

Tendencias temporales y anomalías espaciales del funcionamiento ecosistémico en dos áreas protegidas de Uruguay

Federico Gallego¹
Domingo Alcaraz-Segura³
Santiago Baeza²
Alice Altesor¹
Camilo Bagnato⁴
José María Paruelo⁴

¹Universidad de la República - UdelaR, Facultad de Ciencias, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales. Montevideo, Uruguay.
federicogallego06@gmail.com

aaltesor@fcien.edu.uy

²Universidad de la Republica - UdelaR, Facultad de Agronomía, Unidad de Sistemas Ambientales. Montevideo, Uruguay.
santiago.baeza@gmail.com

³Universidad de Almería, Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global, Dpto. de Biología Vegetal y Ecología. Almería, España
dalcaraz@ual.es

⁴Universidad de Buenos Aires – UBA y CONICET, Facultad de Agronomía e IFEVA, Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección. Buenos Aires, Argentina.
bagnato@ago.uba.ar
paruelo@ifeva.edu.ar

Abstract. Protected areas represent a reference system to make comparisons of the effect of changing land use on ecosystem functioning. Functional attributes of the ecosystems allow to characterize the services that natural ecosystems provide to society. The aim of this study was to analyze temporal trends and spatial anomalies of ecosystem functioning attributes in 2 protected areas in Uruguay. Considering that both external and internal factors influencing the temporal changes in ecosystem functioning, the hypothesis of this study is that areas that have been protected for longer show greater stability in relation to adjacent areas where it continues the change in land use. MODIS satellite images were used for the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the period 2001-2009. We analyzed trends in three attributes derived from the index. Also we analyzed the spatial anomalies in the annual integral of the fraction of Photosynthetic Active Radiation absorbed by vegetation (fPAR-I). As a result we obtained "change maps" generated from the trend of the three attributes and "spatial anomaly maps" of the fPAR-I. The present study provides solid scientific information about the current situation and temporal trends in ecosystem functioning of two protected areas of Uruguay. This information will allow to analyze and to monitor the effect of different management providing a support tool for decision making in the field of protected area management.

Palavras-chave: Remote sensing, MODIS, NDVI, conservation, sensoriamento remoto, MODIS, IVN, conservação.

1. Introducción

Un aspecto primordial de las áreas protegidas es proveer sistemas de referencia para obtener información valiosa para el manejo de los recursos naturales. La posibilidad de identificar, describir y cuantificar desde el punto de vista biofísico la provisión de servicios ecosistémicos constituye un punto de partida imprescindible para la toma de decisiones. El sistema científico debería proporcionar a los gestores instrumentos de seguimiento apropiados que permitan una rápida evaluación de las condiciones actuales y los cambios observados en los ecosistemas, su salud y su integridad ecológica. Para ello las comparaciones de las tendencias temporales del funcionamiento ecosistémico entre los ambientes dentro de las áreas protegidas y sus entornos inmediatos sometidos a distintos usos permiten el desarrollo de sistemas de alarma que pueden detectar tendencias, amenazas o situaciones de riesgo.

Para este propósito, los atributos funcionales de los ecosistemas (es decir, los relacionados con los intercambios de materia y energía entre la biota y el ambiente) ofrecen varias ventajas, ya que muestran una respuesta más rápida a las perturbaciones que la estructura de la vegetación; evitando que la inercia estructural retrase la percepción de los efectos de la perturbación en los ecosistemas (Milchunas y Lahueroth 1995). Además, los atributos funcionales facilitan su seguimiento mediante teledetección bajo un protocolo de observación común (Paruelo et al. 2001). Diversos índices espectrales derivados de imágenes de satélite están vinculados a variables funcionales de los ecosistemas, tales como la producción primaria, la evapotranspiración, la temperatura superficial, el albedo superficial y la eficiencia en el uso de las precipitaciones (Di Bella et al. 2000). Entre las variables derivadas de los datos espectrales destacan los índices de vegetación. Éstos han sido ampliamente utilizados en ecología para el estudio de las tendencias temporales, y desempeñan un papel clave en la investigación del cambio global (Pettorelli et al. 2005). Los índices espectrales pueden ser calculados a partir de imágenes con muy diversa resolución espacial y temporal. Han sido utilizados para seguimientos desarrollados en un amplio rango de escalas, desde la regional a la global mostrando su aplicabilidad para detectar cambios a largo plazo (Alcaraz et al. 2009a,b; Nemani et al. 2009). Los atributos funcionales de los ecosistemas permiten caracterizar cuantitativa y cualitativamente los servicios que proveen los ecosistemas naturales a la sociedad (Costanza et al. 1997). En consecuencia, una adecuada selección de variables funcionales y de índices espectrales que puedan estimarlas es de vital importancia para la gestión de los recursos naturales, la planificación sistemática de la conservación y para integrar los efectos del cambio global en las estrategias de conservación (Margules y Pressey 2000).

