



Análisis espectral temporal por sistemas ecológicos de la Cuenca Superior del Arroyo Langueyú, Tandil, Región Pampeana Argentina

Temporal spectral analysis by ecological systems of the upper basin of the Langueyú stream, Tandil, Argentine Pampean Region

Historial del Artículo

Recibido:

6 de julio de 2022

Revisado:

21 de octubre de 2022

Aceptado:

24 de noviembre de 2022

Patricia Vazquez^a, Ailín Somoza^b, Nahuel David Sequeira^c,
Daiana Yael Daga^d

^a CONICET/CESAL, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: patriciavazquez@conicet.gov.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4209-4901>

^b CONICET/CESAL, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: somoza.ailin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6283-1438>

^c CONICET/CESAL, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: nahuelsequeira@conicet.gov.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2206-4411>

^d CONICET/CESAL, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: daianadaga@conicet.gov.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7578-8478>

Palabras clave

imágenes satelitales
clasificadas, mapas de cambio,
unidades de paisaje, usos/
cobertura del suelo

RESUMEN

La transformación de ecosistemas naturales a tierras agropecuarias genera importantes consecuencias ambientales, siendo la Región Pampeana Argentina un claro ejemplo de ello. Esta investigación analizó las transformaciones en los usos y coberturas del suelo observadas en los sistemas ecológicos de la Cuenca Superior del Arroyo Langueyú (Tandil) en los períodos comprendidos por los años 1989-2004 y 2004-2019; y se profundizó en el análisis de los cambios de clase de los usos pastizales y pasturas y agrícolas. Para ello, se seleccionaron y procesaron imágenes satelitales, para generar clasificaciones supervisadas, y se detectaron cambios a través de técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica. Las mayores transformaciones en los distintos sistemas se vincularon al aumento continuo del uso agrícola sobre tierras que anteriormente eran pastizales y pasturas, que ahora se ven disminuidas. Finalmente, la metodología aplicada permitió vislumbrar las variaciones más relevantes, obteniendo información de importancia al momento de establecer estrategias para la planificación sustentable de la cuenca.

Keywords

change maps, classified
satellite images, landscape
units, land use/cover

ABSTRACT

The transformation of natural ecosystems to agricultural lands generates important environmental consequences, being the Argentine Pampean Region a clear example of this. This research analyzed the transformations in uses and land covers observed in the ecological systems of the Upper Basin of the Langueyú Stream (Tandil) between the years 1989-2004 and 2004-2019. The analysis of changes between grassland and pastures class in opposition to agriculture class was deepened. For this, satellite images were selected and processed, generating supervised classifications, and changes were detected through remote sensing techniques and geographic information systems. The most important transformation in the different systems were linked to the continuous increase in agricultural use on lands that were previously grasslands and pastures, which are now being diminished. Finally, the applied methodology allowed us to know the most relevant variations, obtaining crucial information to establish strategies for the sustainable planning of the basin.

Introducción

A medida que la población crece, también lo hace la demanda por comida y recursos naturales (Song et al., 2018). Consecuentemente, se estima que, para satisfacer las demandas en los niveles de consumo actuales, hacia el año 2050 la agricultura tendrá que producir globalmente un 60 % más de alimentos (FAO, 2014). Tal incremento en los requerimientos genera, y seguirá generando en el futuro, una búsqueda continua de nuevas tierras para producir alimentos. A su vez, dicha situación promueve una rápida transformación del uso y la cobertura del suelo en los ecosistemas terrestres. En este sentido, mientras que el uso del suelo refiere a las actividades que la sociedad lleva a cabo en un territorio para modificar o conservar su estado, la cobertura del suelo alude a la cubierta biofísica de la superficie de la tierra (Volante et al., 2015).

