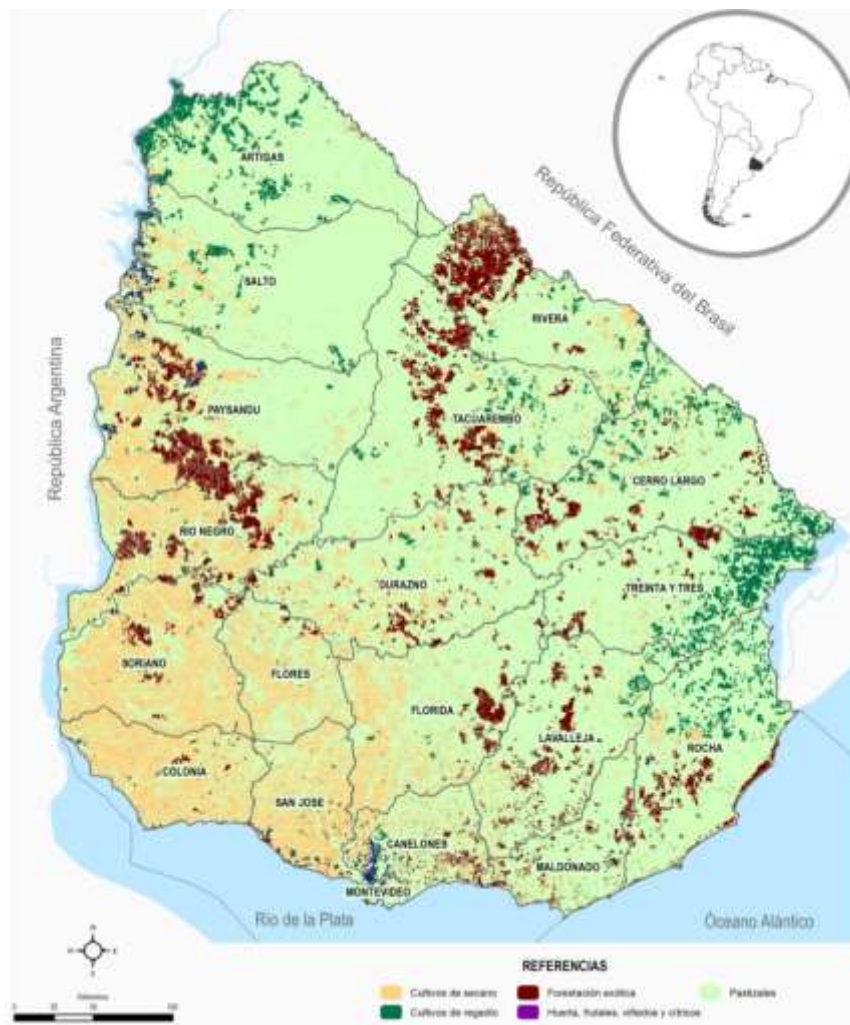


Figura 1. Localización y usos del suelo en el área de estudio. Elaboración propia en base a DINOT 2013.

3. METODOLOGÍA

La estrategia metodológica incluyó la generación de un índice de intensidad de uso del suelo a partir de información oficial de censos agropecuarios; el trabajo con el índice NDVI mediante el uso de imágenes satelitales SPOT 4 y 5 utilizando el instrumento Vegetation (VGT) y el análisis de correlación y tendencia en series temporales de NDVI.

Intensidad de Uso del Suelo

Se elaboró un índice de intensidad de uso del suelo mediante la clasificación de las principales coberturas vegetales en el territorio uruguayo, de acuerdo al uso del suelo que se desarrolla en éstas y en función de la utilización de insumos (agua, fertilizantes, agroquímicos, etc.) por parte de cada uso (intensidad). Para la elaboración de este índice se tomaron como referencia la propuesta realizada por Prados et al. (2002) y el antecedente generado por Gazzano y Achkar (2014), adaptándose la clasificación en función de las características de los usos del suelo en el territorio uruguayo registrados en los censos agropecuarios.

