



## CAMBIOS RECIENTES DEL USO DEL SUELO EN LA CUESTA BASÁLTICA DEL URUGUAY

*Gonzalo Rama<sup>1\*</sup>, Felipe Lezama<sup>1</sup> & Santiago Baeza<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Universidad de la Republica, Facultad de Agronomía, Departamento de Sistemas Ambientales, CP 12900, Av. Garzón 780, Montevideo, Uruguay.

E-mails: agonzalorama@gmail.com (\*autor correspondiente); flezama@fagro.edu.uy; sbaeza@fagro.edu.uy

---

**Resumen:** El territorio uruguayo ha sufrido una de las mayores tasas de cambio de la cobertura original en los últimos años a nivel mundial. La sustitución del pastizal natural por agricultura y forestación es el principal fenómeno que afecta al recurso forrajero más importante del país. Las caracterizaciones del uso del suelo a nivel nacional son un insumo escaso y básico para gestionar de forma sustentable esta cobertura vegetal. Las descripciones espacialmente explícitas de los pastizales del Uruguay generalmente son de baja resolución espacial y agrupan bajo una única clase de “pastizal” a comunidades vegetales heterogéneas desde el punto de vista florístico o fisonómico. En este trabajo se mapean dos comunidades de pastizal natural y otros usos/coberturas del suelo de la región basáltica del Uruguay, a partir de la clasificación supervisada de imágenes Landsat 8 y se analizan sus cambios en el tiempo respecto a otras fuentes de información. El 75% del área de estudio correspondió a pastizales naturales, (25% ralos y 50% densos), el 13,3% a agricultura, el 3,6% forestación y el 3,1% a monte nativo. La clasificación realizada tuvo una exactitud global de 86% y errores de comisión/omisión bajos y distribuidos equitativamente. La comparación con un mapa del 2009 de la misma zona mostró una reducción del 10% en la superficie con pastizales naturales, junto con aumentos del 133% de la superficie bajo uso agrícola, 84,8% en la superficie forestal y, sorpresivamente, 88,9% en la superficie con monte nativo. La reducción en superficie de las dos comunidades de pastizales fue semejante, y no se encontró una relación particular entre la superficie perdida por estas respecto a la superficie ganada por los diferentes remplazos (agricultura, forestación).

**Palabras clave:** cartografía; comunidades; pastizales; teledetección.

**RECENT LAND USE CHANGES IN THE CUESTA BASALTICA OF URUGUAY.** Uruguay has suffered one of the highest rates of land use change worldwide. Natural grasslands, the main forage resource of the country, are being threatened by their substitution for agriculture and afforestation. Land use maps, a fundamental input for sustainable management of natural grasslands, are particularly scarce. Spatially explicit descriptions of Uruguayan grasslands generally have low spatial resolution and group, under a single "grassland" class, floristic or physiognomic heterogeneous plant communities. In this work, we map the two main grassland communities and other land uses of Uruguayan basaltic region, through the supervised classification of Landsat 8 images. Additionally, we evaluate the land use changes by comparing our map with other sources. 75% of study area corresponded to natural grasslands (25% "sparse grasslands" and 50% "dense grasslands"), 13.3% to agriculture, 3.6% afforestation and 3.1% native forest. Supervised classification had an overall accuracy of 86% and low commission/omission errors,

evenly distributed. Comparison with a 2009 map showed a 10% reduction in natural grasslands, and increases of 133% in agriculture, 84.8% in afforestation, and, surprisingly, 88.9 in native forest. The area reduction of grassland communities was similar. No relationship was found between the area lost by different grassland communities and the area gained by the different replacements (agriculture, afforestation)

**Keywords:** communities; grasslands; mapping; remote sensing.

## INTRODUCCIÓN

La superficie total del Uruguay está comprendida en la región de los pastizales del Río de la Plata, una de las zonas de pastizales naturales más extensas del mundo (Soriano 1991). En los últimos años el avance de la agricultura originó una de las mayores tasas de cambio de la cobertura original a nivel mundial (Baldi & Paruelo 2008, Vega *et al.* 2009, Graesser *et al.* 2015, Volante *et al.* 2015). La actividad agrícola intensiva genera una cascada de impactos a nivel ecosistémico, alterando la estructura (distribución espacial, grado de fragmentación) y el funcionamiento del ecosistema natural, (modificando los flujos de materia y energía de sus componentes (Townshend 1992), afectando los servicios ecosistémicos que les proveen a los humanos, perjudicando la calidad de vida y comprometiendo su perdurabilidad (Foley *et al.* 2005, Modernel *et al.* 2016).

En este contexto, Uruguay es el país de la región con mayor porcentaje de cobertura de pastizales naturales (60%; Baeza *et al.* 2014) y en estos se encuentra el 80% de la riqueza de especies vegetales registradas en Uruguay (Rodríguez *et al.* 2003). La caracterización estructural y funcional de estos pastizales, así como la descripción de su variación espacial y temporal, son insumos necesarios para definir políticas nacionales de uso de este recurso natural (Lavorel *et al.* 1997, Golluscio *et al.* 1998, Altesor 2010), tanto para planificar desarrollos agropecuarios, impulsar líneas de investigación o elaborar políticas destinadas a su conservación (Hansen *et al.* 2000).

A pesar de su importancia ecológica y económica las caracterizaciones del uso/cobertura del suelo en Uruguay son escasas. Históricamente el censo ha sido la herramienta oficial utilizada para estimar la superficie de los tipos de uso/cobertura del suelo, este implica un el

relevamiento exhaustivo y completo de todos los productores agropecuarios nacionales a través de entrevistas. Sin embargo, su resolución espacial de unidad censal (unidad administrativa en que la información es provista, tamaño promedio aproximado de 90.000 ha) y su baja frecuencia en el relevamiento (más de 10 años), son limitantes para responder a cambios acelerados del uso/cobertura de la tierra como los que están ocurriendo en la región en los últimos 15 años (Paruelo *et al.* 2006, Baldi & Paruelo 2008). Adicionalmente, el censo agropecuario agrupa bajo una misma clase, definida como “campo natural”, a comunidades vegetales heterogéneas desde el punto de vista florístico, fisonómico, o en estado de transición. Por ejemplo, dentro de esta clase se encuentran los pastizales naturales junto con el tapiz vegetal post agrícola de muy distinto tipo y/o la cobertura original sembrada con especies no nativas en años anteriores.

La utilización de las imágenes de satélite ha ayudado a sortear estas limitantes y ha sido utilizada como insumo base para estudiar características estructurales y funcionales de los pastizales naturales del Río de la Plata (Paruelo *et al.* 2006, Baldi & Paruelo 2008, Baeza *et al.* 2010, 2014). Baeza *et al.* (2011), realizan clasificaciones supervisadas de imágenes satelitales con censos fitosociológicos del pastizal natural realizados a campo, y logran determinar la distribución espacial de distintas unidades de pastizal natural, de cuatro regiones geomorfológicas mayoritariamente ganaderas del Uruguay. La clasificación correspondiente a la Cuesta Basáltica discrimina dos unidades de pastizal natural que agrupan a tres comunidades definidas por Lezama *et al.* (2006) para esta región: Pastizales ralos y Pastizales densos. Además se representan otros usos/coberturas del suelo (cultivo de verano, cultivo de invierno, dobles cultivo, suelo desnudo,

monte nativo y forestación). Dicho mapa cubre el 67% de la superficie de la región y fue generada a partir de imágenes de dos fechas del año 2009.

