



Facultad de Ciencias
Universidad de la República



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

**TESINA PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**Cartografía de comunidades de
pastizal de la Región Centro-Sur
(Cristalino)**

Federico Gallego

Tutor: Dra. Alice Altesor

Co-tutor: MSc. Santiago Baeza

Profundización en Ecología

Tribunal:

Dr. Alejandro Brazeiro

Dr. José M. Paruelo

Dra. Alice Altesor

Marzo 2010

Contenido

	Página
Resumen	3
Introducción	4
Preguntas que busca responder el trabajo	7
Objetivos	8
Objetivos específicos	8
Materiales y Métodos	9
Descripción del área de estudio	9
Comunidades vegetales de la región Centro-Sur	10
Caracterización de la distribución espacial de las comunidades vegetales	11
Resultados	16
Discusión	22
Conclusiones	27
Agradecimientos	28
Bibliografía	29

Resumen:

La región Centro-Sur (Cristalino) es una de las regiones geomorfológicas más grandes del país (2.5 millones de hectáreas). Una importante porción de esta región ha sido y está siendo modificada por el avance de la agricultura y forestación, sin embargo aún existen grandes áreas dominadas por pastizales naturales. El conocimiento de la heterogeneidad espacial y temporal de los pastizales naturales, principal recurso de la actividad ganadera, para esta zona del país es escaso y fragmentario. El objetivo principal de este trabajo fue cartografiar la cobertura y el uso del suelo y analizar la extensión y distribución espacial de las diferentes comunidades de pastizales naturales identificadas en la región. La fitosociología y teledetección son herramientas complementarias a la hora de emprender este tipo de trabajo. El método fitosociológico permite caracterizar las comunidades vegetales a partir de censos a campo y análisis multivariado. La teledetección permite reconocer áreas homogéneas en la cobertura del suelo en función de su comportamiento espectral, mediante información espacialmente continua. La cartografía se realizó mediante una clasificación supervisada de 4 escenas Landsat TM y 2 fechas por escena (primavera, verano), de forma de captar momentos contrastantes en la vegetación. Los usos / coberturas del suelo considerados en el estudio fueron: cultivos de verano e invierno, forestaciones, suelo desnudo en ambas estaciones, cuerpos de agua, montes nativos y dos unidades de pastizales identificadas a partir del método fitosociológico. Como resultado del proceso de clasificación se obtuvo el mapa de vegetación para una vasta extensión de nuestro país, en donde el 69.2% correspondió a pastizales naturales. Las unidades I y II de pastizales ocuparon el 25.7 y 43.5% respectivamente. El resto del territorio estuvo ocupado en un 20.4% por agricultura, 3.7% por forestación, 1.6% por monte nativo y 0.1% por cuerpos de agua. La cartografía realizada cubre un vacío de información al caracterizar de forma detallada y espacialmente explícita el uso / cobertura del suelo de una amplia porción del territorio nacional, siendo un insumo básico para optimizar prácticas ganaderas y realizar planes de manejo que permitan la conservación de estos pastizales.

Palabras claves: Teledetección, Fitosociología y Pastizales naturales.

Introducción

El conocimiento de la heterogeneidad de la vegetación en el espacio y en el tiempo (descripción de sus atributos estructurales y funcionales) constituye una de las bases fundamentales para realizar una correcta planificación del manejo de la vegetación y del uso del suelo. Los aspectos estructurales de la vegetación incluyen la cobertura total, la composición específica o de tipos funcionales de plantas, su abundancia relativa y la distribución vertical o estratificación de la biomasa (Gitay & Noble, 1997; Lavorel *et al.*, 1999). Los atributos funcionales se refieren al intercambio de materia y energía dentro de un ecosistema (Guershman *et al.*, 2003; Paruelo *et al.*, 2004; Baeza *et al.*, 2006). La evaluación de estos dos atributos es un pre-requisito para diseñar estrategias de manejo sustentables en un área, ya sea para planificar desarrollos agropecuarios o medidas destinadas a la conservación (Hansen *et al.*, 2000; McGuire *et al.*, 2001; IPCC, 2000).

La heterogeneidad de la vegetación puede ser definida como la variabilidad espacial de la composición de especies en un área de extensión conocida y representa el componente geográfico de la diversidad de especies vegetales (Chaneton, 2005). La percepción remota (o teledetección) es una fuente de información extremadamente valiosa para la estimación de dicha heterogeneidad vegetal. Las imágenes satelitales han sido ampliamente utilizadas para describir los patrones de cobertura / uso del suelo (eg. Paruelo *et al.*, 2001; Brown de Colstoun *et al.*, 2003; Guershman *et al.*, 2003, Shupe & Marsh, 2004; Baldi, 2006; Paruelo *et al.*, 2006). Los sensores a bordo de satélites registran energía electromagnética reflejada y/o emitida por un objeto o superficie en distintas porciones del espectro electromagnético, brindando datos cuantitativos y cualitativos, espacialmente continuos de la superficie, particularmente útiles para describir el uso de la tierra en grandes extensiones. La discriminación de tipos de cobertura (cultivos de verano e invierno, cuerpos de agua, pastizales naturales, etc.) se basa en la unicidad de su respuesta espectral y en cambios temporales que en ellos pudieron operar (Guershman *et al.*, 2003).

Los sistemas de pastizales, definidos por Sala *et al.* (1996) como regiones cubiertas por vegetación herbácea natural o semi-natural, predominantemente gramíneas, con o sin plantas leñosas, representan la vegetación natural potencial de aproximadamente 46 millones de km², un 27% de la superficie terrestre continental (Sala *et al.*, 1996; Henwood, 1998). En la actualidad, los cultivos y las pasturas mejoradas en

conjunto, se han convertido en uno de los sistemas más extensos, con aproximadamente un 40% de la superficie terrestre (Ramankutty *et al.*, 1999; 2002). Los Pastizales del Río de la Plata constituyen una de las áreas más extendidas de pastizales naturales en el mundo, abarcando una superficie de más de 700 millones de hectáreas, cubriendo la gran planicie del centro-este de Argentina, Uruguay y el sur del Brasil (Soriano, 1991). En las últimas décadas las zonas ocupadas por este ecosistema han sido reemplazadas fundamentalmente por cultivos, pasturas implantadas y forestaciones (Paruelo *et al.*, 2001; 2006). Si bien existen todavía relictos de pastizales naturales, estos se encuentran únicamente en zonas marginales de la región, en donde la agricultura o la ganadería intensiva no son actividades económicamente rentables (Krapovickas y Di Giacomo, 1998; Paruelo *et al.*, 2007).

El 83% del territorio uruguayo se encuentra cubierto por pasturas permanentes dedicadas a la ganadería (13.5 millones de hectáreas). Los pastizales naturales han disminuido su extensión en algo más de 980 mil hectáreas, pasando del 80% del territorio en 1990 al 71% en el 2000, debido al incremento de las pasturas mejoradas, agricultura (cultivos de soja, maíz, etc.) y forestación (MGAP, DIEA 2000). Este proceso de pérdida de pastizales naturales debido a las actividades agropecuarias, seguramente haya continuado avanzando desde la fecha del último censo agropecuario. Pese a estar en retroceso, los pastizales naturales continúan cubriendo la mayor parte del país y además de constituir la principal fuente de forraje para la ganadería, proveen otros servicios ecosistémicos como la regulación climática o la protección contra plagas, derrumbes o deslizamientos, por lo cual su manejo adecuado adquiere gran relevancia (Sala & Paruelo, 1997).

La subdisciplina de la ecología vegetal dedicada a la identificación y descripción de comunidades vegetales se denomina fitosociología. Esta se basa en el concepto de comunidad vegetal definido como las combinaciones de especies que coinciden en su ocurrencia en ambientes semejantes (Perelman *et al.*, 2005). El método fitosociológico permite la identificación de patrones en la composición de la vegetación a partir de la realización de censos sobre stands homogéneos y su posterior agrupamiento por similitudes florísticas (Perelman *et al.*, 2005). Conocer, una vez identificadas las comunidades vegetales, su distribución en el espacio constituye un paso fundamental para lograr un manejo racional de este recurso. La fitosociología y la teledetección aportan herramientas complementarias a la hora de emprender este tipo de trabajo. La teledetección permite reconocer áreas homogéneas en la cobertura del suelo en función

de su comportamiento espectral, mediante información espacialmente continua y con amplia cobertura temporal.