En primera instancia se identificaron 14 categorías de cobertura vegetal y posteriormente se asoció cada cobertura con sus usos del suelo más frecuentes. Seguidamente se ordenaron de forma ascendente de acuerdo a la intensidad asociada a cada uso del suelo. Este orden jerárquico coloca a los humedales y bosques naturales en el nivel inferior de intensidad y a los cultivos cerealeros y oleaginosos en el nivel superior (Tabla 1).

A continuación se generó el ponderador de cada uso del suelo el cual se define a partir de la relación entre el orden de cada uso del suelo y la sumatoria de todos los órdenes. Finalmente estos valores fueron estandarización entre 0,01 y 1, quedando los usos más intensivos con mayores valores de ponderador.

Tabla 1. Jerarquización y ponderación de coberturas vegetales y los usos del suelo según su nivel de intensidad.

COBERTURA VEGETAL/ USO DEL SUELO	ORDENACIÓN	PONDERADOR
HUMEDALES Y BOSQUE NATURAL	1	0.01
CAMPO NATURAL	2	0.02
CAMPO NATURAL FERTILIZADO	3	0.03
CAMPO NATURAL CON SIEMBRA EN COBERTURA	4	0.04
PRADERA SEMBRADA	5	0.05
RASTROJO	6	0.06
FORRAJE	7	0.07
CAMPOS CON HERBICIDA	8	0.08
HUERTAS	9	0.09
FRUTALES	10	0.10
VIÑEDOS	11	0.10
FORESTACIÓN	12	0.11
CÍTRICOS	13	0.11
CEREALES Y OLEAGINOSAS	14	0.13

Se trabajó con información oficial proporcionada por los censos agropecuarios de los años 2000 (CGA, DIEA 2000) y 2011 (CGA, DIEA 2015). La unidad de mayor resolución en la provisión de datos de estos censos corresponde al área de enumeración. El territorio uruguayo se divide en 637 áreas de enumeración siendo la superficie media de estas unidades de 27.300 hectáreas.

Por lo tanto, la información de usos del suelo y por consiguiente el índice de intensidad de uso del suelo se generó a escala de área de enumeración (Ec. 1). El resultado final de intensidad varió entre 1 y 10, dónde los valores más altos indicaron mayores niveles de intensidad en el uso del suelo.

$$Ec.1 \quad IAE_i = \sum (S_{ni}/SAE_i) \times P_n$$

Siendo: IAE=Intensidad en el área de enumeración i

S=Superficie del uso del suelo n en el área de enumeración i

SAE= Superficie total del área de enumeración i

P= Ponderador del uso del suelo n

Distribución espacio-temporal del NDVI

Para la caracterización del área de estudio se trabajó con imágenes satelitales SPOT 4 y 5 utilizando el instrumento Vegetation (VGT), disponible gratuitamente en la plataforma VITO (www.spot-vegetation.com). Este sistema presenta entre sus principales productos el índice de vegetación NDVI, índice que combina las bandas electromagnéticas del rojo y del infrarrojo (Ec. 2).

$$Ec.2 \quad NDVI = (IR-R) / (IR+R)$$

Siendo: IR: reflectancia en la región del infrarrojo cercano en el espectro electromagnético

R: reflectancia en la región del rojo en el espectro electromagnético.

La resolución temporal del producto utilizado fue de 10 días, la resolución espacial de 1km² y el período de análisis considerado fue desde 1999 hasta finales de 2010. Esto determinó la utilización de 438 imágenes. Se consideró el año 1999 a los efectos de relevar el escenario próximo anterior a la realización del censo.

Luego de su adquisición se realizó una transformación de los valores digitales (DN) a valores de NDVI mediante la función lineal elaborada por el equipo técnico de SPOT (www.spot-vegetation.com). Posteriormente se aplicó el producto Status Map (SM) para filtrar los datos de NDVI con valores fuera del rango del NDVI (<0; >1). A continuación se procedió a la corrección geométrica de la imagen, la cual se realizó en el proceso de transformación de la base de datos al sistema de referencia, datum WGS84, sistema de proyección Universal Transversa Mercator (UTM) zona 21 sur (Ceroni et al., 2015). Posteriormente la información disponible en formato raster fue convertida a formato vectorial e integrada en el sistema de información de geográfica previamente desarrollado para la sistematización y generación de información de usos del suelo. Finalmente la información de NDVI fue resumida por área de enumeración y por mes.