En este trabajo se cartografían las mismas dos comunidades de pastizal natural y los tipos de cobertura más importantes de la región de la cuesta basáltica, a partir de la combinación de imágenes satelitales, y el relevamiento a campo de comunidades de pastizal natural. Respecto a su antecedente directo (Baeza *et al.* 2011), nuestro trabajo actualiza la información de uso/cobertura del suelo al año 2015, a la vez que amplía el área descripta a la totalidad de la región. Además, analiza el cambio en el uso/cobertura del suelo en el periodo 2009 a 2015, comparando con el antecedente de cartografía mencionado (Baeza *et al.* 2011) y con resultados del censo agropecuario 2011 (MGAP-DIEA 2011).

## MATERIAL Y MÉTODOS

### *Área de estudio*

La región del Basalto o Cuesta Basáltica se encuentra en la mitad norte de Uruguay, en su porción central, entre los 31°35'–32°12'S y los 56°01'–57°02'W (Panario 1987). Ocupa una superficie aproximada de 4.39 millones de hectáreas (21% de la superficie total del Uruguay). El clima de la región se caracteriza por ser templado a subtropical subhúmedo, con una precipitación media anual de 1322 mm y una temperatura media de 18,1°C (Estación Meteorológica Salto, normales climatológicas 1961-1990) (INUMET 2018).

Los pastizales naturales constituyen el tipo de vegetación dominante, ocupando el 91,5% de la superficie (Baeza *et al.* 2011), en donde se desarrolla la ganadería extensiva de bovinos y ovinos como principal actividad productiva de la región (DIEA-MGAP 2016). La heterogeneidad florística de los pastizales de la región ha sido descrita por Lezama *et al.* (2006) y consiste en tres comunidades de pastizal: pastizales meso hidrofíticos, pastizales meso xerofíticos y estepas de litófitas. Estas comunidades presentan fisonomías diferentes, conjuntos de especies indicadoras características, y se asocian a diferentes posiciones en el paisaje y tipos de suelo. En este trabajo, al igual que en Baeza *et al.* (2011), se cartografían dos

comunidades de pastizal: los pastizales ralos, consistentes en pastizales con baja cobertura vegetal sobre suelos superficiales (incluyendo en esta denominación los pastizales meso xerofíticos y las estepas de litófitas) y pastizales densos, pastizales de alta cobertura vegetal sobre suelos medios y profundos (coincidentes con los pastizales mesohidrofíticos descritos por Lezama).

### *Procesamiento de imágenes*

Se realizó una clasificación supervisada de imágenes Landsat 8. Fueron utilizadas dos fechas, primavera 2014 y verano 2015, para captar momentos contrastantes en la fenología de la vegetación (Guerschman *et al.* 2003). Se seleccionaron cinco escenas que cubren la totalidad de la superficie de la región, tres escenas pertenecientes al path 224 (224/081, 224/082 y 224/083) correspondientes a los días 07/09/2014 y 14/02/2015, y dos escenas al path 225 (225/081 y 225/082), correspondientes a los días 29/08/2014 y 5/02/2015 (las imágenes pertenecientes a un mismo “path” o pasada del satélite corresponden al mismo día y son adquiridas por el sensor con pocos minutos de diferencia). Se seleccionaron las imágenes de las fechas más cercanas a las campañas de campo, con la menor presencia de nubosidad y que fueran lo más próximas posibles entre path, de forma de minimizar las diferencias en el estado fenológico de los diferentes usos/coberturas del suelo. Las imágenes de Landsat 8 se descargaron de sitio web oficial de la United States Geological Survey ([http://eros.usgs.gov/#/Find\\_Data/Products\\_and\\_Data\\_Available/Satellite\\_Products](http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/Satellite_Products)). Todas las imágenes fueron sometidas a correcciones radiométricas y atmosféricas de forma de hacer comparable la información espectral en el tiempo y en el espacio (Chuvienco 2002). La corrección radiométrica de las imágenes se realizó utilizando la fecha (día juliano), el ángulo de elevación solar y la distancia tierra-sol. La corrección atmosférica de las imágenes se realizó separando el efecto producido por la dispersión Rayleigh de acuerdo a lo propuesto por Chander *et al.* (2007). Se construyó un mosaico de todas las escenas pertenecientes a un mismo path y un compuesto multitemporal o Stack (superposición de imágenes de diferentes fechas), con la información radiométrica las

bandas 2,3,4,5,6 y 7 de primavera y verano (12 bandas).

### ***Obtención de datos de campo***

La ruta de muestreo de los datos de campo se diseñó con un sistema de información geográfico, de forma que pase por todas las escenas y se acote a la región de estudio. En la ruta se relevaron parches homogéneos de los dos tipos principales de pastizal presentes en la región o con un mismo uso/cobertura del suelo y se registró con GPS. Se realizaron seis campañas de campo en los meses de agosto y setiembre del 2015, las clases registradas a campo fueron: pastizal ralo, pastizal denso, cultivo verano, cultivo de invierno, pradera implantada, forestación, monte nativo, suelo desnudo (de origen agrícola), rastrojo, urbano y agua.

Se digitalizaron los límites de los lotes prediales que incluían los registros de campo y se formaron 1499 polígonos en total, 611 se utilizaron para el path 225 y 1363 para el path 224 (405 lotes se encuentra en la zona de intersección de ambos paths). Los polígonos con registro de actividad agrícola fueron reasignados con una clase interpretada y definitiva, que contempla el uso en la fecha de primavera y verano principalmente. Se utilizó una realce en falso color compuesto (RGB: 543) de las imágenes disponibles de la campaña agrícola anterior junto con los datos de campo actuales disponibles. Las clases asignadas fueron cultivo de verano, cultivo de invierno, doble cultivo (cuando existía cultivo en ambas fechas) y suelo desnudo cuando la cobertura era rastrojo de cultivo y/o se había aplicado herbicida, en ambas fechas.

Las clases finales establecidas fueron pastizal ralo, pastizal denso, cultivo de verano, cultivo de invierno, doble cultivo, forestación, monte nativo, suelo desnudo, urbano y agua. Los polígonos se dividieron al azar en dos subconjuntos. El 70% de los polígonos se utilizaron para entrenar el algoritmo de clasificación y el 30% restante se utilizó como verdad de campo para construir la matriz de contingencia y evaluar el resultado de las clasificaciones obtenidas.

### ***Clasificación supervisada***

El proceso de obtención del mapa implicó la clasificación por separado de los compuestos

multitemporales correspondientes a cada path, la unión a posteriori de estas clasificaciones independientes y recortar con el límite de la región geomorfológica Cuesta Basáltica, propuestos por Panario (1987). Se utilizó la información espectral de 12 bandas reflectivas de todos los píxeles incluidos en los polígonos de entrenamiento y máxima verosimilitud como regla de decisión para clasificar todos los píxeles del área de estudio (Lillesand & Kiefer 1994). A la clasificación supervisada obtenida se le aplicó un filtro modal móvil de 3 x 3 píxeles, para eliminar el ruido típico de las clasificaciones conocido como efecto sal y pimienta. (ej.: lotes clasificados como un tipo de cultivo que en su interior presentan algunos píxeles clasificados como otra cobertura).

Se realizó la evaluación del mapa final y de los mapas resultantes de cada path (Material suplementario 1), mediante la construcción de una matriz de contingencia entre el resultado de la clasificación y la información de campo reservada a tales efectos. A partir de la matriz se calculó el acierto global, el coeficiente Kappa, las exactitudes del productor y usuario. El coeficiente Kappa mide la diferencia entre la clasificación realizada y la esperada simplemente por azar. Un valor de Kappa igual a un indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a cero sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar. La precisión del productor representa la probabilidad de que un píxel de referencia de una determinada cobertura sea correctamente clasificado. La precisión del usuario representa la probabilidad de que un píxel clasificado represente a esa categoría en los datos utilizados como referencia.