La transformación de ecosistemas naturales a tierras agropecuarias ocasiona profundas consecuencias ambientales, siendo una de las más importantes la pérdida de biodiversidad debido al reemplazo de la cobertura del suelo original (Cousins et al., 2015); reduciendo la provisión de servicios ecosistémicos (SE), como es el de hábitat y alimento para numerosas especies, el de polinización, el ciclado de nutrientes, el control de plagas, entre otros (Tschamtkete et al., 2012). Lo expresado denota la relevancia de efectuar análisis de los cambios de usos y coberturas de suelo a lo largo del tiempo, con el fin de contribuir a una planificación del territorio que persiga objetivos de sustentabilidad ambiental.

En este aspecto, la evaluación de las transformaciones ocurridas en la superficie terrestre requiere de la administración de información con una adecuada resolución espacial y temporal, la cual debe ser comprensible y de fácil acceso (Vazquez et al., 2008). Ante tal situación, los datos provistos por sensores remotos han demostrado su utilidad para caracterizar grandes territorios por su capacidad de relevar áreas extensas con cierta regularidad (Volante et al., 2015), lo que permite contribuir sustancialmente al entendimiento acerca de los cambios en las coberturas y usos del suelo (Song et al., 2018).

Hoy en día, una gran cantidad de productos derivados de satélites se encuentran en el dominio público o pronto a ser liberados, lo cual los convierte en recursos valiosos y accesibles para ser utilizados por investigadores y tomadores de decisión (Simons et al., 2016). Entre ellos se destacan los productos Landsat, que han sido y continúan siendo de gran aplicación en diferentes análisis temporales de cambios en las coberturas y usos del suelo (Alam et al., 2020;

Chen et al., 2021; Jaramillo & Antunes, 2018; Lara & Gandini, 2014; Lindsay et al., 2019; Pflugmacher et al., 2019; Sequeira et al., 2016; Somoza et al., 2021b; Vazquez et al., 2019).

Puntualizando en las extensas planicies sudamericanas, estas se constituyen en un ejemplo de los cambios ocurridos planteados con anterioridad, donde las transformaciones estuvieron explicadas por la conversión de pastizales y bosques semiáridos en campos para la producción de soja con fines de exportación hacia China y la Unión Europea (Dros, 2004); impulsadas por los avances tecnológicos y por nuevas condiciones en el mercado y precios internacionales (Baldi & Paruelo, 2008).

Siguiendo esta tendencia, debido a su marcada aptitud para proveer servicios agropecuarios (SE de abastecimiento como granos, carnes, leche, fibras, entre otros), en virtud de sus condiciones ecológicas favorables (Viglizzo et al., 2011), los pastizales de la Región Pampeana Argentina han sido fuertemente sustituidos por la agricultura (proceso conocido como agriculturización), como lo demuestran numerosos estudios (Baeza & Paruelo, 2020; Piquer Rodríguez et al., 2018; Sequeira et al., 2021; Somoza et al., 2021a; Vazquez et al., 2019; Volante et al., 2015); viéndose mermada su capacidad para proveer SE, especialmente de regulación (control de la erosión, purificación y provisión de agua, provisión de hábitat, polinización, mantenimiento de biodiversidad, reciclaje de nutrientes y regulación de plagas, entre otros) (Vazquez & Somoza, 2020), que podrían aprovecharse para el desarrollo de una agricultura más sustentable.

Así, las cuencas hidrográficas que integran la Región Pampeana Argentina, de carácter netamente agropecuario, evidencian importantes signos de agriculturización (Vazquez et al., 2014b) y son receptoras de los problemas ambientales derivados (Montico et al., 2019; Vazquez y Somoza, 2020; Vazquez et al., 2014a, 2014b). En función de la importancia para la gestión y planificación territorial de estas unidades geográficas, reflejada en su independencia relativa, límites naturales bien definidos y su capacidad para proporcionar SE necesarios para el desarrollo de los sistemas productivos, es que conforman una unidad de análisis apropiada para llevar a cabo estudios acerca de las transformaciones agroproductivas.