Análisis estadísticos

Los procesamientos estadísticos integraron en primera instancia análisis de correlación no paramétrica entre los valores de intensidad en el uso del suelo y los valores de NDVI hallados en las áreas de enumeración analizadas. Para esto se realizaron análisis de correlación no paramétrica de Spearman (Legendre & Legendre, 1998).

A los efectos de caracterizar el comportamiento del NDVI para todo el territorio nacional se trabajó con series temporales, mediante la implementación de la prueba no paramétrica de tendencia de Mann-Kendall (Hirsch et al., 1982; Westmacott y Burn, 1997).

Finalmente se generó un agrupamiento de las áreas de enumeración en función de sus valores de intensidad de uso del suelo, y se analizó la tendencia en sus valores de NDVI para el período 1999-2010 utilizando la prueba de Mann-Kendall y analizando la pendiente de Sen (Sen 1968).

Los procesamientos se realizaron utilizando el programa R versión 2.12.2 paquetes WQ y Kendall (R Development Core Team, 2012). En todos los casos se asumió un p valor de 0.05.

4. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el período 2000-2010 se visualiza un claro proceso de intensificación agraria en el territorio uruguayo. En dicho período el índice nacional medio de intensificación se incrementó un 16%, pasando de 3,8 en 2000 a 4.4 en 2011. Este incremento se explica principalmente por el crecimiento de la superficie destinada al cultivo de soja (más de 900.000 hectáreas) y de forestación (más de 300.000 hectáreas), presentándose un crecimiento de la frontera agrícola con dirección de oeste a este (Figura 2).