El mapa final cuenta con tres clases adicionales superpuestas sobre el resultado de la clasificación supervisada: agua, nubes y zonas urbanas. Las clases agua y nubes se obtuvieron aplicando una máscara construida con el software Fmask 3.1. (Zhu *et al.* 2015), el cual utiliza información radiométrica de imagen para generar una máscara de agua, nubes y sombras. La clase urbano se obtuvo a partir de una máscara, generada mediante un vector de localidades, pueblos y ciudades del Uruguay del año 2007, obtenida de la Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay (<http://ide.uy/>). Dado que la información para generar esta categoría es anterior a la generación

del mapa, en este trabajo asumimos que el área urbana no presentó modificaciones importantes entre 2007 y 2015. El procesamiento digital de las imágenes y las clasificaciones se llevó a cabo mediante el software ENVI 4.6-IDL 7.0 y las operaciones SIG con el software ArcGis 10.

### **Comparación con otras fuentes de información**

Se estudió el cambio en el uso/cobertura del suelo comparando el mapa final con dos fuentes de datos obtenidas con metodologías distintas de años previos. Por un lado, el mapa resultante se comparó con los datos del Censo General Agropecuario del Uruguay, realizado por Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca-Dirección Estadística Agropecuaria (MGAP-DIEA 2011). Las comparaciones fueron realizadas para cada una de las unidades censales cuya superficie estaba mayoritariamente cubierta por el mapa 2015 (al menos un 85%). Para esto se reagruparon las categorías originales del censo y de la clasificación y se expresaron como porcentaje de la unidad censal. La clase Agrícola incluye las categorías del censo 2011 cultivos cerealeros industriales y cultivos forrajeros anuales, y en el caso de los mapas producidos por clasificación de imágenes de satélite, las clases cultivo de verano, cultivos de invierno, doble cultivo y suelo desnudo. La clase pastizal incluye las categorías del censo, campo natural, campo natural sembrado en cobertura y campo natural fertilizado y en las clasificaciones, las clases pastizales ralos y pastizales densos.

Por otro lado, una región del mapa final fue comparado con un mapa de pastizales y uso/cobertura del suelo de una región parcial del basalto, obtenidos mediante una clasificación supervisada de imágenes Landsat 5 de dos fechas (verano y primavera) del año 2009 (Baeza *et al.* 2011). La región parcial incluyó a 39 unidades censales. Las tres fuentes de información (mapa 2009, censo 2011 y mapa 2015 permiten analizar el cambio en una secuencia de datos de uso/cobertura del suelo en esta región del país.

Se calculó el cambio relativo en la superficie de las clases Pastizales Naturales, Agricultura, Forestación y Monte Nativo para cada una de las 39 unidades censales incluidas en el mapa 2009 y para toda la superficie cubierta por cada categoría. El cambio relativo de cada tipo de cobertura se calculó utilizando la siguiente ecuación: Cambio

relativo:  $(\Delta_{\text{Relativo}}) = ((\text{Área}_{\text{final}} - \text{Área}_{\text{inicial}}) / \text{Área}_{\text{inicial}}) * 100$ , según (Baldi & Paruelo 2008). Se tomaron como área inicial las registradas en el mapa 2009 y en final las obtenidas en el mapa 2015.

Adicionalmente, se compararon las superficies de los diferentes usos/cobertura del suelo y se analizó el cambio del 2009 al 2015 por unidad censal. La relación existente entre el porcentaje de la unidad censal cubierta por cada categoría en cada fecha fue comparada con la línea 1-1 (ausencia de cambio), junto a un análisis de pendientes para observar la relación del cambio en función de la superficie inicial.

Finalmente, se analizó la relación entre el cambio relativo de las comunidades de pastizal entre sí y de cada una con la agricultura y la forestación mediante modelos de regresión. El cambio relativo de las comunidades de pastizal para cada unidad censal, fue comparado mediante test de T pareado.

## **RESULTADOS**

La clasificación obtenida perteneciente a toda la región cuesta basáltica abarcó una superficie aproximada de 4,5 millones de hectáreas, de las cuales el 74,7% corresponden a pastizales naturales, el 49,8% a Pastizales densos y 24,8% a ralos (Figura 1). El resto de la superficie correspondió en un 13,3% a agricultura (5,8% Cultivo de verano, 4,3% a Cultivos de invierno, 2,9% a Doble cultivo y 0,2% a Suelo desnudo), mientras que el 3,6% a Forestación, el 3,1% a Monte nativo, el 2,5% a cuerpos de agua, 2,9% a nubes y la clase urbano fue marginal.

La matriz de contingencia del mapa final reveló muy buenos resultados, con una exactitud global del 86% y un coeficiente kappa de 0,83 (Tabla 1). El mapa presentó buenos resultados de exactitud (usuario y productor) para todas las categorías. Las clases mejor discriminadas fueron forestación y monte nativo con exactitudes de usuario y productor mayores al 96%. Las clases peor discriminadas fueron las diferentes comunidades de pastizal (presentando errores de omisión y comisión de 13% y 18% entre ellas) y, en menor medida, los pastizales superficiales con cultivos de invierno (9,8%) (Tablas 1 y 2).

**Tabla 1.** Matriz de contingencia entre los resultados de la clasificación final obtenida y los datos de campo expresada en a) porcentajes, y b) número de píxeles. Las clases corresponden a C.Ver = Cultivos de verano, C.Inv = Cultivos de invierno, D.Cult = Doble cultivo, P.Ralo = Pastizal ralo, P.Denso = Pastizal denso, S.Desn = Suelo desnudo, Forest = Forestación y Monte = Monte nativo.

**Table 1.** Contingency matrix among the classification results and field data expressed by percentage (a) and pixel count (b). Legend of the classes: C.Ver = Summer crops, C.Inv = Winter crops, D.Cult = Double Crops, P.Ralo = "Ralo" grassland, P. Denso = "Denso" grassland, S.Desn = Bare soil, Forestación = Afforestation and Monte = Natural forest.

| a)           | Verdad de campo |             |             |             |             |             |             |             | Total      |
|--------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
|              | C.Ver           | C.Inv       | D.Cult      | Forest      | Monte       | P.Ralo      | P.Denso     | S.Desn      |            |
| C.Verano     | <b>84,7</b>     | 2,5         | 9,1         | 0,7         | 0,6         | 0,1         | 0,1         | 12,0        | 25,4       |
| C.Invierno   | 0,8             | <b>84,2</b> | 7,2         | 0,2         | 0,1         | 1,0         | 0,6         | 1,3         | 6,8        |
| D.Cultivo    | 12,7            | 1,7         | <b>82,4</b> | 0,1         | 0,4         | 0,0         | 0,2         | 0,0         | 14,4       |
| Forestación  | 0,1             | 0,2         | 0,0         | <b>97,7</b> | 0,8         | 0,0         | 0,8         | 0,0         | 11,0       |
| Monte        | 0,0             | 0,0         | 0,0         | 0,6         | <b>96,4</b> | 0,0         | 0,0         | 0,0         | 3,1        |
| P.Ralo       | 0,3             | 9,8         | 0,1         | 0,3         | 0,7         | <b>80,8</b> | 13,0        | 1,9         | 13,9       |
| P.Denso      | 0,6             | 0,9         | 0,8         | 0,3         | 1,0         | 18,1        | <b>85,0</b> | 0,4         | 22,8       |
| S.Desnudo    | 0,7             | 0,8         | 0,2         | 0,1         | 0,0         | 0,1         | 0,3         | <b>84,4</b> | 2,6        |
| <b>Total</b> | 100             | 100         | 100         | 100         | 100         | 100         | 100         | 100         | <b>100</b> |