La Cuenca Superior del Arroyo Langueyú (CuSAL) se ubica dentro de la Región Pampeana Argentina, precisamente en el partido de Tandil (Buenos Aires), el cual manifestó una serie de transformaciones en los usos y coberturas del suelo para el período 1989-2019, destacándose un avance

de la agricultura del 61,30 % y un retroceso ganadero del 46,61 % (Somoza et al., 2021b); mostrando diversas variaciones hacia su interior, según el paisaje o sistema ecológico que se trate.

Ante tal contexto surge como hipótesis que en la CuSAL los cambios más significativos están representados por el aumento de las áreas agrícolas en detrimento de las ganaderas, dependiendo su intensidad de las características ecológicas presentes. Por consiguiente, los objetivos de este estudio son: a) analizar las transformaciones en los usos y coberturas del suelo a partir de imágenes satelitales clasificadas en los períodos comprendidos por los años 1989-2004 y 2004-2019 en los sistemas ecológicos de la CuSAL (Tandil); b) y profundizar en el análisis de los cambios de clase de los usos pastizales y pasturas y agrícolas, en los períodos definidos.

Materiales y métodos

Área de estudio

Según la regionalización efectuada por Cabrera (1976), desde el punto de vista fitogeográfico, el partido de Tandil

se enmarca dentro del Distrito Austral de la Provincia Fitogeográfica Pampeana o Área Ecológica Pampeana Austral, según Soriano et al. (1992) (Figura 1).

Sánchez et al. (1999) y Sánchez & Zulaica (2002) y, con mayor profundización para una cuenca en particular Zulaica (2008), definen al partido de Tandil en tres sistemas ecológicos caracterizados por su estructura ecológica, aspectos ecodinámicos, tipos de ocupación e impactos generados por el uso humano de los ecosistemas. La definición y caracterización de estas unidades homogéneas toma en cuenta no solo factores físicos (clima, suelos, geoformas, etc.), sino también biológicos (vegetación) y agronómicos (en relación con su potencial de uso). Las características generales de cada uno se presentan en la Tabla 1.

Dentro del partido se encuentra emplazada la CuSAL (Figura 1), y en correspondencia con los tres grandes sistemas ecológicos en que ha sido espacialmente segmentada (Serranías, Llanura Periserrana y Planicie Distal o Deprimida), el área de estudio fue correlativamente conceptualizada en términos de cuenca alta, media y baja del arroyo Langueyú.

Tabla 1

Principales características de los sistemas ecológicos del partido de Tandil

Sistema ecológico Serranías
Asocia diferentes elementos del sistema orográfico de Tandilia. Presenta un relieve serrano conformado por agrupaciones de cerros cuyas geoformas predominantes son cumbres, laderas más o menos empinadas y amplias lomadas longitudinales con techos suavemente convexos que se interconectan a través de depresiones en las que ocurren valles y llanuras. Los suelos dominantes son poco a muy poco profundos, debido a la presencia de contactos líticos cercanos a la superficie. Se encuentran representados por los subgrupos <i>Hapludol lítico</i> y <i>Argiudol petrocálcico</i> . Presentan además afloramientos rocosos que se extienden en un 13 % del área. Este sistema posee baja capacidad de retención del agua de lluvia. A pesar del poco desarrollo de los suelos posee un índice de productividad moderado y las principales limitaciones corresponden a la profundidad asociada a la baja capacidad de retención de la humedad, a la pendiente y a su elevada susceptibilidad a la erosión.
Sistema ecológico Llanura Periserrana
El sistema integra lomadas relativamente bajas y sectores inferiores de faldeos, que poseen buena aptitud para el desarrollo agrícola. Presenta muy buenas condiciones de drenaje del material loésico que dio origen a las formaciones superficiales. La matriz espacial presenta longitudes de onda variables y ello determina la coexistencia de convexidades pronunciadas y suaves (lomas y lomadas). Los suelos pertenecen al subgrupo <i>Argiudoles típicos</i> que ocupan un 53 % del sistema seguidos por <i>Argiudoles petrocálcicos</i> . No posee restricciones considerables para el cultivo, de ahí la sustitución extensiva de los flechillares típicos que de manera casi continua cubrían el sistema.
Sistema ecológico Planicie Distal
Sucede altiméricamente a la Llanura Periserrana y presenta relieve plano, a veces muy achatado y otras veces ligera y uniformemente inclinado. Las áreas más deprimidas, suelen presentar cuerpos de agua más o menos permanentes. Dentro de este sistema pueden diferenciarse superficies geomórficas con condiciones variables de drenaje. Las dominantes son muy suavemente inclinadas y se caracterizan por poseer una dinámica estrechamente vinculada a condiciones relativamente buenas de drenaje superficial e interno. Las muy buenas productividades concuerdan con la dominancia de suelos <i>Argiudoles típicos</i> . En oposición, el resto del sistema presenta bajos potenciales de escurrimiento superficial y lento drenaje interno. Las capacidades de uso van desde una aptitud agrícola - ganadera a ganadera exclusivamente debido a la posibilidad de anegamientos frecuentes.