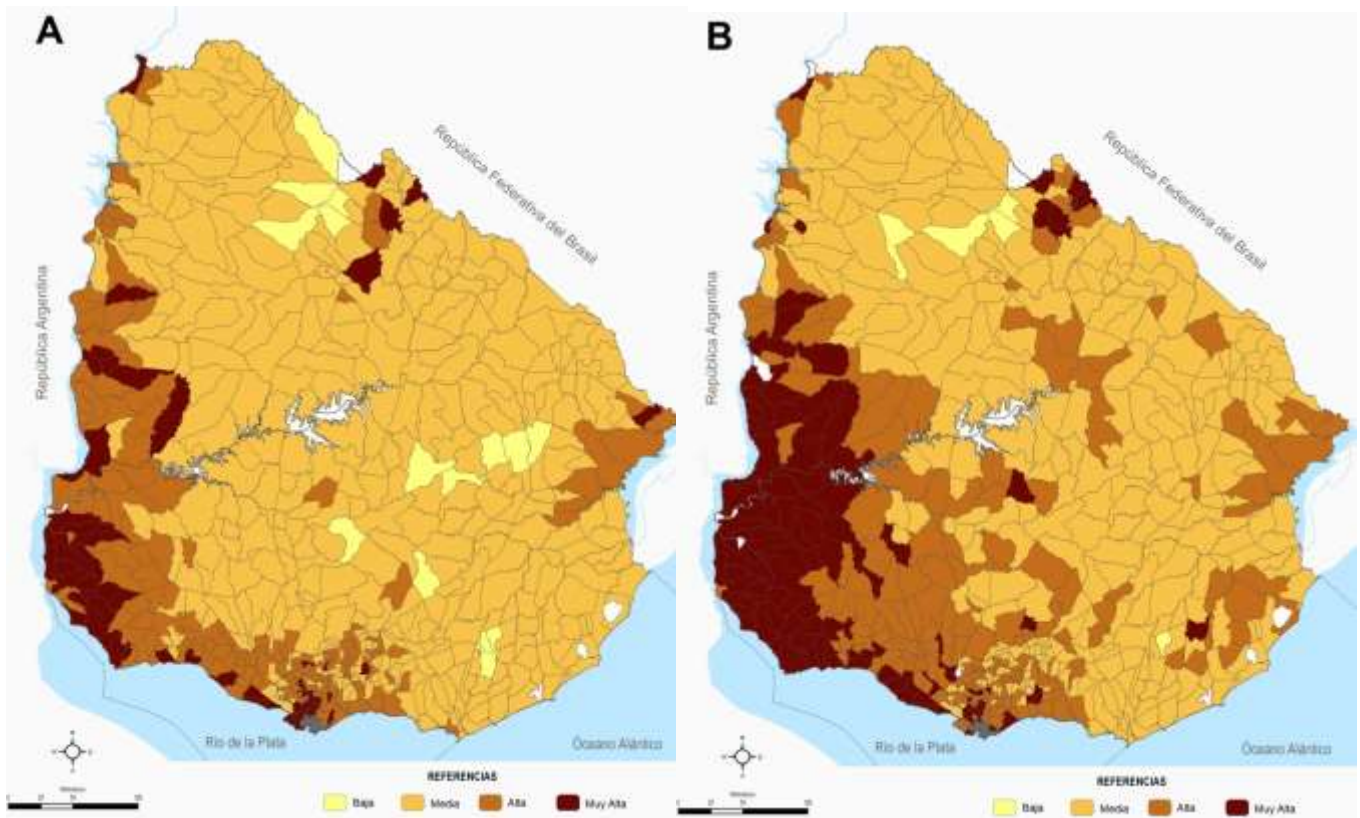


Figura 2. Intensidad en el uso del suelo en el año 2000 (A) y 2011(B). Elaboración propia en base a CGA 2000 y CGA 2011.

Los valores de NDVI registraron una tendencia decreciente en el período 2000-2011 para el conjunto del país (Figura 3). Esto se evidencia con la prueba de tendencia de Mann-Kendall, la cual arrojó un valor $z=-4,21$ con $p<0.001$ y una pendiente de Sen= $-0,0005$.

La tendencia a la disminución del NDVI registrada concuerda con la ocurrencia de dos sequías agronómicas de importancia en el período analizado. Esta situación se asocia a lo propuesto por Zhao y Running (2010) como explicación al descenso de la productividad en estas zonas del planeta. Además es concordante con lo propuesto por numerosos trabajos que documentan la estrecha vinculación entre NDVI y precipitaciones.

Los valores de intensidad de uso del suelo se correlacionaron negativamente con los valores medios de NDVI en los años 2000 ($r_s=-0,35$, $p<0.001$) y 2010 ($r_s=-0.50$, $p<0.001$). Por otra parte se detectaron coeficientes de

variación mayores en áreas de enumeración con altos valores de intensidad de uso (7,6) que en áreas con bajos valores de intensidad (3,4). De esta manera, las áreas de enumeración con menores valores de intensidad de uso del suelo presentaron mayores valores de NDVI y menor variación (desviaciones estándar). Esta situación pone en evidencia la incidencia diferencial de la variabilidad climática sobre los agrosistemas, mostrándose más resilientes los sistemas con menores niveles de intensidad en el uso del suelo.