El objetivo del presente trabajo fue analizar las tendencias temporales y anomalías espaciales de atributos derivados del Índice de Vegetación Normalizado, descriptores del funcionamiento ecosistémico en 2 áreas protegidas de Uruguay. El análisis se centró en comparaciones de las tendencias entre los ecosistemas protegidos dentro de los parques y sus entornos inmediatos no protegidos.

La hipótesis que guió este trabajo es:

Los cambios temporales en el funcionamiento ecosistémico están influenciados por múltiples factores, algunos externos (temperatura, precipitación, tipo de suelo, etc.) otros internos (perturbación, protección, manejo). En consecuencia, es esperable que las áreas que han sido protegidas durante más tiempo, donde han disminuido las perturbaciones y permitido la recuperación de la vegetación, mostrarán mayor estabilidad en relación con sus zonas adyacentes donde continúa el cambio en el uso del suelo.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

Este trabajo se llevó a cabo en dos áreas protegidas de Uruguay y sus zonas adyacentes: 1) la primer área incorporada al Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), el Paisaje Protegido Quebrada de los Cuervos y 2) la región de la cuenca de los arroyos Laureles y Cañas, candidata a incorporarse al sistema.

El Paisaje Protegido Quebrada de los Cuervos se ubica en la región Centro-Este de Uruguay entre los $32^{\circ}54'14''$ - $32^{\circ}58'54''$ de latitud Sur y $54^{\circ}24'15''$ - $54^{\circ}30'21''$ de longitud Oeste. Comprende un territorio de aproximadamente 4440 hectáreas situada dentro de la cuenca del Arroyo Yermal Grande, abarcando la divisoria de aguas de las cuencas de los Arroyos Yermal Chico y Yermalito. Se caracteriza por presentar varios ecosistemas, entre los que se destaca el bosque de quebrada y galería junto a un sistema fluvial y los pastizales naturales. Estos últimos ocupan la mayor parte del territorio nacional y cubren aproximadamente el 50% del área protegida. Baeza et al, (en prensa), cartografiaron el uso/cobertura del suelo de la unidad geomorfológica “Sierras del Este” con especial énfasis en dos comunidades de pastizales naturales (pastizal de Sierras 1 y 2) descritas por Lezama et al. (en prensa). El Paisaje Protegido Quebrada de los Cuervos se encuentra comprendido en dicha unidad geomorfológica. (Figura 1)

Por otro lado, la región de la cuenca de los arroyos Laureles y Cañas, ubicada entre los $31^{\circ}10'05''$ - $31^{\circ}28'30''$ de latitud Sur y $55^{\circ}46'41''$ - $56^{\circ}11'01''$ de longitud Oeste, comprende un territorio de aproximadamente 62.500 hectáreas situado en la región Noreste de Uruguay. Se caracteriza por presentar un mosaico de pastizales naturales (aproximadamente 60% del área) en un gradiente de meso-xerofíticos a meso-hidrofíticos con bosques nativos de quebrada y galería. Altesor et al, (2009) caracterizaron el uso/cobertura del suelo con especial énfasis en la heterogeneidad de los pastizales naturales presentes en el área. Identificaron tres tipos de pastizales: a) Pastizales mesohidrofíticos, b) Pastizales mesofíticos y c) Pastizales mesoxerofíticos con arbustos (Figura 1).