Fuente: elaboración propia con base en Sánchez et al. (1999) y Sánchez & Zulaica (2002).

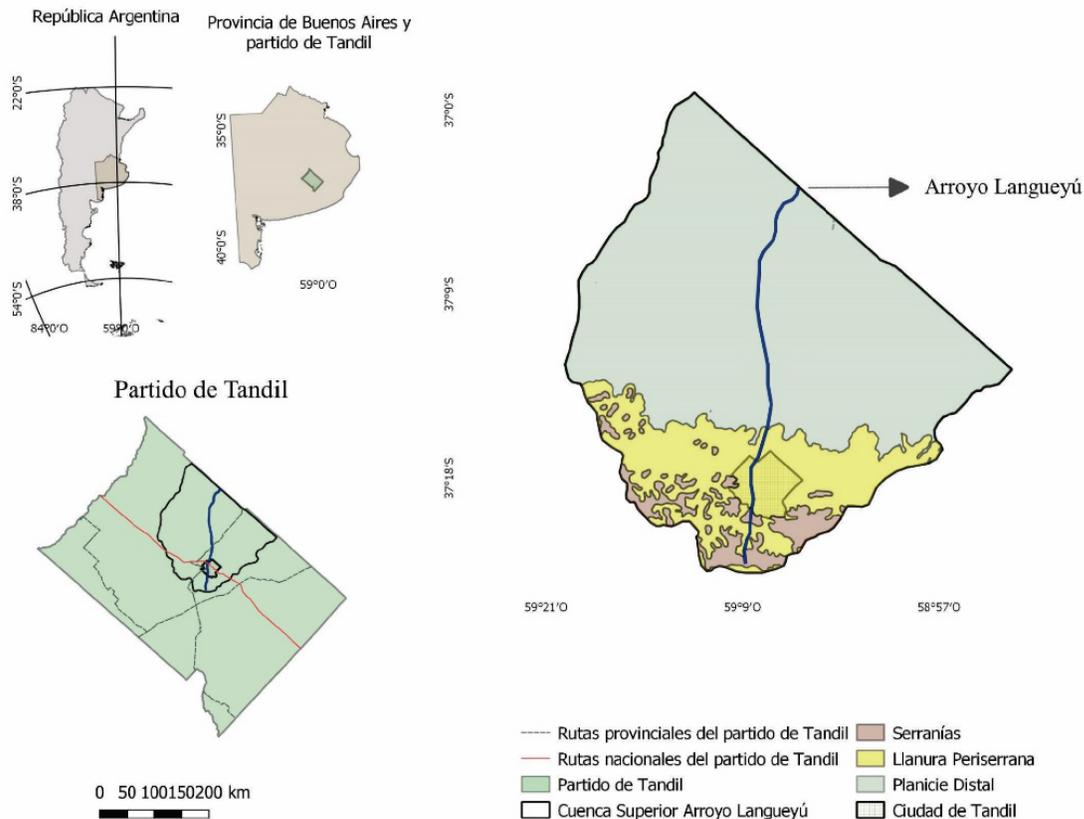


Figura 1. Localización del área de estudio. Cuenca Superior del Arroyo Languayú. Fuente: elaboración propia.