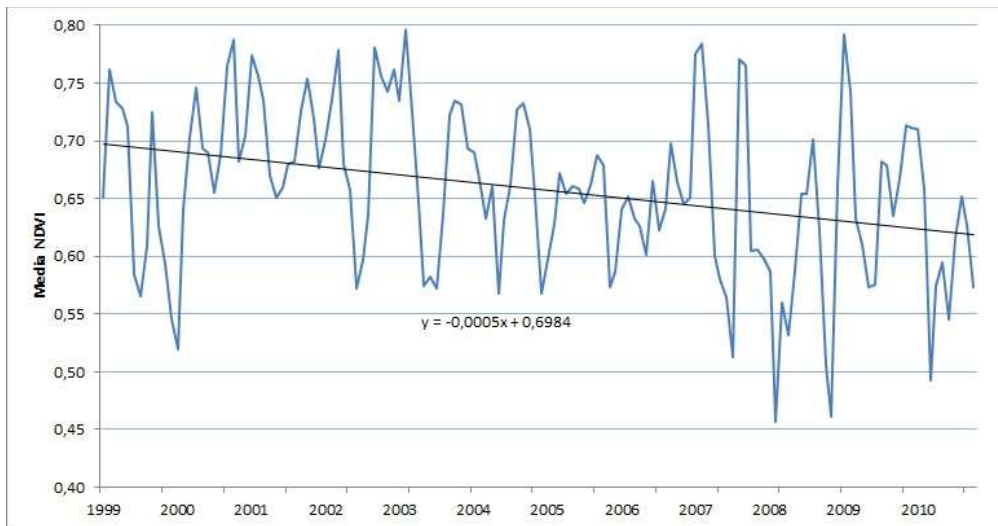


Figura 3. Evolución del NDVI en el período 1999-2011. Elaboración propia en base a imágenes satelitales SPOT 4 y 5.

Se detectó que la variación interanual del NDVI es mayor cuanto mayor es la intensidad en el uso del suelo (Figura 4). Las áreas con intensidad muy baja y media presentaron un comportamiento relativamente estable a lo largo del año y las áreas de intensidad muy alta presentaron valores muy altos a finales del verano y mediados de primavera y muy bajos en invierno. Esta situación se asocia a que las zonas de alta intensidad (uso predominantemente agrícola de secano) a pesar de ser muy productivas en determinados meses, no compensan los meses en los cuales el suelo se encuentra sin vegetación y está siendo preparado para una nueva siembra y que por tanto su producción es muy baja.

Por otra parte, la tendencia del NDVI para el período analizado es decreciente para todos los grupos de áreas de enumeración generados según intensidad de uso del suelo. Sin embargo, esta tendencia resulta más pronunciada en el grupo de áreas de enumeración de mayor intensidad, seguido del grupo de menor intensidad (Figura 5 y Tabla 2). Los valores encontrados son parcialmente consistentes con lo planteado por Ceroni et al. (2015), que para una escala local mostraron una relación positiva entre la intensidad de uso del suelo y la magnitud decreciente de la tendencia del NDVI. Sin embargo, los resultados de este trabajo colocan a las zonas de intensidad media como las zonas donde la tendencia al decremento es menor. Esta situación puede explicarse por la presencia de una importante superficie de cultivos forestales en este grupo de áreas, y sus características en cuanto a la cantidad y estabilidad de biomasa fotosintética activa de dichas coberturas vegetales.

A partir del análisis de la intensidad de uso del suelo y la tendencia del NDVI, los resultados encontrados en este trabajo permiten sostener la hipótesis que en zonas templadas la sustitución de pastizales naturales por cultivos (ej: soja) genera un decremento de los valores de NDVI. Esta situación se añade a la documentada por Paruelo et al. (2004) en cuanto a la reducción del NDVI en el proceso de sustitución de bosque natural por cultivos. Adicionalmente permite mantener la hipótesis que en zonas templadas la intensificación agrícola genera una reducción de los valores de NDVI, y que además esta reducción es más pronunciada en usos del suelo de mayor intensidad.

Por otro lado, se detectó que las zonas con mayores valores de NDVI son las que más se intensifican entre 2000 y 2011 ($r_s=0.20$, $p<0.001$). Esta situación pone aún más en evidencia la complejidad del escenario actual del espacio rural uruguayo, dado que los usos del suelo que generan las mayores reducciones del NDVI se expanden en las zonas donde los valores de NDVI son mayores.



Figura 4. Comportamiento anual del NDVI medio según intensidad de uso del suelo del área de enumeración. Elaboración propia en base a imágenes satelitales SPOT 4 y 5.