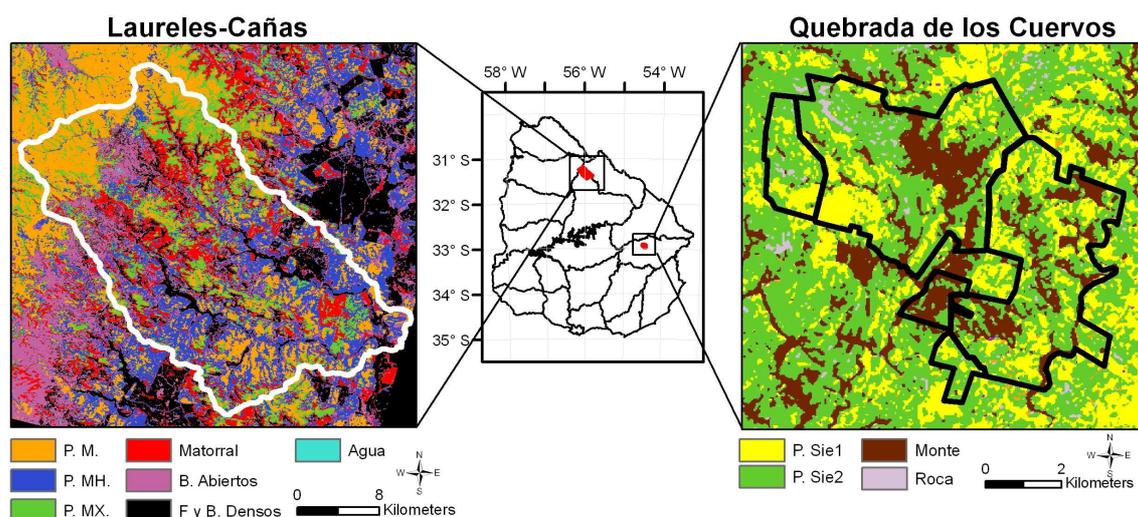


Figura 1: Mapas de coberturas y usos del suelo correspondientes a las áreas protegidas utilizadas para el estudio. A la izquierda el Área de planificación Laureles – Cañas. P.M: Pastizal Mesofítico; P.MH: Pastizal Mesohidrofítico; P.MX: Pastizal Mesoxerofítico con Arbustos. A la derecha el Paisaje Protegido Quebrada de los Cuervos. P. Sie 1: Pastizal de Sierras 1; P. Sierras 2: Pastizal de Sierras 2.

2.2 Información espectral

El estudio del funcionamiento de los ecosistemas se basó en el análisis de datos espectrales aportados por imágenes de satélite. Las imágenes utilizadas fueron provistas por el sensor MODIS (compuestas de 16 días y resolución espacial de 250 m) correspondientes al Índice de Vegetación de la diferencia Normalizada (IVN) para el periodo 2001 - 2009. Este índice permite monitorear la actividad fotosintética, la productividad o el índice de área foliar de los ecosistemas para territorios amplios mediante series temporales de imágenes de satélite. Está basado en la propiedad espectral de la vegetación verde de absorber diferencialmente la radiación fotosintéticamente activa. El IVN calcula la diferencia normalizada de la reflectancia entre dos longitudes de onda (rojo e infrarrojo cercano) relacionadas con el proceso de la fotosíntesis (Ecuación 1).

$$IVN = (IR-R) / (IR+R) \quad (1)$$

El IVN muestra una relación estrecha, positiva y lineal con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación verde (fRFA) y por tanto con la productividad (Di Bella et al. 2004).

Las imágenes fueron sometidas a una serie de pre-procesamientos digitales, entre ellos la aplicación de filtros de calidad. Esto permitió obtener imágenes de IVN con muy buena calidad espectral. A partir del IVN se calcularon atributos descriptores utilizados como indicadores integradores del funcionamiento de los ecosistemas: 1) la integral anual del IVN (IVN-I), calculada como el producto del promedio anual del IVN por el número de imágenes compuestas que hay en un año, y es considerado como estimador lineal de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación y por lo tanto estimador de la Productividad Primaria Neta; 2) los valores de máximo (Max) y 3) mínimo (Min) IVN del año, como indicadores de la máxima y mínima actividad fotosintética de los ecosistemas.