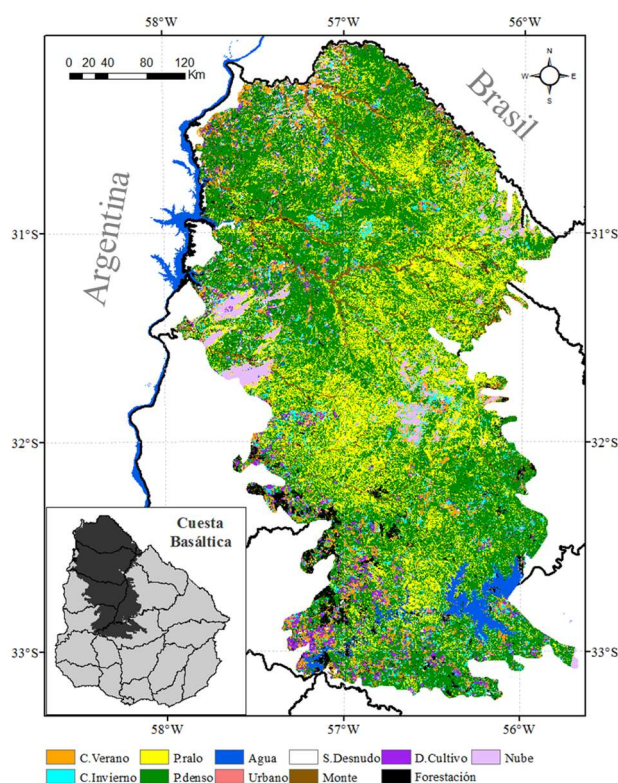
| b)           | Verdad de campo |             |             |             |             |             |              |             | Total        |
|--------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|              | C.Ver           | C.Inv       | D.Cult      | Forest      | Monte       | P.Ralo      | P.Denso      | S.Desn      |              |
| C.Verano     | <b>20688</b>    | 138         | 1027        | 64          | 16          | 6           | 23           | 270         | 22232        |
| C.Invierno   | 198             | <b>4622</b> | 820         | 17          | 4           | 107         | 127          | 29          | 5924         |
| D.Cultivo    | 3113            | 94          | <b>9345</b> | 13          | 11          | 0           | 37           | 0           | 12613        |
| Forestación  | 34              | 8           | 5           | <b>9422</b> | 23          | 0           | 158          | 1           | 9651         |
| Monte        | 0               | 0           | 0           | 53          | <b>2677</b> | 0           | 3            | 0           | 2733         |
| P.Ralo       | 76              | 535         | 12          | 30          | 19          | <b>8710</b> | 2690         | 42          | 12114        |
| P.Denso      | 150             | 51          | 89          | 31          | 28          | 1949        | <b>17661</b> | 10          | 19969        |
| S.Desnudo    | 181             | 41          | 25          | 12          | 0           | 9           | 64           | <b>1903</b> | 2235         |
| <b>Total</b> | 24440           | 5489        | 11335       | 9643        | 2778        | 10781       | 20771        | 2255        | <b>87492</b> |

### Cambio en el uso/cobertura del suelo

La comparación de los resultados de este trabajo con otra fuente de datos mostró una disminución de la superficie cubierta con pastizales naturales del orden del 10%. Cuando comparamos con el mapa 2009 la reducción alcanza el 10,1% y cuando comparamos con el censo agropecuario del 2011, la reducción es del 11%. Al limitar el análisis exclusivamente al área del mapa 2009, coincidente en las tres fuentes de

datos, los pastizales naturales disminuyen paulatinamente su área a lo largo del tiempo. Pasaron de ocupar el 91,4% de la superficie en el 2009 a, 90,5% en 2011 y 81,3% en el 2015. Este proceso de disminución de la superficie está explicado principalmente por el aumento del 5,1% del uso agrícola, al aumento del 1% del área forestada y la expansión del monte nativo (1,9%, 2,5% y 3,5% respectivamente; Tabla 3). Al comparar exclusivamente los mapas producto de

clasificaciones de imágenes Landsat se observa una reducción en el entorno del 5% en cada una de las comunidades de pastizal.



**Figura 1.** Mapa de las uso/cobertura del suelo de la región Cuesta Basáltica, Uruguay. Las clases corresponden a C. Verano = Cultivos de verano, C. Invierno = Cultivos de invierno, D. Cultivo = Dobles cultivos, P. ralo = Pastizal ralo, P. denso = Pastizal denso y S. Desnudo = Suelo desnudo.

**Figure 1.** Land use/land cover map for Cuesta Basáltica region, Uruguay. Classes correspond to C. Verano = Summer crops, C. Invierno = Winter crops, D. Cultivo = Double crops, P. ralo = "Ralo" grassland, P. dense = "Denso" grassland and S. Desnudo = Bare soil

El cambio relativo entre 2009 y 2015 dependió de la categoría analizada y presentó una gran variación espacial (Figura 2a-d)). El cambio relativo total en el caso de los pastizales mostró disminuciones promedio de 8,8% (8,6% y 9% para pastizales densos y ralos, respectivamente). Por otro lado, la agricultura aumentó 133%, la forestación 84,8% y el monte 88,9%. Los mayores cambios relativos en la superficie con pastizales naturales ocurrieron en las unidades censales del este de Paysandú, sureste de Salto y este de Artigas (Figura 2a). Los mayores aumentos del área agrícola se registraron al este de Paysandú, sureste

de Salto y sureste de Artigas (Figura 2b) mientras que en el área forestada ocurrieron en el centro y este de Paysandú, suroeste de Tacuarembó y norte de Artigas (Figura 2c). Los mayores cambios relativos en la superficie con monte nativo ocurrieron en noreste de Artigas, este de Salto y Paysandú (Figura 2d).

**Tabla 2.** Exactitud de productor y usuario de cada clase. C.Verano = Cultivos de verano, C.Invierno = Cultivos de invierno, D.Cultivo = Doble cultivo, P.Ralo = Pastizal ralo, P.Denso = Pastizal denso, S.Desnudo = Suelo desnudo y Monte = Monte nativo.

**Table 2.** Producer and user accuracy of each class. C.Verano = Summer crops, C.Invierno = Winter crops, D.Cultivo = Double Crops, Forestación = Afforestation, Monte = Natural forest, P.Ralo = "Ralo" grassland, P.Denso = "Denso" grassland and S.Desn = Bare soil.

| Clase       | Exactitud (%) |         |
|-------------|---------------|---------|
|             | Productor     | Usuario |
| C.Verano    | 84,7          | 93,1    |
| C.Invierno  | 84,2          | 78,0    |
| D.Cultivo   | 82,4          | 74,1    |
| Forestación | 97,7          | 97,6    |
| Monte       | 96,4          | 98,0    |
| P.Ralo      | 80,8          | 71,9    |
| P.Denso     | 85,0          | 88,4    |
| S.Desnudo   | 84,4          | 85,2    |

El porcentaje de pastizal natural disminuyó en todas las unidades censales (la nube de puntos se encuentra por debajo de la línea 1-1). La superficie cubierta con pastizales en el 2015 estuvo correlacionada positivamente con la superficie en el 2009 y la pendiente fue de 1,3 (diferió significativamente de 1;  $F = 15$ ,  $gl = 74$ ,  $p < 0.0001$ ; Figura 2e), es decir, la disminución fue de mayor magnitud en aquellas unidades censales donde existía menor cantidad de pastizal natural.