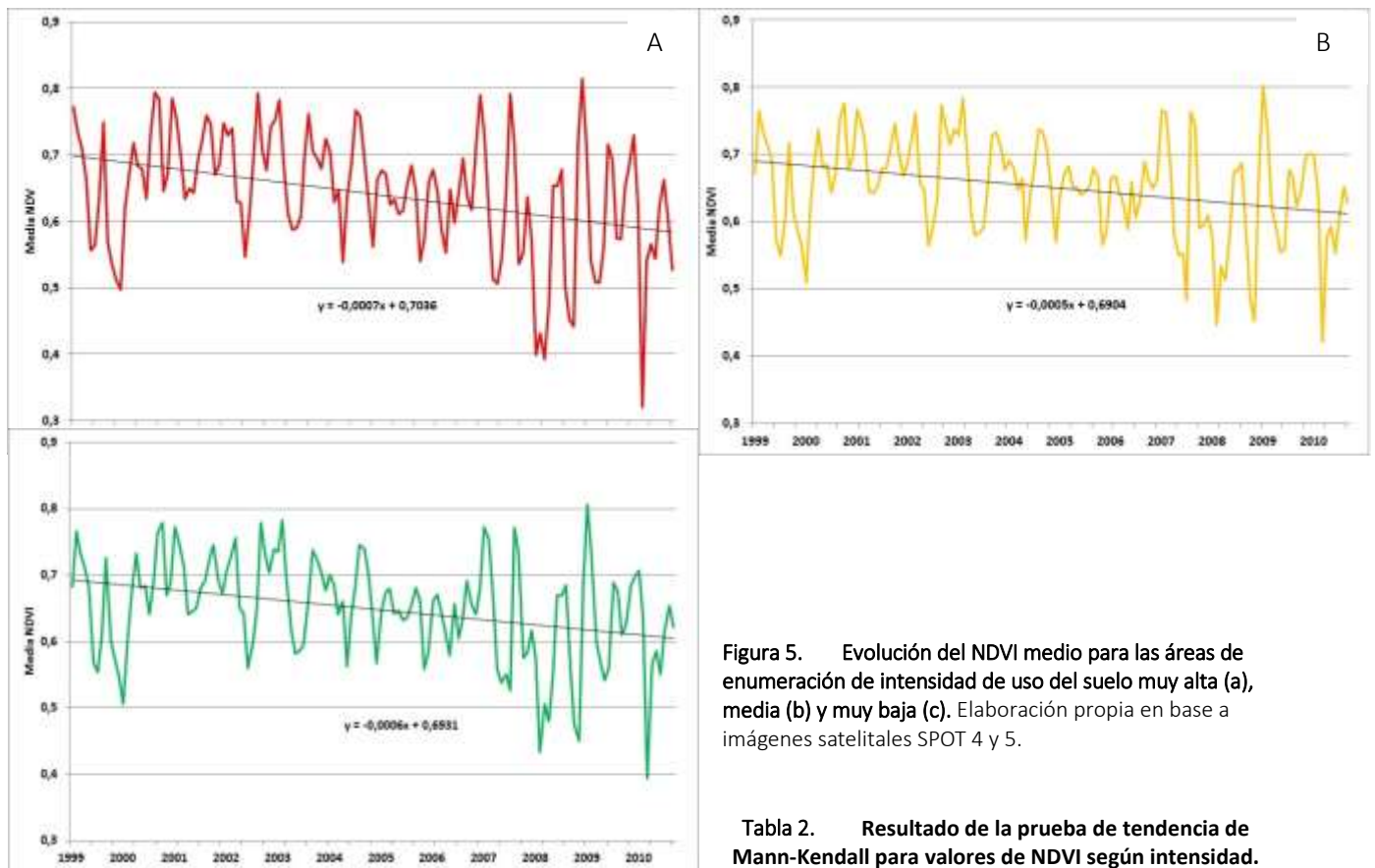


Figura 5. Evolución del NDVI medio para las áreas de enumeración de intensidad de uso del suelo muy alta (a), media (b) y muy baja (c). Elaboración propia en base a imágenes satelitales SPOT 4 y 5.

Tabla 2. Resultado de la prueba de tendencia de Mann-Kendall para valores de NDVI según intensidad.

<i>Intensidad</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>Pendiente de Sen</i>
Muy alta	-4,59	<0.0001	-0,0007
Media	-4,11	<0.0001	-0,0005
Muy baja	-4,28	<0.0001	-0,0006

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo permite avanzar en la caracterización de dos procesos de suma relevancia en el espacio agrario uruguayo, la intensificación de los usos del suelo y la evolución y tendencia del NDVI en los sistemas ambientales.