2.3 Detección de Tendencias en el funcionamiento ecosistémico

Se buscaron tendencias en la magnitud, estacionalidad y fenología de los atributos, para cada área protegida y sus entornos inmediatos en el periodo 2001–2009, mediante el test de Mann-Kendall. Este test calcula la existencia de una tendencia monótona en el tiempo basándose en el estadístico tau de Kendall. Aunque podrían utilizarse otro tipo de test, como una simple regresión lineal entre los valores medios anuales y el año, el de Mann-Kendall es un test no-paramétrico, basado en rangos, y que resulta robusto frente a valores perdidos, la no normalidad y heterocedasticidad de los datos, y la autocorrelación temporal. El test se realizó con el software MATLAB, y para cada píxel se obtuvo la pendiente de las tendencias mediante el método no-paramétrico de Sen, y la significancia de esa pendiente (p-valor) mediante el test de Mann-Kendall. Se consideraron como tendencias significativas aquellas con un p-valor menor o igual que 0.05. Los resultados fueron visualizados en una imagen generando “mapas del cambio” en las áreas protegidas y sus zonas adyacentes para cada uno de los atributos.

2.4 Detección de Anomalías espaciales en el funcionamiento ecosistémico

Debido a la alta correlación que existe entre el IVN y la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa (fRFA) se optó por analizar exclusivamente las anomalías en términos de fRFA. De esta manera se aprecia el resultado con un significado biológico más claro. Para la identificación de las anomalías espaciales en este atributo se ha recurrido a información sobre los tipos de usos / coberturas del suelo para el “Paisaje protegido Quebrada de los Cuervos” y para la región de planificación “Laureles-Cañas”. Para el PPQC se

seleccionaron las dos comunidades de pastizales cartografiadas por Baeza et al, (en prensa) y para el área de planificación “Laureles-Cañas” se escogieron los tres tipos de pastizales descritos por Altesor et al, 2009. Para cada tipo de cobertura se seleccionó una muestra al azar de píxeles que cumplieran con dos condiciones: inclusión completa dentro de un tipo de vegetación, y localización alejada de la zona limítrofe con otros tipos de vegetación. El objetivo de esta muestra es establecer la variabilidad característica de la variable funcional (fRFA-I) para un determinado ecosistema estableciendo el rango usual. Los valores fuera de este rango serán considerados anómalos espacialmente. Como resultado se obtiene un mapa de anomalías espaciales en donde queda explícito aquellas zonas con un comportamiento anómalo en el atributo considerado.

3. Resultados y Discusión

3.1 Tendencias del funcionamiento ecosistémico

Los resultados de las tendencias temporales de los indicadores del funcionamiento ecosistémico analizados (IVN-I, Max y Min) para el area protegida Laureles-Cañas y para Paisaje protegido Quebrada de los Cuervos junto con sus respectivas zonas adyacentes se muestra en la Figura 2. A partir de los análisis de regresión de las trayectorias temporales de cada uno de los indicadores del funcionamiento se obtienen los valores de las pendientes que indican si las tendencias fueron positivas (pendiente $>$ 0), negativas (pendiente $<$ 0) o neutras (pendiente $=$ 0) para cada uno de los píxeles analizados. Este análisis se muestra en los mapas de la Figura 2. Los resultados obtenidos a partir de la tendencia del IVN-I para Laureles y zonas adyacentes muestran que en la serie temporal analizada se ha producido un decremento de la Productividad Primaria Neta, al apreciarse un elevado porcentaje de píxeles con tendencia negativa en el test de Mann - Kendall. Esto podría estar asociado a algunas de las potenciales amenazas como el sobrepastoreo por ganadería y la quema intencional, que fueron descritas por Altesor et al. (2009) para esta área. La presencia de tendencias positivas fuera del área protegida parece estar relacionada fundamentalmente con el avance de las plantaciones forestales. El análisis para las tendencias en los valores máximos y mínimos del IVN muestran que el decremento en el IVN-I se debe al decremento en los valores máximos y mínimos para los 9 años de estudio. La presencia de tendencias negativas en ambos atributos denota un decremento en la estacionalidad de ésta área protegida.