Las descripciones espacialmente explícitas de la cobertura y uso del suelo en los pastizales del Río de la Plata son escasas (Paruelo *et al.*, 2001; Guershman *et al.*, 2003; Baldi, 2006; Baldi & Paruelo, 2008). Estos trabajos generalmente agrupan bajo una única clase de “pastizal” a diferentes comunidades vegetales bastante heterogéneas, limitándose a separar únicamente el uso / cobertura de la tierra en grandes clases (cultivos de invierno y verano, forestación, etc.). En la región puede citarse como antecedente el trabajo de Baldi *et al.* (2006) donde cartografiaron el uso / cobertura del suelo en diferentes porciones de los pastizales del Río de la Plata analizando su grado de fragmentación. Así mismo, Paruelo *et al.*, (2004) cartografiaron y caracterizaron funcionalmente las principales unidades fisonómicas de la porción occidental de la estepa patagónica. A nivel nacional son pocos los trabajos de este tipo. Baeza *et al.* (2006), caracterizaron funcionalmente para todo el territorio nacional los Tipos funcionales de Ecosistemas y compararon dicha caracterización con patrones climáticos, geomorfológicos y de usos del suelo. Rosengurtt en 1944, planteó un esquema clasificatorio para la zonificación del territorio uruguayo, el cual se basó en un mosaico de suelos, en una diversidad de sistemas de manejo de las praderas y en el conocimiento de la autoecología de las especies campestres, así como también en una vasta experiencia de campo, pero carece del respaldo de relevamientos formales que documenten los patrones descritos. Millot *et al.* (1987) propusieron otro esquema de zonificación en el cual las áreas se delimitaron tomando en cuenta los materiales geológicos, tipo de suelo, regionalización geográfica y zonas predominantemente ganaderas, obteniendo las siguientes unidades: 1-Basalto, 2- Cristalino, 3- Región Noreste y 4- Región Sureste. Sganga en 1994 elaboró un mapa de vegetación del Uruguay con mayor detalle que los anteriores. La clasificación realizada separa grandes tipos de vegetación definidos a partir de su fisonomía (monte ribereño, monte serrano, monte de parque, praderas, etc.) y se basó fundamentalmente en el mapa de suelos y el concepto de vegetación potencial (no explícito en el mismo).

El presente trabajo se enmarcó en un proyecto (FPTA-175) “Descripción de la heterogeneidad florística y seguimiento de la productividad primaria y secundaria del campo natural” cuyo objetivo fue describir la heterogeneidad de la estructura y funcionamiento florístico de las cuatro regiones geomorfológicas del país con mayor cobertura de pastizales naturales. Como antecedente directo, Baeza *et al.* (2010)

describieron el uso / cobertura del suelo de la región del Basalto superficial (Uruguay) con especial énfasis en la cartografía y funcionamiento de comunidades de pastizal, utilizando descripciones fitosociológicas de las comunidades de pastizal e imágenes de satélite.

La región centro-sur del Uruguay (Cristalino) es una de las unidades geomorfológicas más grandes del país (Panario, 1988) y una de las principales zonas ganaderas (Millot *et al.*, 1987) y agrícolas (MGAP-DIEA, 2000; Paruelo *et al.*, 2006), sin embargo no existe todavía una descripción detallada y espacialmente explícita del uso y la cobertura del suelo. La expansión de la forestación y fundamentalmente de la agricultura, son dos de las transformaciones más importantes que han operado en esta región, resultando evidente la necesidad de contar con una descripción espacial de la cobertura / uso del suelo y de las comunidades que componen el pastizal natural, el principal recurso forrajero de nuestro país.

Preguntas que busca responder este trabajo

¿Cual es la distribución espacial de los distintos usos y coberturas del suelo de la región Centro – Sur (Cristalino), en particular de la heterogeneidad florística de los pastizales naturales de la región?

¿Existe una relación entre el tipo de suelo y los diferentes usos y coberturas cartografiadas en el área de estudio?

¿Cual es la proporción de la región modificada por las actividades agropecuarias?

¿Coinciden los resultados con las estadísticas oficiales del último Censo General Agropecuario (2000)?

Objetivo general:

El objetivo general de este trabajo fue cartografiar la distribución espacial de los distintos usos y coberturas del suelo de la región Centro – Sur (Cristalino), en particular la heterogeneidad florística de los pastizales naturales de la región.

Objetivos específicos:

- Cartografiar la cobertura y el uso del suelo en la unidad geomorfológica Región Centro-Sur (Cristalino).
- Cartografiar las comunidades de pastizales naturales descritas en la región.
- Analizar la relación entre las diferentes coberturas cartografiadas y el tipo de suelo en el área de estudio.
- Cuantificar la proporción de la región modificada por las actividades agropecuarias (forestación, agricultura intensiva), y comparar estos resultados con los del último Censo General Agropecuario (2000).

Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio:

La zona de estudio se encuentra en la mitad sur de Uruguay entre los 33° 00′ - 34° 36′ de latitud Sur y los 55° 28′ – 58° 05′ de longitud oeste, ocupando una superficie aproximada de 2.5 millones de hectáreas (15,5% de la superficie del país). Se extiende en gran parte por los departamentos de Florida y Flores, sur de Durazno, noreste de Colonia y algunas áreas de Soriano, San José y Cerro Largo (Figura 1). Se caracteriza por presentar un relieve ondulado con predominancia de lomas irregulares de formas redondeadas, y por comprender suelos superficiales y profundos sobre basamento cristalino y sedimentos cuaternarios (Milot *et al.*, 1987; Panario, 1988).

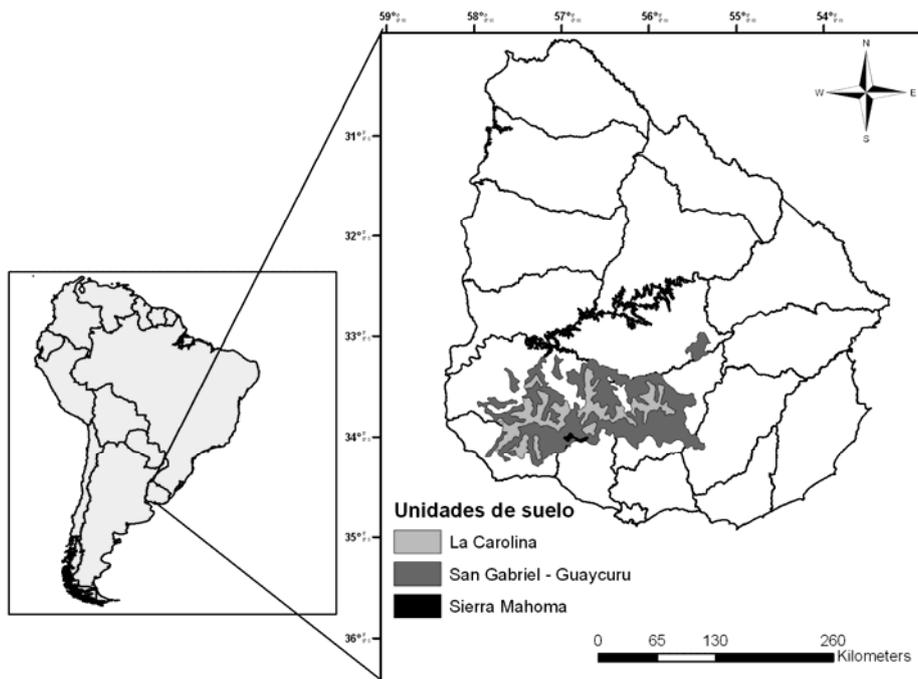


Figura 1: Área de estudio (región Centro-Sur, Cristalino), ubicación en el territorio uruguayo y unidades de suelo consideradas en el trabajo.

El estudio se realizó únicamente sobre las unidades de suelo “San Gabriel-Guaycurú”, “La Carolina” y “Sierras de Mahoma”, zona donde se realizaron los análisis fitosociológicos de Lezama *et al.* (2008). La unidad cartográfica de suelos San Gabriel – Guaycurú ocupa una superficie de 1.140.333 há (6.48% de la superficie del país), siendo la más importante de la región. Los suelos dominantes, que ocupan más del 50% de la

unidad, son brunosoles sub-eutricos (éutricos) háplicos de textura franca a franco - gravilosa o arcilloso - franca. En segundo lugar de importancia se encuentra la unidad La Carolina con una superficie de 436.625 há (2.48% de la superficie del país). En esta unidad los suelos dominantes son los brunosoles eutricos típicos y los vertisoles rúpticos luvicos. La unidad Sierra de Mahoma ocupa una superficie de 8.466 há (0.05% de la superficie del país), siendo así una de las unidades cartográficas más pequeña del territorio uruguayo. Los suelos dominantes son brunosoles subéutricos / dístricos háplicos y afloramientos rocosos (Altamirano *et al.*, 1976). El clima del área de estudio es templado a subtropical con una temperatura media anual de aproximadamente 17 °C y la precipitación media anual se encuentra entre los 1100 y los 1300 mm (Dirección Nacional de Meteorología, 2010).