Según lo expresado por Picone & Campo (2014), en el área de estudio predomina el clima templado continental debido al emplazamiento del partido en el centro-sudeste de la República Argentina, recibiendo la influencia del anticiclón del Atlántico Sur que aporta las masas de aire cálidas y húmedas y del anticiclón del Pacífico Sur que transporta aire frío y seco. La región se encuentra surcada por las sierras de Tandilia, que conforman un sistema serrano que se presenta en forma de arco, en sentido noroeste-sudeste, extendiéndose desde la ciudad de Olavarría hasta Mar del Plata (Ruiz de Galarreta et al., 2011). En la zona de estudio, el sector de cabeceras, se ubican las sierras septentrionales de la provincia de Buenos Aires, Argentina, que ocupan la región centro-sudeste de la provincia de Buenos Aires.

Por su parte, el arroyo Languayú posee sus nacientes en las sierras de Tandil producto del aporte de pequeñas cuencas intraserranas de arroyos de régimen torrencial, ubicadas inmediatamente al sur de la ciudad (Ruiz de Galarreta et

al., 2010, 2007). La CuSAL se desarrolla sobre el faldeo norte de dichas sierras, drenando sus aguas hacia el noreste en concordancia con la pendiente regional. Las principales nacientes del arroyo Languayú (subcuencas de los arroyos Blanco y Del Fuerte) se encuentran entre los 300 y 400 m de altitud en el sistema de Serranías. Vazquez & Zulaica (2013) observaron las transformaciones en las prácticas agrícolas ganaderas en la CuSAL y analizaron impactos ambientales generados sobre el medio natural, medidos a partir de indicadores de sustentabilidad, los cuales mostraron tendencias negativas en el tiempo, incrementándose los riesgos de intervención del hábitat, la contaminación por plaguicidas y los impactos sobre el ecosistema en el medio natural. Además, demostraron que los indicadores de sustentabilidad fueron más intensos en la cuenca que en el partido en su conjunto (Vazquez & Zulaica, 2013).

Selección y procesamiento digital de imágenes satelitales

Las imágenes (con Path/Row 225-86) del 17 de marzo de 1989 y del 7 de febrero de 2004 fueron captadas por el sensor TM del satélite Landsat 5 y la imagen del 16 de febrero de 2019 fue obtenida por el sensor OLI del satélite Landsat 8. Cabe destacar que ambas poseen una resolución espacial de 30x30 m. La selección de las fechas se fundamentó en los siguientes supuestos: a) a fines de los 80 y principios de los 90 comenzó a evidenciarse un notable avance de la agricultura dentro de la Región Pampeana Argentina; b) a mediados del 2000, se observó una intensificación de la agriculturización, impulsada por el incremento en la adopción de la siembra directa como principal método de labranza; c) por último, 2019 se estableció como el corte temporal más actual a analizar.