Por otro lado, los resultados de las tendencias a partir del test de Mann-Kendall para el Paisaje protegido Quebrada de los Cuervos y zonas adyacentes se muestra en la Figura 2. Puede observarse que la mayoría de los píxeles dentro del área presentaron pendientes iguales a cero para la serie temporal considerada, o sea que no presentan tendencia. Este resultado estaría significando que la Productividad Primaria Neta se mantuvo constante y estable a lo largo de los 9 años dentro del área. Por otro lado, se observa que los pocos píxeles con tendencia negativa dentro del área presentan una distribución agrupada (no al azar). Estas tendencias negativas podrían estar asociadas al sobrepastoreo. En cuanto a las tendencias fuera del área mostradas en la Figura 2 se observa que la mayoría de los píxeles no presentan tendencias y aquellos que lo hacen indican una disminución del IVN-I a lo largo de la serie temporal. Esto podría estar relacionado con las deforestaciones realizadas y la preparación de terrenos para la forestación, así como también sobrepastoreo y quemadas intencionales. El análisis para las tendencias en los valores máximos y mínimos del IVN muestran que el decremento en el IVN-I se debe sobre todo a los decrementos de los valores mínimos, más que a un decremento en los valores máximos. La presencia de tendencias negativas en los valores mínimos y tendencias neutras en los valores máximos nos habla de un incremento en la estacionalidad.

3.2 Anomalías espaciales del funcionamiento ecosistémico

Para el área protegida Laureles-Cañas, los resultados obtenidos muestran que los Pastizales Mesoxerofíticos con arbustos presentaron menores valores de fPAR-I en comparación con el resto de los pastizales. Por ello es que centraremos en esta clase como prioritaria a la hora de realizar cualquier acción de manejo. La Figura 3 muestra el mapa de anomalías espaciales en el fPAR-I para el pastizal Mesoxerofítico con arbustos. El área ocupada por anomalías negativas y positivas (comportamiento por debajo o por encima de lo “usual”) fue de 20.99% y 20.09% respectivamente, mientras que las áreas sin anomalía ocuparon el 58.92%.

Por otro lado, para el Paisaje Protegido Quebrada de los Cuervos, los resultados obtenidos muestran que el Pastizal Sierras 2 presentó mayores valores de fPAR-I y menor variabilidad (4.17 ± 0.35) que el Pastizal Sierras 1 (3.35 ± 0.60). Con estos resultados nos centraremos en la clase de Pastizal de Sierras 1 como zonas donde es más necesaria una la aplicación de acciones de manejo. La Figura 3 muestra el mapa de anomalías espaciales en el fPAR-I para el Pastizal de Sierras 1. Las áreas con anomalías negativas y positivas ocuparon el 24% y 20%, mientras que las áreas sin anomalía ocuparon el 56%.