Comunidades vegetales de la región Centro-Sur:

La heterogeneidad de la vegetación herbácea de la zona ha sido descrita en profundidad por Lezama *et al.* (2008) utilizando el método fitosociológico a partir de 55 censos de vegetación distribuidos en la zona de estudio. Todos los censos fueron georreferenciados mediante un dispositivo de posicionamiento satelital (GPS). Este trabajo permitió identificar, a partir de la presencia - ausencia de especies, tres comunidades de pastizales con características fisonómicas distintivas. La comunidad I (CSI), indicada por *Coellorachis selloana*, *Eryngium nudicaule*, *Paspalum notatum* y *Apium leptophyllum*, presenta predominantemente un estrato de 30 cm de altura dominado por subarbustos y un estrato bajo de 5 cm dominado por gramíneas postradas. La comunidad II (CSII) está indicada por *Aristida venustula*, *Piptochaetium montevidense*, *Evolvulus sericeus* y *Schyzachirium spicatum*; presenta generalmente un sólo estrato herbáceo abierto de 5 cm de altura y está asociada a la presencia de pedregosidad y/o rocosidad en la superficie del suelo. La comunidad III (CSIII), indicada por *Lolium multiflorum*, *Stipa charruana*, *Cynodon dactylon* y *Paspalum dilatatum*, presenta en el mayor número de casos un estrato de 30 cm de altura dominado por gramíneas erectas y un estrato bajo de 5 cm dominado por gramíneas postradas.

Para el presente trabajo se re-analizaron los datos obtenidos por Lezama *et al.* (2008). En esta ocasión se tomó en cuenta la cobertura de las especies y no la presencia-ausencia de las mismas. Esto se debió a que el comportamiento espectral de la comunidad CSII era muy similar al de las otras dos comunidades, lo cual dificultaba su

identificación. La clasificación de la matriz de censos de vegetación por cobertura de las especies resultó en la identificación de dos unidades de pastizales con características espectrales definidas (Lezama *et al*, en prensa). Las especies indicadoras de la Unidad I son: *Eragrostis neesi*, *Piptochaetium montevidense*, *Aristida murina*, *Chevreulia sarmentosa*, *Paspalum notatum*, *Andropogon ternatus* y *Aristida venustula*. Esta unidad presenta alta variación fisonómica, desde stands con un sólo estrato herbáceo de 5 cm hasta stands con dos estratos, uno alto de 30 cm de altura dominado por subarbustos y otro bajo de 5 cm dominado por gramíneas postradas. Ocupa preferentemente áreas convexas y laderas de pendiente leve a pronunciada y presenta una cobertura vegetal del suelo media alta (moda 80, mínima 50 y máxima 100). Las especies indicadoras de la Unidad II son: *Lolium multiflorum*, *Stipa charruana* y *Paspalum dilatatum*. La fisonomía representativa corresponde a un estrato de 30 cm de altura dominado por gramíneas erectas y un estrato bajo de 5 cm dominado por gramíneas postradas. La cobertura vegetal del suelo es alta (moda 90, mínima 80 y máxima 100) y ocupa preferentemente superficies planas altas del paisaje y laderas de pendiente moderada. La unidad I presenta aproximadamente un 60% de la cobertura de gramíneas estivales, en tanto que la unidad II presenta mayores valores de cobertura de gramíneas invernales alcanzando el 45 %. Los demás grupos funcionales se presentan en proporciones semejantes en ambas unidades de vegetación.

Caracterización de la distribución espacial de las comunidades vegetales:

Para cartografiar las diferentes unidades de pastizales resultantes de la caracterización fitosociológica en base a la abundancia de especies, se realizó una clasificación supervisada de imágenes provistas por el sensor Thematic Mapper a bordo del satélite LANDSAT 5 (resolución espacial de 30 x 30 metros). Las imágenes que este satélite provee están conformadas por siete bandas, en donde cada una de ellas registra la intensidad de la energía reflejada y/o emitida por los objetos de la superficie en diferentes porciones del espectro electromagnético (Tabla 1).

Tabla 1. Características espectrales de las bandas del sensor TM a bordo de la plataforma satelital Landsat 5

Banda	Longitud de onda (μm)
1	0,45-0,52 (azul)
2	0,52-0,60 (verde)
3	0,63-0,69 (rojo)
4	0,76-0,90 (infrarrojo cercano)
5	1,55-1,75 (infrarrojo medio)
6	10,4-12,5 (infrarrojo térmico)
7	2,08-2,35 (infrarrojo medio)

Se utilizaron cuatro escenas (Path: 223,224; Row: 83,84) y dos fechas por cada escena (30/11/04 y 17/01/05 para las escenas 224-83 y 224-84; 07/11/04 y 26/01/05 para las escenas 223-83 y 223-84), de forma de captar diferencias fenológicas en la vegetación. Las imágenes fueron corregidas geoméricamente utilizando 30 puntos de control terrestres (GCP) homogéneamente distribuidos en el área de estudio y con un error asociado de 0.5 píxeles. El método del re-muestreo utilizado fue el del vecino más cercano (nearest neighbor) de forma de no alterar la información espectral. Para cada escena una de las imágenes fue georeferenciada en la proyección más usada en Uruguay (Yacaré: Transverse Mercator; Elipsoide; Hayford, internacional 1924; Datum, Yacaré) y la otra corregida a la primera, de forma de compatibilizar la información espectral con el resto de la información digital disponible en el país (Carta de suelos, geomorfología, datos del censo agropecuario, etc.). Las imágenes fueron corregidas radiométrica y atmosféricamente para lograr que la información espectral sea comparable en tiempo y espacio (Chuvioco, 2002). Las imágenes se recortaron de manera de caracterizar exclusivamente a las unidades de suelo abarcadas en el área de estudio según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano *et al.*, 1976). Para cada par de imágenes (223-83/84 y 224-83/84) se realizó un compuesto multitemporal (superposición de imágenes de las diferentes fechas) y un mosaico (ensamblaje de distintas imágenes que cubren, al menos, parte del mismo territorio) dando lugar a dos imágenes multitemporales denominadas mosaico 223 y 224, los cuales poseen cada uno 12 bandas (6 bandas reflectivas por cada fecha; todas las bandas del

sensor menos la térmica). El procesamiento digital de las imágenes se llevó a cabo mediante el programa ENVI 4.2- IDL 6.2.

Debido a que cada uno de los mosaicos tenía distintas fechas de adquisición de las imágenes, estos fueron clasificados y evaluados de forma independiente. El primer paso para llevar a cabo una clasificación supervisada es el desarrollo de un esquema conceptual de clasificación. Éste se define como el conjunto de clases o categorías de interés para ser identificadas y discriminadas. El proceso de clasificación se basa en la hipótesis de que las características estructurales y funcionales de la vegetación determinan diferencias en la cantidad y calidad de la radiación reflejada por la superficie (Curran, 1985). Por ello se definieron dos categorías que corresponden a las unidades de pastizales naturales definidas en el análisis fitosociológico, además de un conjunto de coberturas / usos del suelo que permitieran caracterizar el resto de la heterogeneidad del área, (eg.: monte nativo, forestación, cultivos de invierno y verano, agua, etc.). Para las comunidades de pastizales, se digitalizaron 31 polígonos de entrenamiento y 27 de control en el mosaico 224, mientras que para el mosaico 223 fueron 17 los de entrenamiento y 9 los de control. Para las restantes clases de cobertura / uso de suelo se generaron, mediante fotointerpretación de las imágenes, 67 polígonos de entrenamiento y 55 de control para el mosaico 224, y 63 de entrenamiento y 39 de control para el mosaico 223. En ambos mosaicos se utilizó la información espectral de 12 bandas reflectivas (6 bandas en cada fecha) 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). El método de máxima verosimilitud utiliza el vector de medias y la matriz de co-varianza de los píxeles de las áreas de entrenamiento de cada clase para asignar los píxeles de la imagen a cada una de las clases definidas en función de su probabilidad de pertenencia. Cada píxel de la imagen es asignado a la clase más probable a partir de un umbral definido por el usuario, en este caso del 90%. Este algoritmo de clasificación es el más utilizado en teledetección, por su robustez y por ajustarse con rigor a la disposición original de los datos (Chuvieco, 2002). A cada una de las clasificaciones resultantes se le aplicó un filtro modal móvil de 3 x 3 píxeles. Este tipo de filtro es comúnmente utilizado para suavizar la apariencia de “sal y pimienta” que aparece en las clasificaciones. El fenómeno se observa frecuentemente en clasificaciones digitales cuando existe una excesiva fragmentación. Suele ocurrir que píxeles de una cierta categoría se encuentran salpicados por píxeles asignados a otras categorías, perdiéndose su unidad geográfica y dificultando la interpretación y posterior

representación cartográfica. La cartografía final se realizó mediante la unión de las clasificaciones de ambos mosaicos, obteniendo así el mapa de cobertura / usos del suelo para la unidad geomorfológica del Cristalino. La clasificación supervisada de los mosaicos y la posterior unión de los mismos se llevó a cabo mediante los programas ENVI 4.2-IDL 6.2 y ERDAS imagine 8.7.