Para el procesamiento de las imágenes se empleó el *software* ENVI Classic 5.3 (Research System Inc., Boulder, CO, USA). En primera instancia, fue necesario llevar a cabo un pre-procesamiento para la clasificación. La señal recibida por los sensores se codifica en diferentes valores de Niveles Digitales ($ND\lambda$) (U.S. Geological Survey, 2020). Sin embargo, esos valores no son comparables entre distintas bandas o en el tiempo. Es necesario considerar los efectos de la interacción de la radiación electromagnética con los objetos y la atmósfera (Chen et al., 2005; Pons et al., 2014; Vicente-Serrano et al., 2008). Por este motivo, a partir de los valores de $ND\lambda$, se obtuvieron como primera medida los valores de radiancia espectral ($L_{\lambda sat}$) (Chander & Markham, 2003; Chander et al., 2007, 2009).

$$L_{\lambda sat} = G_{\lambda} ND_{\lambda} + B_{\lambda}$$

Donde: $L_{\lambda sat}$: radiancia espectral; G_{λ} : gain;
 ND_{λ} : niveles digitales; B_{λ} : bias.

Dichos valores de radiancia, posteriormente, permitieron obtener los valores de reflectividad a tope de la atmósfera ($\rho_{\lambda TOA}$), considerando los efectos de iluminación derivados de la posición solar (ángulo de iluminación solar y distancia Tierra-Sol) y de la posición del sensor.

$$\rho_{\lambda toa} = \frac{\pi L_{\lambda sat}}{E_{\lambda 0} d^{-2} \cos \theta z}$$

Donde: $\rho_{\lambda toa}$: reflectividad a tope de la atmósfera;
 $L_{\lambda sat}$: radiancia; $E_{\lambda 0}$: irradiancia solar exoatmosférica espectral; d: distancia Tierra-Sol; θz : ángulo cenital solar (z).

La $\rho_{\lambda toa}$, no obstante, no representa correctamente las características de la superficie, pues no considera el efecto atmosférico. Es necesario introducir un modelo de corrección atmosférica para calcular la reflectividad de superficie ($\rho_{\lambda sup}$) (Modelo Simple de Transferencia Radiativa) (Kaufman, 1989):

$$\rho_{\lambda sup} = \frac{\rho_{\lambda toa} - \rho_{\lambda toamin}}{T_{\lambda v} T_{\lambda z}}$$

Donde: $\rho_{\lambda toa}$: reflectividad a tope de la atmósfera;
 $\rho_{\lambda toamin}$: reflectividad mínima a tope de la atmósfera;
 $T_{\lambda v}$ y $T_{\lambda z}$: transmisividades atmosféricas.

Luego, se procedió a recortar las imágenes resultantes por medio de un vector del área de estudio (CuSAL) (Vazquez et al., 2014a). Posteriormente, se prosiguió a realizar clasificaciones supervisadas empleando el algoritmo Clasificador de Máxima Verosimilitud (*Maximum Likelihood Classifier*) para identificar los distintos usos y coberturas de interés (Argañaraz & Entraigas, 2011; Chuvieco, 2007; Richards & Jia, 2006). Para ello se consideraron datos del área de estudio a través de puntos de GPS (*Global Position System*) obtenidos mediante trabajo de campo, mapas e informes técnicos, el visor de imágenes del *software* Google Earth Pro y referencias profesionales correspondientes a las clases a diferenciar. Los usos y coberturas de suelo predominantes derivados de las clasificaciones supervisadas han devenido en las siguientes clases: agrícola, pastizales y pasturas, cuerpos de agua y urbana (Tabla 2).

A continuación, se proyectaron Regiones de Interés (ROIs) que definen las clases de uso de suelo distinguibles en el área de estudio. Las ROIs fueron separadas en dos grupos: aquellas empleadas por el clasificador elegido y aquellas utilizadas como datos de referencia para la evaluación de la precisión determinada a través de medidas de confiabilidad como la Precisión Global y el coeficiente Kappa (Congalton, 2007; Foody, 2002).

Finalmente, se aplicaron vectores de los distintos sistemas ecológicos que componen la cuenca (Serranías, Llanura Periserrana y Planicie Distal) para obtener los resultados a ese nivel de análisis. Consecutivamente, se averiguaron los estadísticos de cada clase para conocer la superficie ocupada por cada uso y cobertura del suelo por cada sistema ecológico, y luego se cuantificaron y compararon las modificaciones de superficie de cada clase ocurridas en los períodos 1989-2004 y 2004-2019.