La superficie con forestación y monte nativo aumentó entre ambos periodos. En el caso del monte nativo, el aumento ocurrió en todas las unidades censales analizadas (39) mientras que en la Forestación la superficie aumento en 31 unidades censales y disminuyó en las 8 restantes. El aumento en la superficie de Monte y Forestación en el periodo 2009–2015 no fue independiente de la superficie que tenían estas categorías en el año 2009. Las pendientes de cambio de la forestación y el monte nativo difirieron significativamente de 1, con valores de

**Tabla 3.** Superficie cubierta (en porcentaje) por los diferentes usos/coberturas del suelo en 2009 (Baeza *et al.* 2010), 2011 (MGAP-DIEA 2011) y 2015 (este trabajo), en la región Cuesta Basáltica, Uruguay. Los valores del censo 2011 y mapa 2015, fueron calculados para la superficie cubierta por el mapa 2009, mientras que los valores que se presentan entre paréntesis, fueron calculados para la superficie total de la región. Los valores del censo corresponden a las unidades censales mayoritariamente incluidas dentro del área que corresponda. P.Ralo = Pastizal ralo, P.Denso = Pastizal denso, C.Verano = Cultivos de verano, C.Invierno = Cultivos de invierno, D.Cultivo = Doble cultivo, S.Desnudo = Suelo desnudo.

**Table 3.** Covered area (%) by each land use/land cover class in 2009 (Baeza *et al.* 2010), 2011 (MGAP-DIEA 2011) and 2015 (this work) in Basaltic region, Uruguay. Values of the 2011 census and 2015 map, were calculated for the same area as the 2009 map; values in parentheses were calculated for the total area of the region. The census values correspond to the census units mostly included within the corresponding area. P.Ralo = "Ralo" grassland, P.Denso = "Denso" grassland, C.Verano = Summer crops, C.Invierno = Winter crops, D.Cultivo = Double Crops, S.Desnudo = Bare soil.

| Clase                     | Superficie (%) |                    |                    |
|---------------------------|----------------|--------------------|--------------------|
|                           | 2009           | 2011               | 2015               |
| P.Ralo                    | 35,8           |                    | 30,9 (24,8)        |
| P.Denso                   | 55,7           |                    | 50,1 (49,8)        |
| <b>Pastizal sub total</b> | <b>91,4</b>    | <b>90,5 (85,7)</b> | <b>81,3 (74,7)</b> |
| C.Verano                  | 2,6            | 2,0 (4,1)          | 3,9 (5,8)          |
| C.Invierno                | 1,1            | 1,2 (2,1)          | 4,2 (4,3)          |
| D.Cultivo                 | 0,7            |                    | 1,4 (2,9)          |
| S.Desnudo                 | 0,8            | 0,3 (0,6)          | 0,8 (0,2)          |
| <b>Agrícola sub total</b> | <b>5,2</b>     | <b>3,5 (6,8)</b>   | <b>10,3 (13,3)</b> |
| Pradera implantada        |                | 1,5 (1,9)          |                    |
| Forestación               | 1,5            | 1,5 (2,5)          | 2,5 (3,6)          |
| Monte nativo              | 1,9            | 2,4 (2,2)          | 3,5 (3,1)          |

1,7 ( $F = 121$ ,  $gl = 74$ ,  $p < 0.0001$ ) y 1,9 ( $F = 71$ ,  $gl = 74$ ,  $p < 0.0001$ ), respectivamente (Figura 2g-h), por lo que el aumento en su superficie fue mayor en aquellas unidades censales que tenían mayor porcentaje de esas coberturas en el año 2009.

En el caso de la agricultura, si bien la mayor parte de las unidades censales mostraron un aumento de su superficie, la pendiente de la relación entre la superficie 2009 y 2015 no difirió significativamente de la línea 1-1 ( $F = 0,018$ ,  $gl = 74$ ,  $p = 0.89$ ). Esto significa que los aumentos en el área agrícola en el periodo 2009-2015 fueron independientes de la superficie registrada en el 2009.

Por último, no hubo diferencias significativas entre el cambio relativo de pastizales densos vs.

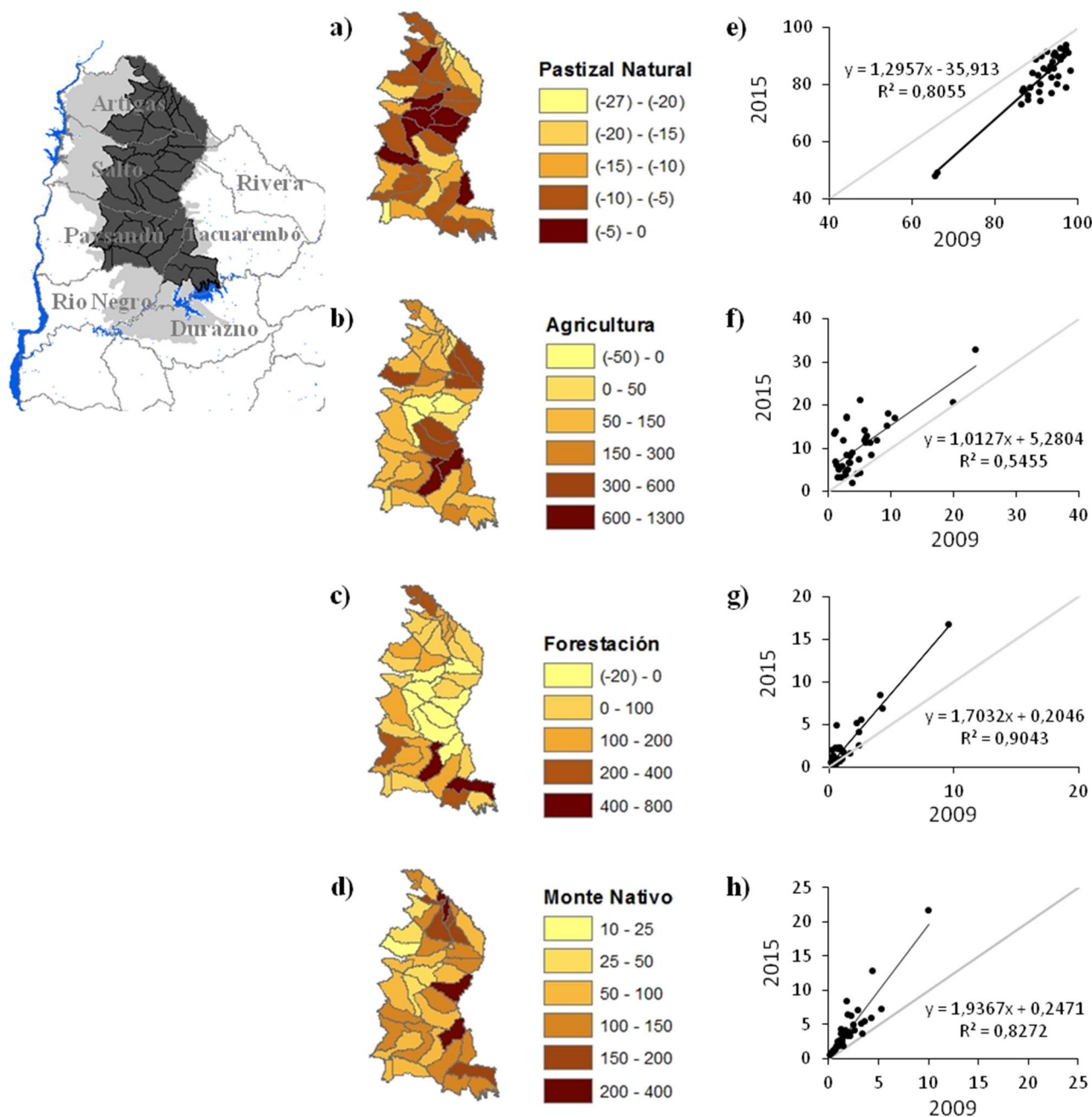
pastizales ralos ( $t = 0,616$ ,  $gl = 38$ ,  $p = 0.54$ ). Por otro lado no encontramos relación entre la disminución de un tipo de unidad de pastizal y el aumento de una actividad en particular, agricultura o forestación, lo que sería esperable por la aptitud diferencial del suelo a un tipo particular de actividad (datos no mostrados).