La precisión de la clasificación fue evaluada comparándola con la información de la cobertura real obtenida previamente. Para cada uno de los mosaicos se construyó una matriz de contingencia entre el resultado de la clasificación (filas) y la información de los píxeles correspondientes a los polígonos de control digitalizados (información de referencia o “verdad de campo”, representada en las columnas) (Congalton, 1991). Esto permitió calcular el acierto global, el coeficiente Kappa y la precisión del productor y del usuario. El acierto global fue calculado dividiendo el número de elementos (píxeles) correctamente clasificados (diagonal de la matriz) entre el número total de píxeles incluidos en el proceso de evaluación. El coeficiente Kappa mide la diferencia entre la clasificación realizada y la esperada simplemente por azar. En otras palabras, este coeficiente pretende evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con exactitud significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria. Un valor de Kappa igual a 1 indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar. Por su parte un valor negativo supone también una clasificación pobre.

Finalmente, se debe tener en cuenta que el acierto global puede ocultar importantes diferencias entre categorías, que esconden niveles de exactitud muy diversos. Por ello, se analizan las celdas marginales de la matriz. En el caso de las columnas, los marginales indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella. Estos se denominan errores de omisión y se calculan como el complemento de la Precisión del Productor (Errores de Omisión = $1 - \text{Precisión del Productor}$). La precisión del productor se calculó dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados de una categoría entre el número total de píxeles de esa categoría derivados de los datos de referencia (columnas de la matriz).

Por otro lado, en el caso de las filas, las celdas marginales expresan los errores de comisión. Esto es, píxeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra. El error de comisión se calcula como el complemento de la Precisión del Usuario (Errores de Comisión = $1 - \text{Precisión del Usuario}$). La precisión del usuario se calculó dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados de una

categoría entre el número total de píxeles que fueron clasificados dentro de esa categoría (filas de la matriz).

La relación entre las diferentes clases cartografiadas y las distintas unidades de suelo se realizó mediante la superposición de la clasificación supervisada final con la carta de unidades de suelo del Uruguay en formato vectorial. Se obtuvo la cantidad de superficie de cada cobertura / uso del suelo asociada a cada tipo de suelo. Finalmente, para evaluar la proporción de la región modificada por acciones agropecuarias, se analizó la clasificación resultante cuantificando el porcentaje del área de estudio ocupada por forestación, suelo desnudo en ambas estaciones y cultivos de invierno y verano. Estos resultados, junto con los resultados del resto de las clases (campo natural y monte nativo), fueron comparados con los últimos resultados del Censo General Agropecuario (MGAP, DIEA, 2000). Las operaciones SIG fueron realizadas con los programas ArcMap-ArcGis 8.3 y Arc View 3.2.

Resultados

Como resultado de la clasificación supervisada del mosaico 224 (1 millón de hectáreas aproximadamente) se obtuvo que el 68.6% del área correspondió a pastizal natural, del cual el 27.5 y el 41.1% corresponde a las unidades de pastizales I y II respectivamente. El resto del territorio aparece ocupado por agricultura (cultivos de invierno 10.7%, cultivos de verano 2.4% y suelo desnudo en ambas estaciones 8.0%), forestación (3.3%), monte nativo (1.9%) y cuerpos de agua (0.1%). (Figura 2). El porcentaje de píxeles sin clasificar (dado que la probabilidad de pertenencia a una clase fue menor al 90%) fue de 5%.

Por otro lado, la clasificación supervisada del mosaico 223 mostró que de las aproximadamente 570.000 hectáreas clasificadas, el 65.3% correspondió a pastizales naturales. En este mosaico las unidades I y II ocuparon el 16.8 y el 48.5% respectivamente. Las clases pertenecientes a la categoría agricultura ocuparon el 18.8% del territorio (cultivos de invierno 12.5%, cultivos de verano 1.6% y suelo desnudo 5.3%), mientras que la forestación ocupó el 4.3%, el monte nativo el 0.9% y los cuerpos de agua el 0.1%. En este caso el porcentaje de píxeles sin clasificar fue de 10% (Figura 2).

El mapa de vegetación resultante, luego del ensamblaje de ambas clasificaciones, muestra que de las aproximadamente 1.3 millones de hectáreas analizadas, el 69.2% (899.600 ha) correspondió a pastizales naturales. Las unidades I y II de pastizales se encontraron representadas en un 25.7 y 43.5% respectivamente. El resto del territorio estuvo ocupado en un 20.4% (265.200 ha) por agricultura (cultivos de invierno 11.1%, cultivo de verano 2.1% y suelo desnudo en ambas estaciones 7.2%), 3.7% por forestación (48.100 ha), 1.6% por monte nativo (20.800 ha) y 0.1% por cuerpos de agua (1.300 ha). El porcentaje de píxeles sin clasificar fue de 5% (59.800 ha) (Figura 3).

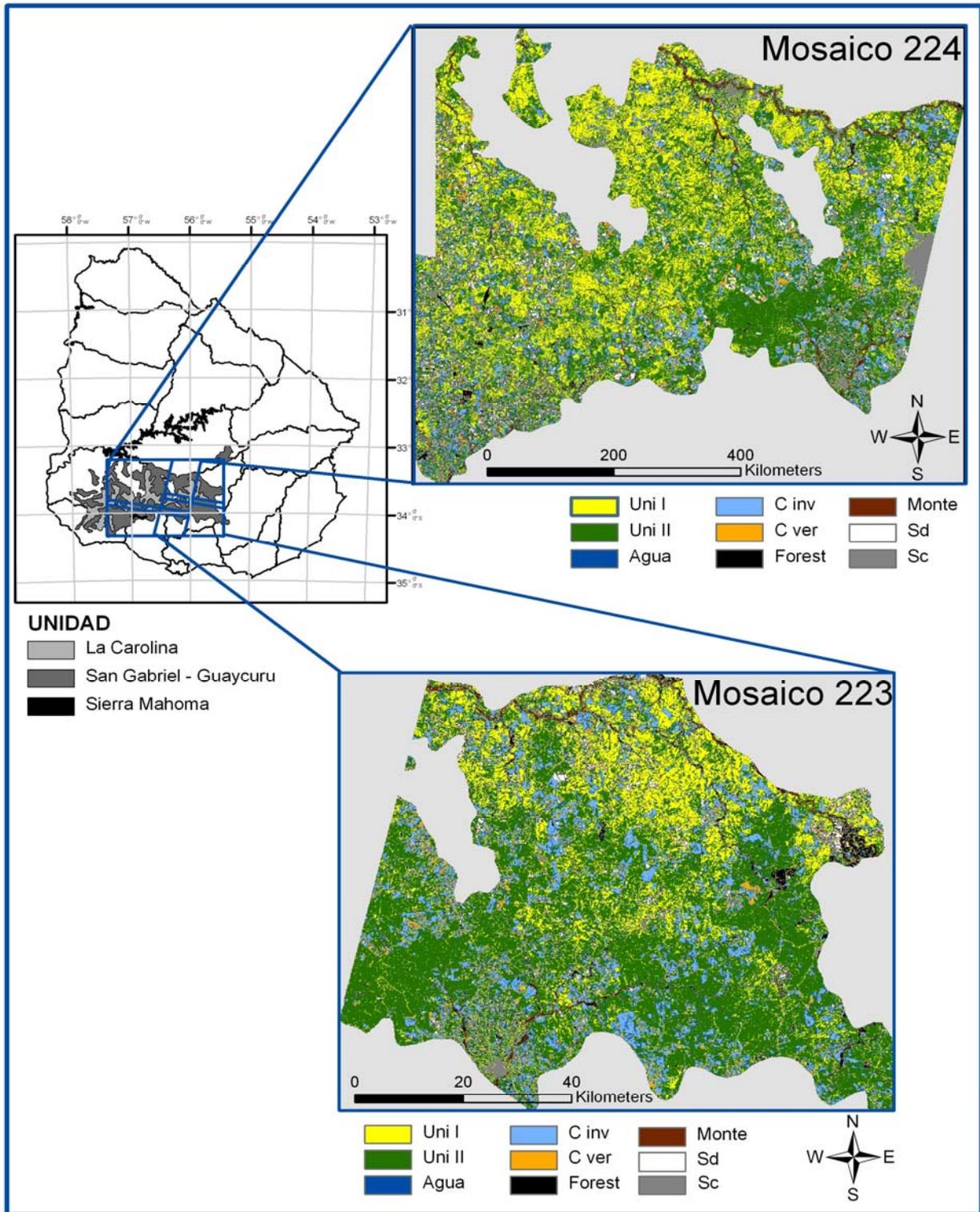


Figura 2: Mapas de uso y cobertura del suelo correspondiente a las clasificaciones supervisadas de los mosaicos 223 y 224 correspondientes a la región Centro-Sur de Uruguay. Se presenta asimismo el área abarcada por cada mapa y las unidades de suelo consideradas. Uni. I: Unidad I; Uni. II: unidad II; C inv: Cultivo de invierno; C ver: Cultivo de verano; Forest: Forestación; Monte: Monte nativo; Sd: Suelo desnudo