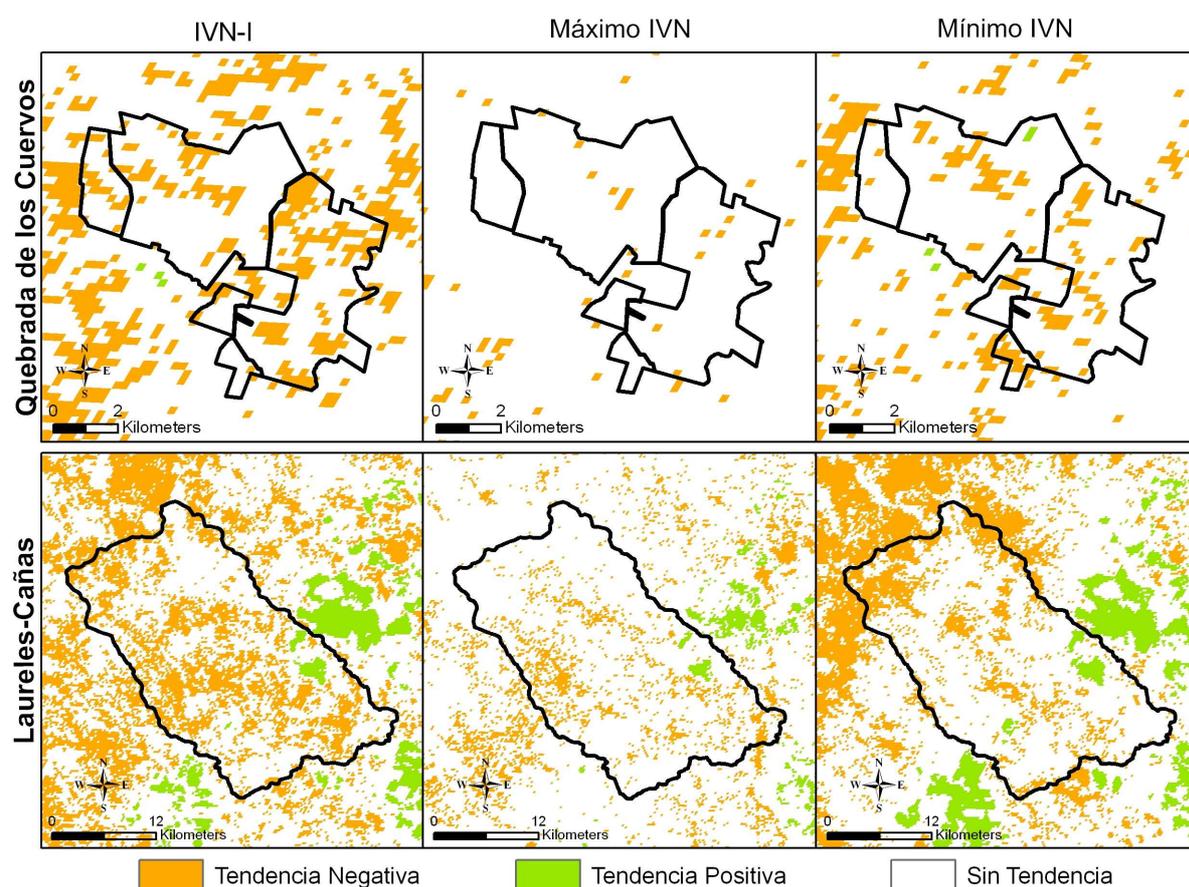


Figura 2: Mapas de tendencias de los 3 atributos derivados del IVN para las áreas protegidas “Quebrada de los Cuervos” y “Laureles-Cañas” y sus respectivas zonas adyacentes en el periodo 2001 – 2009. Los mapas muestran las tendencias significativas para integrar anual del IVN; Máximo y Mínimo IVN.

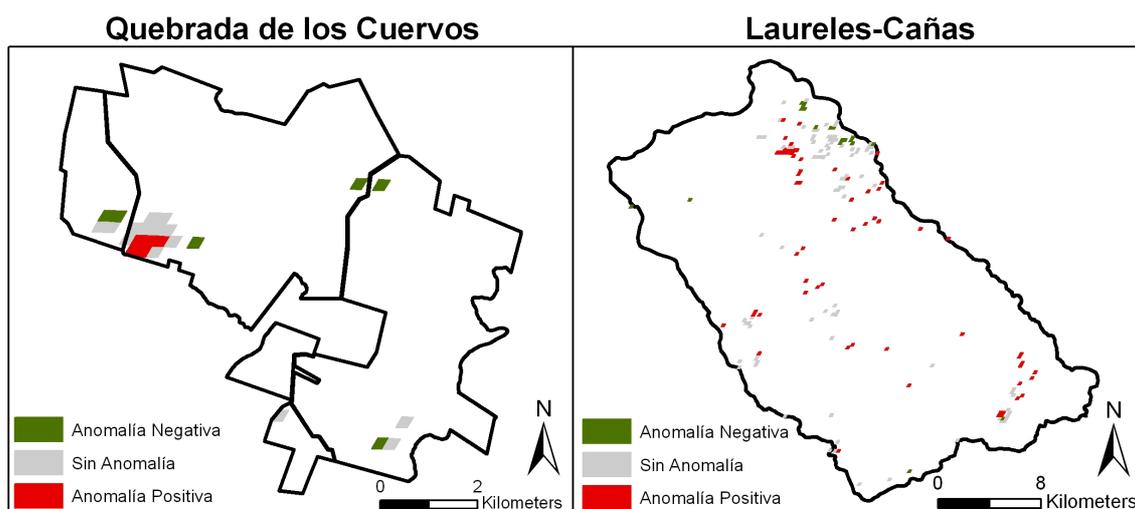


Figura 3: Mapa de anomalías espaciales en la Integral anual de la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa (fRFA-I) para los Pastizales de Sierras 1 en el Paisaje Protegido Quebrada de los Cuervos y para los Pastizales Mesoxerofíticos con Arbustos en el área protegida Laureles-Cañas. Sin Anomalia (gris), los valores se encuentra dentro del intervalo usual; Anomalia negativa (verde), los valores se encuentran por debajo del intervalo usual y Anomalia Positiva (rojo), los valores se encuentran por encima del intervalo usual.