## DISCUSIÓN

La clasificación generada permitió describir de forma completa toda la Cuesta Basáltica con altos niveles de precisión. Los niveles de exactitud son comparables o superiores a otros trabajos realizados con aproximaciones similares en la región (Guerschman *et al.* 2003, Baldi *et al.* 2006, Baldi & Paruelo 2008) y el país (Baeza *et al.* 2010, 2014). Comparado con el antecedente directo anterior (Baeza *et al.* 2011) el mapa presentado en este trabajo actualiza la descripción de uso/cobertura del suelo y la amplía a toda la región Cuesta Basáltica. Además tendría una ventaja cualitativa al utilizar el sensor OLI/TIRS (Landsat 8) con respecto al sensor TM (Landsat 5), ya que se encontró una mejor performance, que mejora las clasificaciones de usos/coberturas del suelo realizadas con el algoritmo máxima verosimilitud (Jia *et al.* 2014, Poursanidis *et al.* 2015).

La utilización combinada de sensores remotos y observaciones fitosociológicas permitió discriminar con buenos resultados, diferentes comunidades de pastizales naturales, algo poco común en la bibliografía en donde suele discriminarse una única categoría de pastizales naturales o recursos forrajeros (Guerschman *et al.* 2003, Baldi *et al.* 2006, Paruelo *et al.* 2006, Baldi & Paruelo 2008, Baeza *et al.* 2014). Los niveles de exactitud disminuyen un poco en la clases de pastizal, un resultado esperable dada la relativa similitud fisonómica y funcional de estas categorías en comparación con el resto de las categorías descriptas. Resultados similares fueron encontrados por Baeza *et al.* (2010, 2011) en esta región. Al igual que con los pastizales naturales, este mapa discrimina con precisión y gran nivel de detalle, entre cultivos de invierno, verano y ciclos doble cultivo, mientras que la mayoría de las clasificaciones de uso/cobertura del suelo los agrupa en una única clase agrícola. Varios autores





**Figura 2.** Cambio relativo en el uso/coertura del suelo por unidad censal en el período 2009-2015 para cada categoría analizada (a-d). Porcentaje de la unidad censal cubierto por cada categoría analizada en el año 2009 vs. porcentaje en el año 2015 (e-h). Pastizal Natural = (a) y (e); Agricultura = (b) y (f); Forestación = (c) y (g); Monte nativo = (d) y (h). Todos los modelos de regresión de las figuras (e-h) fueron significativos ( $p < 0.01$ ).

**Figure 2.** Land use/land cover relative change per census unit in the period 2009-2015 for each analyzed category (a-d). Percentage of the census unit covered by each analyzed category in 2009 vs. percentage in 2015 (e-h). Natural Grassland = (a) and (e); Agriculture = (b) and (f); Afforestation = (c) and (g); Natural forest = (d) and (h). All regression models of figures (e-h) were significant ( $p < 0.01$ ).

separan entre tipos de cultivos utilizando el índice NDVI de series temporales de imágenes Landsat TM (Guerschman et al. 2003, Baldi et al. 2006, Baldi & Paruelo 2008) y MODIS (Baeza et al. 2014), con porcentajes de exactitud comparables o un

poco mejores, aunque estos diferencian solo entre cultivos de verano y dobles cultivos.

La aproximación utilizada no permitió la adecuada discriminación de las praderas implantadas. Esta categoría, que a priori fue incluida al tomar

los datos de campo, fue eliminada de la clasificación final debido al alto grado de solapamiento en el comportamiento espectral (y el consiguiente error en las clasificaciones) con otras coberturas, principalmente con cultivos y pastizales. El alto grado de confusión en esta categoría ya ha sido reportada por otros autores (Guerschman *et al.* 2003, Baeza *et al.* 2014) y responde a la alta variabilidad de su señal espectral. El comportamiento espectral de las praderas implantadas depende de la composición de especies (ciclos invernales, estivales o ambos), del tipo de suelo en que se encuentren y del tipo de manejo (fecha y forma de pastoreo o enfardado, pastoreo rotativo, carga animal, enfermedades, etc.). La combinación de estas características aportan gran variabilidad en la respuesta espectral de la vegetación, lo que genera una gran dificultad para asignarle la clase correcta al pixel (Guerschman *et al.* 2003). Debido a que la superficie de praderas implantadas reportada por el censo (MGAP-DIEA 2011), para toda la región es muy baja (1,9%), se optó por retirar esta categoría del esquema de clasificación. Por tanto, la superficie bajo este uso del suelo está incrementando, levemente, la superficie cubierta por otras categorías (fundamentalmente cultivos de invierno y pastizales densos).

#### **Análisis del cambio en el uso/cobertura del suelo**

Nuestro trabajo muestra como la región Cuesta Basáltica no es ajena al proceso de agriculturización al que está sometido el pastizal natural. El proceso de sustitución por cultivos y forestación descrito para el bioma pastizales del Río de la Plata (Jobbágy *et al.* 2006, Paruelo *et al.* 2007, Baldi & Paruelo 2008, Baeza 2016), también se observa en esta región. La magnitud del descenso del pastizal en este periodo mostró ser importante, registrando una tasa de cambio relativo muy alta en algunas unidades censales (del orden de -25%) y reducciones promedio en torno al 9%. Este cambio relativo en la superficie de pastizales naturales es de los más altos reportados para la región. Según Baldi & Paruelo (2008), en el periodo del 2001 al 2005 el proceso de sustitución del pastizal natural alcanzó una aceleración de las más altas de la región en el litoral oeste de Uruguay y la cuenca de la Laguna Merín (suelos con mayor aptitud agrícola), llegando a una tasa

de cambio relativo promedio de -3,9%. Si tenemos en cuenta que las características edáficas de la Cuesta Basáltica restringen la rentabilidad de la agricultura y ganadería intensiva (Paruelo *et al.* 2007), el cambio adquiere aún más relevancia. La situación económica internacional y regional, hizo que la agricultura se expandiera desde los polos agrícolas tradicionales (suelos fértiles del litoral del Río Uruguay y Cuenca de laguna Merín) hacia otras zonas del País (Paruelo *et al.* 2006, Baldi & Paruelo 2008, Arbeletche & Gutiérrez 2010, Baeza *et al.* 2014), donde anteriormente no era rentable su cultivo. Esta expansión agrícola es también reportada por Baeza (2016) para esta zona de Uruguay y coincide con lo ocurrido en otras subregiones de los Pastizales del Río de la Plata (Volante *et al.* 2015) con aumentos en todas las categorías de cultivo (cultivos de verano, cultivos de invierno, y sobre todo de doble cultivo). Según nuestros resultados dentro de la Cuesta Basáltica ocurre el mismo fenómeno.

La forestación es una actividad que ha tenido una gran expansión en detrimento de la superficie con pastizales naturales (Jobbágy *et al.* 2006, Baldi & Paruelo 2008), sin embargo la tasa de cambio no es tan importante en la Cuesta Basáltica como en otras zonas del Uruguay (Baeza *et al.* 2014) o la región, debido principalmente a las restricciones edáficas que presenta. La cuesta basáltica limita con dos grandes polos forestales, la cuenca sedimentaria del Noreste y el polo del litoral oeste (Paysandú y Río Negro). De todas formas en la zona sur del mapa, existen unidades censales que presentan cambios relativos comparables a las que se encuentran en los polos forestales más importantes del país (Baldi & Paruelo 2008).