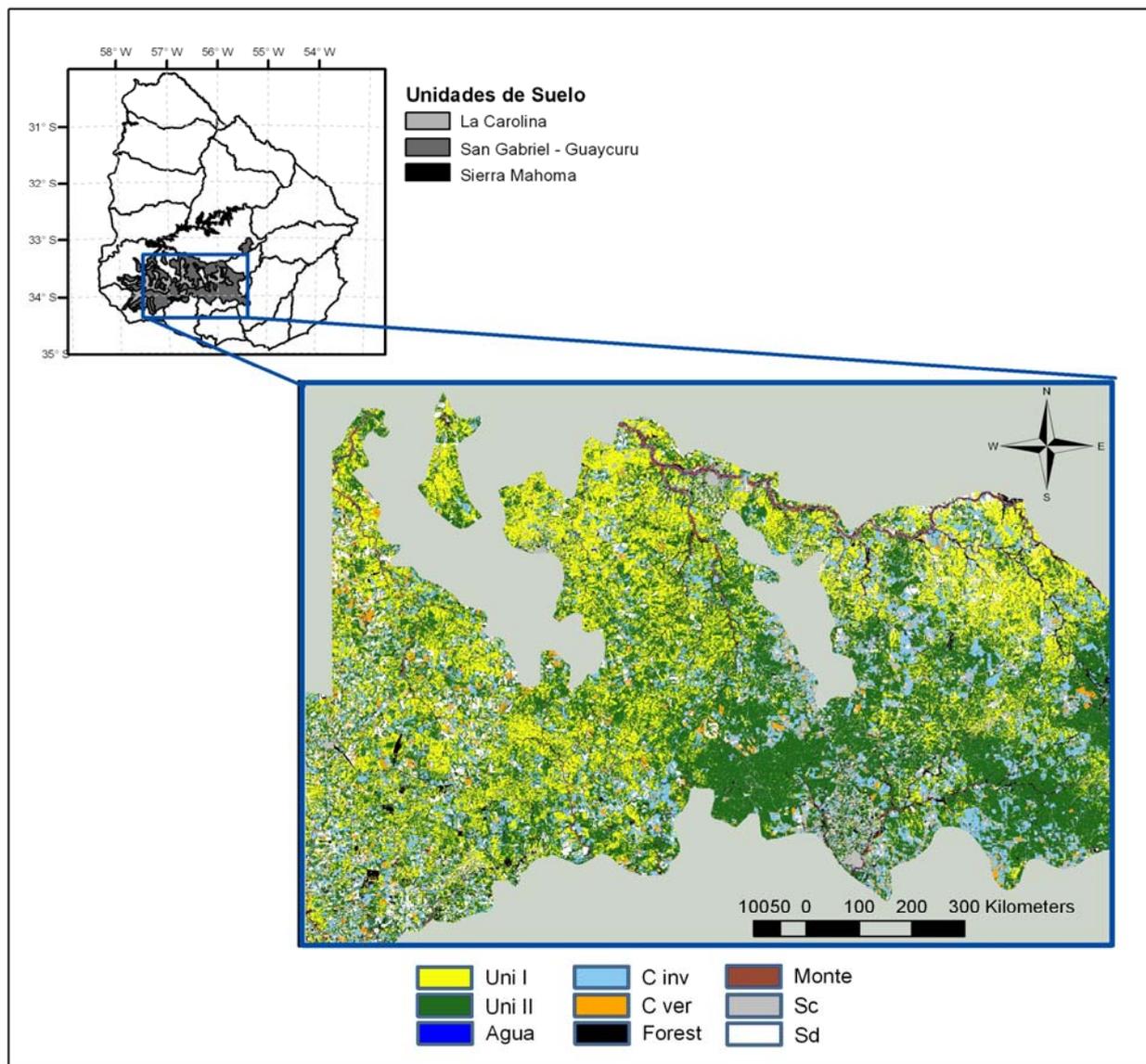


Figura 3: Mapa de cobertura / uso del suelo para la región Centro-Sur (Cristalino) resultante del ensamblado de los mosaicos 223 y 224, su ubicación en el territorio uruguayo y unidades de suelo consideradas en el trabajo. Uni. I: Unidad I; Uni. II: Unidad II; C inv: Cultivo de invierno; C ver: Cultivo de verano; Forest: Forestación; Monte: Monte nativo; SD: Suelo desnudo en ambas estaciones; Sc: Sin clasificar.

La evaluación de las clasificaciones mostró resultados diferentes en ambos mosaicos. Para el mosaico 224 la evaluación de la caracterización mostró resultados satisfactorios, la exactitud global fue de 95.3% y el coeficiente Kappa fue de 0.9422. La matriz de contingencia para este mosaico se muestra en la Tabla 2. En cuanto a la precisión del productor y usuario, todas las clases presentaron niveles de aciertos similares y muy altos. Es de destacar que la precisión del productor y del usuario para la unidades I y II fueron de 74.94 - 86.79%, y 77.14 - 68.64% respectivamente (Tabla 3).

Tabla 2: Matriz de contingencia de la clasificación supervisada correspondiente al mosaico 224. Los valores indicados en la diagonal de la matriz corresponden al porcentaje de píxeles clasificados correctamente. Los valores marginales a la diagonal corresponden a los píxeles erróneamente clasificados. Uni. I: Unidad I; Uni. II: Unidad II; C inv: Cultivo de invierno; C ver: Cultivo de verano; Forest: Forestación; Monte: Monte nativo; SD: Suelo desnudo en ambas estaciones.

CLASE		Uni. I	Uni. II	C. Inv	C. Ver	Forest	Monte	Agua	SD
CLASIFICACIÓN	Uni. I	74.94	16.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Uni. II	24.83	77.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	C. Inv	0.00	6.67	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	C. Ver	0.00	0.00	0.00	100	0.00	0.00	0.00	0.00
	Forest	0.00	0.00	0.00	0.00	88.24	0.00	0.00	0.00
	Monte	0.00	0.00	0.00	0.00	11.76	92.72	0.00	0.00
	Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100	0.00
	SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.64

Tabla 3: Precisión del productor (a) y del usuario (b), expresados en porcentajes para el mosaico 224

Clase	a	b
Uni. I	74,94	86,79
Uni. II	77,14	68,64
Agua	100,00	100,00
C. invierno	100,00	98,40
C. verano	100,00	100,00
Forestación	88,24	100,00
Monte	99,72	95,22
SD	99,64	100,00

La evaluación de la clasificación del mosaico 223 generó una exactitud global de 96.4 % y el coeficiente Kappa fue de 0.9553 (Tabla 4). En este caso, la precisión del productor y usuario para las unidades de pastizales fueron muy disímiles y algo bajas. La unidad I mostró una precisión del productor de 27.91%, mientras que la precisión del usuario fue de 100%. Así mismo, la unidad II presentó una precisión del productor y del usuario de 100 y 68.84% respectivamente. En cuanto al resto de las clases, ambas precisiones mostraron similares y altos niveles de aciertos (Tabla 5).