Los resultados alcanzados permiten sostener que los cambios en el NDVI y por tanto en la PPNA, se encuentran asociados a forzantes climáticas-atmosféricas, pero también a controles locales, ejercidos por los cambios el uso del suelo.

El análisis propuesto presenta una estrategia de utilidad para el análisis a escala regional, asociando un índice de intensificación que permite analizar todo el territorio uruguayo de forma integral, trascendiendo al análisis de evolución de un cultivo en particular, o el análisis predial. Dicha estrategia se basa en el análisis del comportamiento espectral de un territorio compuesto por un mosaico heterogéneo de usos del suelo y coberturas vegetales con una tendencia específica en el proceso global de intensificación. Por otra parte el uso del NDVI como indicador de la variabilidad temporal de la productividad primaria de estos territorios heterogéneos, permite identificar tendencias que integran el conjunto de procesos que se producen en cada una de estas zonas.

Finalmente, debido a que la intensificación agrícola en Uruguay se asocia a tendencias decreciente del NDVI y que se consolida principalmente sobre las zonas que presentan mayores valores de NDVI, quedan de manifiesto un conjunto de incertidumbres dado que de no registrarse cambios significativos en las forzantes externas, es esperable en los próximos períodos una disminución aún mayor del NDVI y por tanto de la PPNA y sus funciones ambientales asociadas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- CEPAL. (2015). *Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe 2014*: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- CGA-DIEA-MGAP. (2000): Censo General Agropecuario (2000). Montevideo. Uruguay
- CGA-DIEA-MGAP. (2015): Censo General Agropecuario (2011). Montevideo. Uruguay
- Ceroni, M., Achkar, M., Gazzano, I., y Burgeño, J. (2015): "Estudio del NDVI mediante análisis multiescalar y series temporales utilizando imágenes SPOT, durante el período 1998-2012 en el Uruguay", *Revista de Teledetección, AGT*, 43, 31-42.
- Fisher, B., Turner, R. y Morling, P. (2009): "Defining and classifying ecosystem services for decision Making", *Ecological Economics*, 68, 643-653.
- Gazzano, I. y Achkar M. (2014): "Transformación territorial: análisis del proceso de intensificación agraria en la cuenca del área protegida Esteros de Farrapos, Uruguay", *Revista Brasileña de Agroecología*, 9(2): 30-43.
- Hirsch, R, Slack J. y Smith R. (1982): "Techniques of trend analysis for monthly water quality data", *Water Resources Research*, 18(1), 107-121.
- Lattera, P., Jobbagy, E. y Paruelo J. (2011): "Valoración de bienes y servicios ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial", Ed, INTA Buenos Aires. 744pp.

- Legendre, P. y Legendre, L. (1998): "Numerical Ecology". 2nd English Edition, Amsterdam. 870pp.
- Nemani, R., Keeling, C., Hashimoto, H., Jolly, W., Piper, S., Tucker, C., Myneni, R. y Running, S.(2003): "Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999", *Science*, 300, 1560-1563.
- Paruelo, J., Garbulsky, M., Guerschman, J. y Jobbágy, E. (2004): "Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change", *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2793-2806.
- Prados, M., Camarillo, J., y García, F. (2002): "Metodología para la identificación y el análisis de procesos de intensificación agraria mediante la utilización de sistemas de información geográfica e imágenes de satélite. Caso práctico en la cuenca del Guadiamar. En: García Cuesta, et al. X Congreso de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección, Valladolid. AGE.
- Prince, S. (1991): "Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988", *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1301-1311.
- R Core Team (2012): "R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing", Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Sellers, P., Berry, J., Collatz, G., Field, C. y Hall, F. (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.
- Sen, P. (1968): "On a class of aligned rank order tests in two-way layouts", *The Annals of Mathematical Statistics*, 39(4): 1115-1124.
- Tucker, C., Sellers, P. (1986): "Satellite remote sensing of primary production", *International Journal Remote Sensing*, 7(11), 1395-1416.
- Westmacott, J. y Burn D. (1997): "Climate changes effects on the hydrologic regime within the Churchill- Nelson River Basin", *Journal of Hydrology*, 202, 263-279.

URL: <http://www.spot-vegetation.com>