El aumento en la superficie del monte nativo concuerda con las estadísticas oficiales (Dirección General Forestal 2015), las cuales reportan un continuo aumento de esta cobertura, desde 1990 hasta 2011, en todo el país. Su crecimiento relativo es alto, similar al de la forestación para toda la región y además crece en todas las unidades censales. Si bien existe un marco legal de protección del monte nativo (Artículos 24 y 25, ley 15.939, <https://parlamento.gub.uy/documentosyleyes/leyes>), la intensificación de la actividad agropecuaria y la competencia por el espacio con otros usos del suelo (forestación ganadería, agricultura), tenderían a reducirlo. Si bien no

puede descartarse que el aumento se deba a errores en la clasificación de alguno de los períodos analizados, los bajos errores de comisión y omisión de esta cobertura, hacen poco probable un aumento tan sistemático. La estructura fundamentalmente lineal de esta cobertura, asociada a franjas adyacentes a los cursos de agua, podría explicar parcialmente estos aumentos en la superficie. Aumentos pequeños en el ancho de los parches de monte nativo (perpendicular al cauce del río) provocarían un incremento significativo en el área de esta cobertura al considerar toda su extensión en la red hidrográfica. Esta hipótesis concuerda con el patrón de aumento de la superficie de monte nativo, con mayor expansión en aquellas unidades censales con mayor superficie de esta cobertura en el período anterior. Trabajos recientes que modelan los efectos del cambio climático sobre la extensión y productividad de montes nativos, predicen aumentos de la superficie boscosa en esta región del mundo, asociados a un aumento de la precipitación y la reducción del riesgo de sequías (Anadón *et al.* 2014, Lucas *et al.* 2017). Estudios más detallados son necesarios para confirmar y comprender los mecanismos subyacentes al aumento de la superficie con monte nativo detectado en este trabajo.

Las mayores pérdidas de pastizales naturales ocurren fundamentalmente por dos procesos, la expansión agrícola y la expansión forestal. Sin embargo estos dos procesos operan de manera diferente en su expansión territorial, mientras que la expansión agrícola ocurre con independencia de la superficie que ocupaba en el año 2009, la expansión forestal ocurre en los sitios con mayor superficie de esta categoría en dicho año. La independencia del aumento del área agrícola con su superficie previa indica que este crecimiento está ocurriendo sobre áreas nuevas y dispersas en la región y no por expansión de áreas agrícolas preexistentes. Este fenómeno probablemente responda a que los suelos netamente agrícolas ya estaban ocupados por cultivos en el año 2009 y el crecimiento ocurrió sobre suelos marginalmente agrícolas dispersos en la matriz de pastizales. Este crecimiento de los cultivos sobre suelos marginalmente agrícolas ya fue reportado para Uruguay en otros trabajos (Arbeletche & Gutiérrez 2010, Baeza *et al.* 2014). En sentido contrario, la

dependencia de la expansión forestal con el área previamente sembrada, probablemente esté vinculada a características del suelo o factores logísticos que favorecen el desarrollo de esta actividad, forzando su crecimiento como expansión de polos forestales consolidados. En Uruguay la ley 15.939 de promoción de la actividad forestal provee exoneraciones impositivas para el desarrollo de esta actividad en suelos con baja aptitud agrícola, explicando el desarrollo de nuevas plantaciones en aquellas zonas donde la forestación ya estaba presente (<https://parlamento.gub.uy/documentosyleyes/leyes>; Uruguay 1987). Adicionalmente, la alta mecanización del sector y la necesidad de infraestructura vial probablemente también fuercen la expansión del área forestal a partir de polos ya existentes.

Los resultados de este trabajo permiten estudiar objetivamente el proceso de cambio en el uso/cobertura del suelo de una región con gran nivel de detalle. Este trabajo compara resultados obtenidos mediante la aplicación de un mismo protocolo de clasificación a entradas de información que provienen de ciclos productivos de años distintos. Esto no solo permite analizar formalmente el cambio ocurrido en un determinado tiempo, sino que la estructura de los resultados facilita la comparación de un ciclo productivo determinado con otro (Baldi & Paruelo 2008).

La comparación con los resultados del censo 2011, complementa el trabajo a nivel espacial (a toda la región) y temporal (fecha intermedia), sin embargo esta comparación implica cierta complejidad por tratarse de metodologías distintas. Por ejemplo, las resoluciones espaciales son distintas (unidad censal vs pixel) y las clases debieron ser reestructuradas a los efectos de la comparación. En este sentido existen trabajos con resultados contradictorios. Por un lado, Paruelo *et al.* (2006) obtiene resultados concordantes entre clasificaciones de imágenes MODIS y censos agropecuarios, mientras que Baeza *et al.* (2014), encuentran discordancias entre la superficie de algunas categorías de uso/cobertura del suelo reportadas por el censo 2011 y los resultados de una clasificación supervisada realizada con series temporales de Índice Verde Normalizado-MODIS para todo el Uruguay.

La información generada constituye un aporte

fundamental para potenciar la capacidad productiva del pastizal natural por medio del manejo sustentable del principal recurso forrajero del país. A partir de este mapa y con estimaciones de la Productividad Primaria Neta Aérea realizada con imágenes de satélite (Grigera *et al.* 2007, Baeza *et al.* 2010), es posible caracterizar la productividad forrajera del pastizal en tiempo y espacio, prácticamente en tiempo real. Esto permite diseñar o mejorar estrategias públicas a nivel regional o desarrollar sistemas productivos de precisión, donde los productores puedan ajustar la carga o tiempo de pastoreo al forraje disponible, medir consecuencias sobre el ambiente y tomar medidas que conserven su estructura.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de Marcello Martinelli en la obtención de datos de campo. El trabajo de la Dra. Ana Cláudia Delciellos, de la Dra. Camila dos Santos de Barros y de un revisor anónimo, mejoró sensiblemente la versión final de este manuscrito. Este trabajo fue parcialmente financiado por el convenio UdelaR-RENARE-MGAP “Desarrollo de un mapa SIG de los pastizales naturales de las regiones geomorfológicas: Areniscas, Basalto, Cristalino Central, Cristalino del Este y Noreste”.

### REFERENCIAS

- Altesor, A. 2010. Servicios ecosistémicos de los pastizales naturales. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. INIA Serie FPTA, 26, 221–234.
- Anadón, J. D., Sala, O. E., & Maestre, F. T. 2014. Climate change will increase savannas at the expense of forests and treeless vegetation in tropical and subtropical Americas. *Journal of Ecology*, 102, 1363–1373. DOI: 10.1111/1365-2745.12325.
- Arbeletche, P., & Gutiérrez, G. 2010. Crecimiento de la agricultura en Uruguay: exclusión social o integración económica en redes. *Pampa*, 6, 113–138.
- Baeza, S. 2016. El Uso/Cobertura del suelo en Uruguay y los Pastizales del Río de la Plata: caracterización, análisis de sus cambios a lo largo del tiempo e impactos sobre el funcionamiento ecosistémico. Tesis de Doctorado. PEDECIBA, Universidad de la República, Uruguay. p. 245.
- Baeza, S., Baldassini, P., Bagnato, C., Pinto, P., & Paruelo, J. M. 2014. Caracterización del uso/cobertura del suelo en Uruguay a partir de series temporales de imágenes MODIS. *Agrociencia*, 18, 95–105.
- Baeza, S., Lezama, F., Piñeiro, G., Altesor, A., & Paruelo, J. M. 2010. Spatial variability of aboveground net primary production in Uruguayan Grasslands: A remote sensing approach. *Applied Vegetation Science*, 13, 7285. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2009.01051.x>
- Baeza, S., Gallego, F., Lezama, F., Altesor, A., & Paruelo, J. M. 2011. Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. En: A. Altesor, W. Ayala, & J. M. Paruelo (Eds.), Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. pp. 33–54. Serie FPTA N° 26, INIA.
- Baldi, G., Guerschman, J. P., & Paruelo, J. M. 2006. Characterizing fragmentation in temperate South America grasslands. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 116, 197–208. DOI: 10.1016/j.agee.2006.02.009
- Baldi, G., & Paruelo, J. M. 2008. Land use and land cover dynamics in South American temperate grasslands. *Ecology and Society*, 13(2), 6. Disponible: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art6/>
- Chander, G., Markham, B. L., & Barsi, J. A. 2007. Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4, 490–494. DOI: 10.1109/LGRS.2007.898285
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel, España. p. 586.
- Instituto Uruguayo de Meteorología. Estadísticas climatológicas 1961-1990, disponible en: <https://inumet.gub.uy>
- Dirección General Forestal. 2015. Superficie total de bosques (Cartografía 2012). Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgfcursorefrestal,O,es,0,MNU,E,134,2,MNUENVI> version 4.8. 2010. (Exelis Visual Information