Tabla 4: Matriz de contingencia de la clasificación supervisada correspondiente al mosaico 223. Los valores indicados en la diagonal de las matrices corresponden al porcentaje de píxeles clasificados correctamente. Los valores marginales a la diagonal corresponden a los píxeles erróneamente clasificados. Uni. I: Unidad I; Uni. II: Unidad II; C inv: Cultivo de invierno; C ver: Cultivo de verano; Forest: Forestación; Monte: Monte nativo; SD: Suelo desnudo en ambas estaciones.

b) CLASE		Uni. I	Uni. II	C. Inv	C. Ver	Forest	Monte	Agua	SD
CLASIFICACIÓN	Uni. I	27.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Uni. II	72.09	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	C. Inv	0.00	0.00	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	C. Ver	0.00	0.00	0.00	99.18	0.00	0.00	0.00	0.00
	Forest	0.00	0.00	0.00	0.00	99.45	1.07	0.00	0.00
	Monte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	98.14	0.00	0.00
	Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.18	0.00
	SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	83.14

Tabla 5: Precisión del productor (a) y del usuario (b), expresados en porcentajes para el mosaico 223

Clase	a	b
Uni. I	27,91	100
Uni. II	100	68,84
agua	99,18	100
C. invierno	100	100
C. verano	99,18	100
Forestación	99,55	98,67
Monte	98,76	100
SD	83,14	100

El análisis de la relación entre los tipos de suelo y las clases cartografiadas mostró que la unidad II se encuentra presente y en gran proporción (superior al 40%), en todas las unidades de suelo consideradas. La unidad I no es mayoritaria en ninguna unidad de suelo y solo ocupa el segundo lugar en importancia en San Gabriel - Guaycurú. En el resto de las unidades de suelo aparece superada o igualada por la agricultura. En tanto, la agricultura (suelo desnudo en ambas fechas de adquisición de las imágenes, cultivos de invierno y verano) y la forestación se encuentran presentes en todas las unidades, siendo “La Carolina” la de mayor porcentaje para la agricultura (27.5%) y San Gabriel-Guaycurú para la forestación (4.5%). (Figura 4).

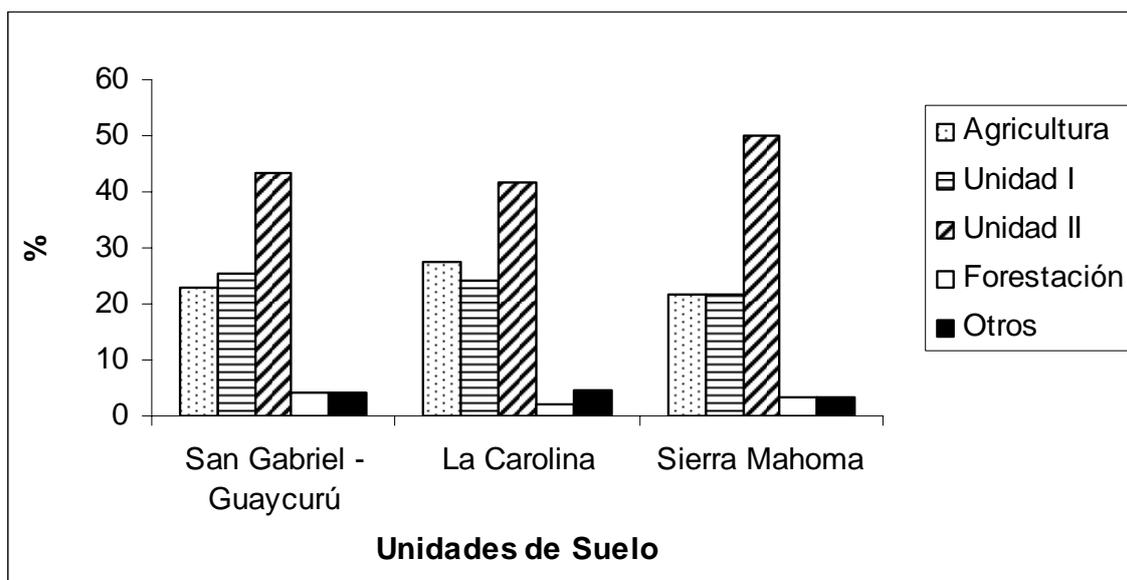


Figura 4: Porcentaje de la superficie ocupada por los distintos usos del suelo; unidades de pastizales, agricultura, forestación y otros en las unidades de suelo consideradas en el estudio.

La tabla 6 muestra los resultados de la clasificación realizada y las estadísticas de las unidades censales que se superponen con el área de estudio. Los porcentajes de coberturas y usos del suelo considerados coinciden, en términos generales, con las estadísticas oficiales otorgadas por el Censo General Agropecuario (MGAP, DIEA, 2000). Sin embargo las principales acciones agropecuarias (agricultura intensiva y forestación) duplicaron su superficie en estos últimos 5 años. (Tabla 6).

Tabla 6: Porcentajes de usos / coberturas del suelo obtenidos luego del ensamblaje de las dos clasificaciones y los datos relevados del Censo General Agropecuario 2000.

Clase	Clasificación (% del área)	Censo Agropecuario (% del área)
Pastizal natural	69.2	60.1
Agricultura intensiva	20.4	10.3
Monte nativo	1.6	1.3
Forestación	3.7	1.8

Discusión

El presente estudio proporciona la primera descripción espacialmente explícita de la cobertura y uso del suelo correspondiente a la Región geomorfológica del Centro-Sur (Cristalino) del Uruguay. Los resultados obtenidos, a partir del ensamblaje de las clasificaciones supervisadas de los mosaicos 223 y 224, muestran que el 69.2 % del área se encuentra cubierto por pastizal natural. Las unidades I y II de pastizal ocuparon el 25.7 y 43.5 % del área de estudio respectivamente. No obstante, existe la posibilidad de que este resultado se encuentre algo sesgado debido al bajo número de polígonos de entrenamiento y control digitalizados para el mosaico 223, ocasionando que tanto la precisión del productor y usuario para cada clase de pastizal sea baja. A su vez, puede haber ocurrido que los mejoramientos extensivos (tecnología utilizada para incrementar la oferta forrajera a partir de la introducción de especies con alto valor forrajero sobre el tapiz natural, por ejemplo, *Lotus tenuis*, *Lotus pedunculatus*, *Trifolium repens*, *Lolium multiflorum*, *Bromus auleticus*, *Holcus lanatus*, etc) hayan sido “confundidos” y caracterizados como pastizal natural. Seguramente en alguna etapa del crecimiento, las pasturas mejoradas tengan un comportamiento espectral muy similar al del campo natural, o más específicamente, al de una unidad de pastizal cartografiada en este trabajo. Pese a esto, la cartografía muestra una elevada precisión a la hora de discriminar entre los distintos usos del suelo.

La aproximación fitosociológica utilizada por Lezama *et al.* 2008 para caracterizar las comunidades de pastizales se basó en la presencia - ausencia de especies, lo que permitió identificar tres comunidades de pastizales. Si bien estas presentaban fisonómicamente y en la composición de especies características distintivas, las mismas no se vieron reflejadas en su comportamiento espectral, es decir, la respuesta espectral de una de estas comunidades (comunidad CSII) era muy similar al de las otras. Así mismo dicha comunidad presentaba otros inconvenientes que dificultaban su cartografía: se encontraba en parches pequeños lo que dificultaba su identificación y por ende la digitalización de los polígonos de entrenamiento y control. Debido a esto se reanalizaron los datos, tomando en cuenta esta vez la abundancia de especies. Esto permitió identificar 2 unidades de pastizales con características espectrales bien definidas y que a su vez se encontraban en parches muy extensos (Lezama *et al.* en prensa).

La cartografía de las coberturas / usos del suelo para la región se realizó mediante la clasificación supervisada de imágenes Landsat TM, las cuales diferían en la fecha de

adquisición. Clasificaciones previas de mosaicos que incluían todas las imágenes, mostraron que existían patrones notorios que respondían a las diferentes fechas de adquisición de las imágenes y no a la cobertura / uso del suelo. Esto implicó que cada par de imágenes correspondientes a la misma fecha (mosaicos 223 y 224) fueran clasificadas por separado. Posteriormente la combinación de las dos clasificaciones generó el mapa de vegetación para la región geomorfológica del Cristalino.

La evaluación de los mapas de usos y coberturas del suelo mostraron resultados satisfactorios en el mosaico 224 y no tan satisfactorios en el mosaico 223. En el primero, la exactitud global y el coeficiente kappa generado por la matriz de contingencia fueron muy buenos. La precisión del productor y del usuario presentó niveles muy altos para las clases consideradas, otorgándole una gran confiabilidad a los resultados. Por otro lado, la evaluación del mosaico 223 mostró una exactitud global y un coeficiente Kappa elevado. Sin embargo, tanto la precisión del productor como la del usuario presentaron altos y bajos niveles. Las clases cultivos de verano e invierno, suelo desnudo, forestación, monte nativo y cuerpos de agua presentaron porcentajes de aciertos muy altos, mientras que la unidad I de pastizales presentó bajos niveles de precisión del productor y altos del usuario. Así mismo, la unidad II exhibió niveles aceptables en ambos casos. Esto podría estar ocasionando un sesgo en los resultados correspondientes a la Unidad I de pastizal que se traducirían en diferencias, por ejemplo, a la hora de su comparación con el Censo General Agropecuario. Las diferencias en las precisiones para las unidades de pastizales podrían estar ocasionadas, como se menciona anteriormente, por la baja cantidad de polígonos de entrenamiento y control utilizados para clasificar y evaluar dicho mosaico. Cabe destacar que la confiabilidad de este mapa es muy alta para las clases que obtuvieron altos porcentajes de acierto en las precisiones del productor y del usuario (cultivos, forestación, etc.).