4. Conclusiones

El presente trabajo aporta información científica sólida acerca de la situación actual y las tendencias temporales en el funcionamiento ecosistémico de dos áreas protegidas de Uruguay. El área protegida Laureles-Cañas presentó mayor número de tendencias negativas y positivas en relación al Paisaje Protegido Quebrada de los Cuervos. Estas diferencias pueden deberse a que el área de Laureles-Cañas recientemente está en proceso de incorporación al Sistema Nacional de Áreas Protegidas, en cambio dentro del área de la Quebrada de los Cuervos existe una zona con más de 15 años de protección.

El desarrollo de este tipo de seguimiento que permite monitorear de manera directa la salud ecosistémica podría ayudar a detectar de manera temprana y espacialmente explícita cambios funcionales antes que se produzcan alteraciones estructurales de menor probabilidad de reversión. También hace posible realizar comparaciones cuantitativas del nivel de afectación de servicios ecosistémicos clave como la Productividad Primaria Neta entre áreas protegidas y bajo otros tipos de uso. Esta información permitirá analizar y monitorear el efecto de diferentes medidas de manejo constituyendo una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de las áreas protegidas.

5. Bibliografía

Alcaraz-Segura, D.; Cabello, J.; Paruelo, J. M.; Delibes, M., Assessing protected areas to face environmental change through satellite-derived vegetation greenness: The case of the Spanish National Parks. **Environmental Management**, 43, (1), p. 38-48, 2009.

Alcaraz-Segura, D.; Paruelo, J. M.; Cabello, J., Baseline characterization of major Iberian vegetation types based on the NDVI dynamics. **Plant Ecology**, 202, p. 13-29, 2009.

Altesor, A.; Baeza, S.; Bagnato, C.; Paruelo, J.M.; Pezzani, F. Caracterización de las unidades de pastizal del área de planificación Laureles-Cañas. Sistema Nacional de Áreas Protegidas, 2009.

Baeza, S.; Gallego, F.; Lezama, F.; Altesor, A.; Paruelo, J.M. Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. En: Altesor, A.; Ayala, W.; Paruelo, J.M. (Org.). Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA, INIA. (en prensa)

Costanza, R.; d'Arge, R.; de Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R. V.; Paruelo, J. M., The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, 387, 253-260, 1997.

Di Bella, C. M.; Rebella, C. M.; Paruelo, J. M., Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. **International Journal of Remote Sensing**, 21(4), p. 791-797, 2000

Di Bella, C.M.; Paruelo, J.M.; Becerra, J.E.; Bacour, C. and Baret, F. Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: experimental and modelling evidences. **International Journal of Remote Sensing** 25: p. 5415-5427 2004.

Lezama, F.; Altesor, A.; Pereira, M.; Paruelo, J.M. Descripción de la heterogeneidad florística en los pastizales naturales de las principales regiones geomorfológicas de Uruguay. En Altesor, A.; Ayala, W.; Paruelo, J.M. editores. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA, INIA. (en prensa)

Margules, C. R.; Pressey, R. L., Systematic conservation planning. **Nature**, 405, (6783), p. 243-253, 2000.

Milchunas, D. G.; Lauenroth, W. K. Inertia in plant community structure: State changes after cessation of nutrient enrichment stress. **Ecological Applications** 5, p. 1195-2005, 1995.

Nemani, R.; Hashimoto, H.; Votava, P.; Melton, F.; Wang, W.; Michaelis, A.; Mutch, L.; Milesi, C.; Hiatt, S.; White, M., Monitoring and forecasting ecosystem dynamics using the Terrestrial Observation and Prediction System (TOPS). **Remote Sensing of Environment**, 113, (7), p. 1497-1509, 2009

Paruelo, J.M.; Jobbagy, E.G.; Sala O.E. Current distribution of functional types in temperate South America. **Ecosystems**. 4. p. 687-698. 2001

Pettorelli, N.; Vik, J. O.; Mysterud, A.; Gaillard, J. M.; Tucker, C. J.; Stenseth, N. C., Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. **Trends in Ecology & Evolution**, 20, (9), p. 503-510, 2005.