- Solutions, Boulder, Colorado)
- ESRI. 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Foley, J. A., Defries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309, 570–574. DOI: 10.1126/science.1111772
- Golluscio, R. A., Dereguibus V. A., & Paruelo J. M. 1998. Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecología Austral*, 8, 265–284.
- Graesser, J., Aide, T. M., Grau, H. R., & Ramankutty, N. 2015. Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. *Environmental Research Letters*, 10(3), 034017. DOI: 10.1088/1748-9326/10/3/034017
- Grigera, G., Oesterheld, M., & Pacín, F. 2007. Monitoring forage production for farmer's decision making. *Agricultural Systems*, 94, 637–648. DOI: 10.1016/j.agry.2007.01.001
- Guerschman, J. P., Paruelo, J. M., Di Bella, C., Giallorenzi, M. C., & Pacin, F. 2003. Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 3381–3402.
- Hansen M. C., Defries, R. S., Townshend, J. R. G., & Sohlberg, R. 2000. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1331–1364.
- Jia, K., Wei, X., Gu, X., Yao, Y., Xie, X., & Li, B. 2014. Land cover classification using Landsat 8 Operational Land Imager data in Beijing China. *Geocarto International*, 29, 941–951. DOI: 10.1080/10106049.2014.894586
- Jobbágy, E., Vasallo, M., Farley, K., Piñeiro, G., Garbulsky, M., Noretto, M., Jackson, R., & Paruelo, J. M. 2006. Forestación en Pastizales: hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos. *Agrociencia*, 10, 109–124.
- MGAP-DIEA. 2011. Censo nacional Agropecuario, Dirección de Estadísticas Agropecuarias, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-censo-2011,O,es,0>
- MGAP-DIEA. 2016. Anuario Estadístico Agropecuario. Dirección de Estadísticas Agropecuarias, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/publicaciones/anuarios-diea/anuario2016>
- Modernel, P., Rossing, W. A. H., Corbeels, M., Dogliotti, S., Picasso, V., & Tiftonell, P. 2016. Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. *Environmental Research Letters*, 11, 11. DOI: 10.1088/1748-9326/11/11/113002
- Lavorel, S., McIntyre, S., Landsberg, J., Forbes, T. D. A. 1997. Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends in Ecology & Evolution*, 12, 474–478. DOI: 10.1016/S0169-5347(97)01219-6
- Lezama, F., Altesor, A., Paruelo, J. M., & León, R. J. C. 2006. Heterogeneidad de la vegetación en pastizales naturales de la región basáltica de Uruguay. *Ecología Austral*, 16, 167–182.
- Lillesand, T., & Kiefer, R. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons. p. 750.
- Lucas, C., Ceroni, M., Baeza, S., Muñoz, A. A., & Brazeiro, A. 2017. Sensitivity of subtropical forest and savanna productivity to climate variability in South America, Uruguay. *Journal of Vegetation Science*, 28, 192–205. DOI: 10.1111/jvs.12475
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Piñeiro, G., Jobbágy, E. G., Verón, S. R., Baldi, G., & Baeza, S. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*, 10, 47–61.
- Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Oesterheld, M., Golluscio, R. A., & Aguiar, M. R. 2007. The grasslands and steppes of Patagonia and the Rio de la Plata plains. En: T. Veblen, K. Young and A. Orme (Eds.), *The Physical Geography of South America*. pp. 232–248. United Kingdom: Oxford University Press.
- Panario, D. 1987. Geomorfología del Uruguay. Publicación de la Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad de la República, Uruguay. p. 32.

- Poursanidis, D., Chrysoulakis, N., & Mitraka, Z. 2015. Landsat 8 vs. Landsat 5: A comparison based on urban and peri-urban land cover mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 259–269. DOI: 10.1016/j.jag.2014.09.010
- Rodríguez, C., Leoni, E., Lezama, F., & Altesor, A. 2003. Temporal trends in species composition and plant traits in natural grasslands of Uruguay. *Journal of Vegetation Science*, 14: 433–440. DOI: 10.1658/1100-9233(2003)014[0433:TTISCA]2.0.CO;2
- Soriano, A. 1991. Rio de la Plata Grasslands. In: R. T. Coupland (Ed.), *Ecosystems of the world: Natural Grasslands. Introduction and Western Hemisphere*. p. 367–407. Netherlands: Elsevier.
- Townshend, J. R. G. 1992. Improved global data for land applications: a proposal for a new high resolution dataset. Report No 20, International Geosphere-Biosphere Program, Stockholm, Sweden. p. 86.
- Uruguay. 1987. Artículo 24 y 25 de la ley 15.939 de 28 de diciembre 1987. Constitución de la República Oriental del Uruguay. Montevideo, Uruguay. (visita 30 de julio de 2018, <https://parlamento.gub.uy/documentosyleyes/leyes>)
- Vega, E., Baldi, G., Jobbágy, E., Paruelo, J. 2009. Land use change patterns in the Rio de la Plata grasslands: The influence of phytogeographic and political boundaries. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134, 287–292. DOI: 10.1016/j.agee.2009.07.011
- Volante, J., Mosciaro, J., Morales, P., Oclava, M., Vale, L., Castrillo, S., Sawchik, J., Tiscornia, G., Fuente, M., Maldonado, I., Vega, A., Trujillo, R., Cortéz, L., & Paruelo, J. M.? 2015. Expansión agrícola en Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Chile entre 2000-2010. Caracterización espacial mediante series temporales de índices de vegetación. *Revista de investigación Agropecuaria*, 41, 179–191.
- Zhu, Z., & Woodcock, C. E. 2015. Improvement and Expansion of the Fmask Algorithm: Cloud, Cloud Shadow, and Snow Detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 Images. *Remote Sensing of Environment*, 159, 269–277. DOI: 10.1016/j.rse.2014.12.014

### MATERIAL SUPLEMENTARIO 1

**Tabla 1.** Matriz de contingencia de la clasificación supervisada del path 224, expresada en porcentajes (a) y número de píxeles (b).

*Table 1.* Contingency matrix of 224 path classification expressed by percentage (a) and pixel count (b).

**Tabla 2.** Matriz de contingencia de la clasificación supervisada del path 225, expresada en porcentajes (a) y número de píxeles (b).

*Table 2.* Contingency matrix of 225 path classification expressed by percentage (a) and pixel count (b).

**Tabla 3.** Exactitud de la clasificación del path 224 y 225 de cada clase expresados en porcentaje.

*Table 3.* Accuracy of 224 and 225 path classification of each class expressed by percentage.

**Tabla 4.** Superficies de las clases del mapa 2009 (Baeza et al. 2011) y de un corte de la misma región en el mapa 2015.

*Table 4.* Covered area by each land use/land cover class in 2009 map (Baeza et al. 2011) and a cut of the same region on 2015 map. The data are expressed in hectares and as a percentage of the area analyzed.

**Tabla 5.** Tabla comparativa de superficies por clase del censo 2011 y del mapa 2015 para toda la región de la cuesta basáltica.

*Table 5.* Area for each land use/land cover class in 2011 census and 2015 Basaltic region map.

*Presentado en: 28 de agosto de 2017*

*Aceptado en: 12 de junio de 2018*

*Editor de Área: Camila S. Barros*