El análisis de la relación entre las clases cartografiadas y el tipo de suelo no mostró una asociación directa entre ellos. La unidad II se encuentra representada en todas las unidades de suelo consideradas, siendo la dominante en la región. Esto podría estar indicando que dicha unidad es muy utilizada por el sector pecuario, fundamentalmente para la ganadería extensiva. Por otro lado, la unidad I se encuentra en menor medida representada, siendo en la unidad “San Gabriel-Guaycurú” la segunda con mayor proporción. En el resto de las unidades se ve superada o igualada por la agricultura. Posiblemente la distribución espacial de las unidades de pastizales se asocie a alguna otra variable no tomada en cuenta en este trabajo, como por ejemplo, el

pastoreo, la topografía, disponibilidad de agua, grupos de suelos CONEAT, etc. Por su parte, la agricultura se encuentra asociada, en mayor o menor medida, a todas las unidades de suelo. La unidad de suelo “La Carolina” es la que presenta el mayor porcentaje de área cultivada, debido a que allí dominan los Brunosoles eutrícos y Vertisoles. Estos tipos de suelos son de buena aptitud para el uso agrícola y pastoril muy diversificado y con pocas limitaciones. La materia orgánica es elevada y muy estable (Durán & Préchac, 2007), lo que genera un escenario muy favorable para que se desempeñen tareas agrícolas y no tan favorable para la forestación. Esto podría confirmar la expansión de los cultivos a expensas de campo natural, encontrándose la unidad II de pastizal en una creciente amenaza. Por otro lado, “San Gabriel de Guaycurú” es la unidad con menor porcentaje de agricultura y por lo tanto con mayor porcentaje de pastizales naturales. Aquí dominan los Brunosoles sub-eutrícos, los cuales presentan una aptitud para el uso agrícola moderada. La materia orgánica es media y la profundidad es algo limitada (Durán & Préchac, 2007), generando un contexto favorable para la ganadería extensiva. Esta unidad a su vez presenta la mayor proporción de suelo destinado a la forestación. Las tierras destinadas principalmente a la forestación son aquellas que se caracterizan por ser suelos moderadamente profundos y superficiales de textura medias gravilosas; moderadamente bien drenados con predominio de fertilidad media. Estas tierras son denominadas “suelos con prioridad forestal” según el decreto 191/067 (MGAP). En base al CONEAT las zonas con prioridad forestal para el cristalino son: zona 5, zona 2, zona 8 y zona 9 (Ley N° 536). Finalmente, la unidad “Sierras de Mahoma” dominada por la unidad II, presenta igual proporción de agricultura y unidad I de pastizal. Esta unidad de suelo se caracteriza por presentar afloramientos rocosos y suelos con aptitud de uso agrícola moderados, generando un impedimento a la hora de realizar cualquier actividad agrícola, ya sea forestación como agricultura intensiva. Precisamente por esto, las unidades de pastizales ocupan más del 70% del área.

La ausencia de información y mapas de vegetación para esta zona del país impide comparar los resultados de este trabajo, sin embargo los resultados coinciden, en términos generales, con las estadísticas oficiales otorgadas por el Censo General Agropecuario para esa zona del país (MGAP, DIEA, 2000). Baeza *et al.* (2010) caracterizaron estructural y funcionalmente la región geomorfológica del basalto superficial. El porcentaje de pastizal natural para esa zona del país fue mucho mayor que para la región Centro-Sur, mientras que la superficie ocupada por forestación, cultivos de invierno y verano fue mucho menor. Esto podría deberse a que los suelos predominantes

en esa zona son superficiales, generando un inconveniente a la hora de realizar dichas practicas. Precisamente por esto la principal acción agropecuaria para esa zona del país es la ganadería extensiva. La región Centro-Sur, por el contrario, es un área vinculada al desarrollo de la agricultura intensiva y forestación y por lo tanto, se caracteriza por estar altamente modificada por actividades antrópicas. Así mismo, no se puede negar que la ganadería extensiva es una importante actividad para la zona, dado que más de la mitad del territorio está cubierto por pastizales naturales.

Las principales acciones agropecuarias para la región Centro-Sur han duplicado su superficie en 5 años, pasando de 157.300 ha en el 2000 (133.900 ha para la agricultura intensiva y 23.400 ha para la forestación) (MGAP, DIEA, 2000) a 313.300 ha en el 2005 (265.200 y 48.100 para la agricultura y forestación respectivamente). Si bien se trata de datos obtenidos con metodologías diferentes que impiden una comparación formal, evidencian un avance importante de la agricultura intensiva y forestación. Buena parte de este incremento se asocia a la expansión del cultivo de soja y de las áreas forestadas con pinos y eucaliptos, a expensas de áreas de pastizales naturales. Paruelo *et al.* (2006) plantean que estos hechos forman parte de un fenómeno amplio y preexistente conocido como “agriculturización”. Este fenómeno no se limita únicamente al Uruguay, sino que también se manifiesta en otros países de Sudamérica como Argentina, Brasil, Bolivia y Paraguay. La “agriculturización” es un caso particular de cambio en el uso de la tierra donde se sustituye completamente la cobertura vegetal y constituye una de las principales dimensiones del conocido cambio global. Las principales modificaciones en la estructura y el funcionamiento de los sistemas naturales asociadas a transformaciones agrícolas son por ejemplo, la pérdida de diversidad biológica, la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera y gases “invernaderos” como el metano y óxido nítrico, cambios en la evapotranspiración, etc. Una de las consecuencias directas de estos cambios es que se compromete la capacidad de brindar servicios ecosistémicos.

El trabajo aquí presentado llena un vacío de información al describir de forma detallada y espacialmente explícita el uso y la cobertura de una importante porción del territorio uruguayo. El tipo de información aquí desarrollada puede ser de utilidad para organismos gubernamentales, productores agropecuarios e investigadores vinculados a la producción, ya que es posible, por ejemplo, estimar superficies sembradas con diferentes cultivos, monitorear la dinámica espacial y temporal de los recursos forrajeros, realizar prospecciones de escenarios futuros y desarrollar estrategias relacionadas al manejo de la tierra. Así mismo, brinda no sólo una descripción de la dinámica de los cambios sino que

también constituye un pre-requisito para la evaluación de sus consecuencias sobre el funcionamiento ecosistémico y sobre la vulnerabilidad de las áreas remanentes de pastizales. Forma parte de una información básica e imprescindible para la generación de un esquema de planificación de uso de los sistemas naturales.

Por otra parte, cabe mencionar que este trabajo sienta las bases para un análisis del funcionamiento ecosistémico de las unidades de pastizal de la región Centro-Sur de Uruguay. Como se menciona anteriormente, la unidad I presenta un claro predominio de gramíneas estivales (gramíneas C4), que se caracterizan por poseer un pico de captación de carbono en verano (Epstein *et al.* 1997). Así mismo, la Unidad II presenta un predominio de gramíneas invernales (gramíneas C3), cuyo pico de captación de carbono se da en primavera (Altesor *et al.* 2005). La utilización de imágenes satelitales con amplia resolución temporal, como por ejemplo imágenes MODIS, permitiría detectar estas diferencias en las ganancias de carbono y estimar entre otras cosas, la productividad primaria neta aérea de cada unidad, optimizando, por ejemplo el manejo de la oferta de forraje en estos pastizales.

Conclusiones

El presente trabajo muestra que la combinación de técnicas de teledetección con aproximaciones fitosociológicas, constituye un modo muy adecuado y preciso a la hora de describir a nivel regional la cobertura y el uso del suelo. Los resultados de este trabajo indican que la región Centro-Sur se encuentra dominada principalmente por pastizales naturales, los cuales cubren más del 60% del área de estudio. No obstante, estos pastizales se encuentran amenazados por el avance de la frontera agrícola y forestal. A partir de la comparación de los resultados con datos previos, se puede concluir que la mayor parte del área ha sufrido importantes cambios de uso del suelo en la última década. Las principales acciones agropecuarias han duplicado su superficie. Los mapas obtenidos en el presente trabajo, deberían mejorar la comprensión actual de la distribución del uso de la tierra, así como proporcionar una base para evaluar el cambio y tomar decisiones sobre bases objetivas.

Agradecimientos

A Alice Altesor por haberme abierto las puertas para hacer lo que más me gusta. Por su tiempo y apoyo incondicional recibido en todo momento.

A Santiago Baeza por haberme enseñado todo lo que sé ahora, por su tiempo, disposición, paciencia y apoyo constante.

A todos los integrantes del grupo de Ecología de Pastizales; Elsa, Luis, Vale, Claudia, Gastón, Bea, Felipe, Fabiana, Ana Laura y Anaclara que estuvieron presentes en todo momento brindando no solo apoyo y conocimientos, sino que también bromas, risas, compañía y buena onda.

A José Paruelo y todos los integrantes del LART por haberme dado la posibilidad de vivir experiencias inolvidables fuera del país.

A mi familia por estar en las buenas y en las malas y por las palabras de aliento que tanto me ayudaron.

A Gise por estar al lado mío y por ayudarme a cumplir tan ansiado objetivo.

A Alejandro Brazeiro por aceptar leer este informe de pasantía y por sus valiosos aportes.

A todos, muchas gracias.

Bibliografía

- Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echeverría, A.; Canario, D. & Puentes, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Tomo III, Clasificación de Suelos. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Ministerio de Agricultura y Pesca. Montevideo, Uruguay.
- Altesor, A.; Oesterheld, M.; Leoni, E.; Lezama, F. & Rodríguez, C. 2005. Effect of grazing on community structure and productivity of a Uruguayan grassland. *Plant Ecology*. 179: 83-91.
- Baeza, S.; Paruelo, J.M. & Altesor, A. 2006. Caracterización Funcional de la Vegetación de Uruguay Mediante el Uso de Sensores Remotos. *Interciencia* 31: 382-388.
- 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: 72-85.
- Baldi, G.; Guerschman, J.P. & Paruelo, J.M. 2006. Characterizing fragmentation in temperate South American grasslands. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 116: 197-208.
- Baldi, G & Paruelo, J.M. 2008. Land use and land cover in South American temperate grasslands. *Ecology and Society* 13(2):6. (Online) URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art6/>
- Brown de Colstoun, E.C.; Story, M.H.; Thompson, C.; Commisso, K.; Timothy, G.; Smith T.C. & Irons J.R. 2003. National park vegetation mapping using multitemporal Landsat 7 data and a decision tree classifier. *Remote Sensing of Environment*. 85: 316-327.
- Chaneton, E. 2005. Factores que determinan la heterogeneidad de la comunidad vegetal en diferentes escalas espaciales. En: La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas; un homenaje a Rolando León. Oesterheld, M. et al. (eds). Editorial Facultad de agronomía. Buenos Aires, Argentina. Pp. 19-42
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Editorial Ariel, Barcelona, ES.
- Congalton, R. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 37: 35-46.
- Curran, P. J. 1985. Principles of remote sensing. Longman Scientific & Technical, London.
- Decreto 191/06. 16 de junio 2006. Modificación de Suelos de Prioridad Forestal http://www.mgap.gub.uy/Forestal/ModificacionDecreto452_988de16_06_06.pdf
- Dirección Nacional de Meteorología 2010. Estadísticas climatológicas 1961-1990. Disponible en: http://www.meteorologia.com.uy/estadistica_climat.htm

- Durán, A. & Préchac F.G. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Volumen 1. Editorial Hemisferio Sur. Montevideo, Uruguay.
- Epstein, H.E., Lauenroth, W.K., Burke, I.C. & Coffin, D.P. 1997. Productivity patterns of C3 and C4 functional types in the U. S. Great Plains. *Ecology* 82: 722-731.
- Gitay, H. & Noble, I.R. 1997. What are functional types and how should we seek them? In: Plant functional types, their relevance to ecosystem properties and global change. Cambridge Univ. Press. Cambridge.
- Guershman, 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.; 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.
- Henwood W.D. 1998. An overview of protected areas in the temperate grasslands biome. En Parks. Grassland Protected Areas. IUCN, Gland, Switzerland. Pp: 3-8.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. Special report on land use, land-use change, and forestry. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Krapovickas S. and Di Giacomo A.S. 1998. The conservation of Pampas and grasslands in Argentina. *Parks* 8: 47-53.
- Lavorel, S.; McIntyre, S. & Grigulis, K. 1999. Plant response to disturbance in a Mediterranean grassland: How many functional groups? *Journal Vegetation Science*. 10: 661-672
- Lezama, F.; Altesor, A. & Paruelo, J.M. 2008. Relevamiento de pastizales naturales de la región centro-sur del Uruguay. XXII Reunión del Grupo Técnico en Forrajeras del Cono Sur-Grupo Campos.
- Lezama, F., Altesor, A. & Paruelo, J. M. Descripción de la heterogeneidad florística de cuatro regiones geomorfológicas del Uruguay. En: Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA-INIA, en prensa.
- Ley N° 536. Fomento a la forestación y reforestación. 16 de enero de 1995 Asunción.
- Lillesand, T. & Kiefer, R. 1994. Remote sensing and image interpretation. 3rd edition. John Wiley & Sons, NY, US.
- McGuire, A.D.; Sitch, S.; Clein, J.S.; Dargaville, R.; Esser, G.; Foley, J.; Heimann, M.; Joos, F.; Kaplan, J.; Kicklighter, D.W.; Meier, R.A.; Melillo, J.M.; Moore III, B.; Prentice, I.C.; Ramankutty, N.; Reichenau, T.; Schloss, A.; Tian, H.; Williams, L.J. and Wittenberg, U. 2001. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*. 15: 183-206.

- Millot, J.C.; Risso, D. & Methol, R. 1987. Relevamiento de pasturas naturales y mejoramientos extensivos en áreas ganaderas del Uruguay. Informe técnico, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Montevideo.
- Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Estadísticas Agropecuarias (MGAP, DIEA). Censo general Agropecuario 2000. Disponible en Internet: www.mgap.gub.uy
- Panario, D. 1988. Geomorfología del Uruguay. Publicación de la Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, UY.
- Paruelo, J.M.; Jobbajy, E. & Sala, O.E. 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems*. 4: 683-698.
- Paruelo, J.M.; Golluscio, R.A.; Guershman, J.P.; Cesa, A.; Jouve, V.V. & Garbulsky, M.F. 2004. Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning: the case of the Patagonian steppes. *Global Ecology and Biogeography*. 13: 385–395
- Paruelo, J.M.; Guershman, 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. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Perelman, S.; Batista, W. & León R. 2005. El estudio de la heterogeneidad de la vegetación. Fitosociología y técnicas relacionadas. En: La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas; un homenaje a Rolando León. Oesterheld, M. et al. (eds). Editorial Facultad de agronomía. Buenos Aires, Argentina. Pp. 321-350.
- Ramankutty, N. & Foley, J.A. 1999. Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*. 13:997-1027.
- Ramankutty, N.; Foley, J.A. & Olejniczak, N.J. 2002. People on the Land: Changes in Global Population and Croplands during the 20th Century. *Ambio*. 31: 251-257.
- Rosengurtt, B. 1944. Las formaciones campestres y herbáceas del Uruguay. Cuarta Contribución, Agros N°134. Montevideo.
- Sala, O.E.; Laurenroth, W.K.; McNaughton, S.J.; Rusch G. & Zhang X. 1996. Biodiversity and ecosystem functioning in grasslands. En: *Functional Roles of Biodiversity: A Global Perspective*. Mooney, H. A. et al. (eds). England. pp. 129-149.
- Sala, O.E. & Paruelo, J.M. 1997. Ecosystem services in grasslands. En: *Nature's services: societal dependence on natural ecosystem*. Ed. Daily G.C. Island press, Washintong. Pp 237-252.

- Sganga, J.C. 1994. Caracterización de la Vegetación de la República Oriental del Uruguay. En: Contribución de los estudios edafológicos al conocimiento de la vegetación en la República Oriental del Uruguay. Boletín técnico N° 13. Dirección de Suelos y Aguas. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Montevideo, Uruguay. pp. 5-14.
- Shupe, S.M. & Marsh, S.E. 2004. Cover- and density-based vegetation classifications of the Sonoran Desert using Landsat TM and ERS-1 SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*. 93. 131-149.
- Soriano, A. 1991. Río de la Plata Grasslands. In: Coupland R.T. (eds.). Natural Grasslands. Introduction and Western Hemisphere, p. 367–407. Elsevier, Amsterdam, NL.