Tabla 2
Descripción de las categorías utilizadas en la clasificación de las imágenes satelitales

Clases de uso	Agrícola		
Descripción	Superficies cultivadas, lotes en producción o con cultivos implantados en desarrollo; y a cultivar, lotes que se encuentran en el momento de la captura de la imagen sin cultivos pero que se corresponden con áreas donde normalmente se hace agricultura.		
			
Puntos de control.	30 puntos para entrenamiento y 30 para validación.		
Clases de uso	Pastizales y pasturas		
Descripción	Constituidos por pastizales naturales y pasturas artificiales obtenidos de manera conjunta, ya que contribuyen a una mayor diversidad específica y se encuentran destinados a una misma actividad (pastoreo); y por roquedales y suelos desnudos en zonas serranas. Dichas áreas funcionan como refugio de biodiversidad y cumplen importantes funciones dentro del paisaje rural ya que proveen forraje para el ganado doméstico y hábitat para diversas especies de insectos que actúan como controladores biológicos o polinizadores de cultivos agrícolas.		
			
Puntos de control.	30 puntos para entrenamiento y 30 para validación.		
Clases de uso	Cuerpos de agua		
Descripción	Se tomaron como referencia sitios que atraviesan el área de estudio a lo largo del arroyo Langueyú, cuyas nacientes drenan en dirección noreste; luego de atravesar tierras periserranas. Las condiciones restringidas del drenaje en la Planicie Distal contrastan con las mejores condiciones de drenaje de las Serranías y la Llanura Periserrana.		
			
Puntos de control.	15 puntos para entrenamiento y 15 para validación.		
Clases de uso	Urbana		
Descripción	Para conocer la superficie real del uso del suelo urbano se construyeron en el <i>software</i> QGIS (3.8.1) vectores correspondientes al ejido urbano de la ciudad de Tandil, cabecera del Partido, para los años 1989, 2004 y 2019. Luego, estos fueron aplicados como máscaras a las imágenes clasificadas correspondientes a cada año.		
			

Fuente: elaboración propia.

Detección de cambios

Con la finalidad de profundizar en el análisis de los cambios de clase de los usos pastizales y pasturas y agrícolas, se empleó la herramienta “estadísticas de detección de cambios” del *software* ENVI Classic 5.3. Este procedimiento difiere de una simple diferenciación entre imágenes, permitiendo identificar qué proporción de píxeles de una imagen de estado inicial permanecieron o modificaron su clase en una imagen de estado final. Así, en este caso, el análisis se centra en los periodos 1989-2004 y 2004-2019. En el primero, la imagen clasificada de 1989 conforma el estado inicial y la de 2004 el estado final, y en el segundo, las imágenes de 2004 y 2019 representan el estado inicial y final, respectivamente.

De esta forma, como resultado final se obtuvo una matriz de detección de cambios y un mapa de cambios. Particularmente, la matriz conforma una tabla de estadísticas que contrasta las clases de la imagen de estado inicial (columnas) con las de la imagen de estado final (filas), exhibiendo la proporción de píxeles que mantuvo su clase (por ejemplo: pastizales y pasturas-pastizales y pasturas) y la de aquellos que cambiaron a determinada clase (por ejemplo: pastizales y pasturas-agrícolas). Además, muestra la proporción total de píxeles que cambiaron de clase (fila denominada cambios de clase) y la diferencia en el número total de píxeles clasificados de forma equivalente en las dos imágenes (fila denominada diferencia de imagen). Esta última es calculada restando los totales de clase de estado inicial de los totales de clase de estado final, y puede indicar que el tamaño de la clase disminuyó (diferencia de imagen negativa) o creció (diferencia de imagen positiva).

En cuanto al mapa, este se efectuó para cada periodo, exhibiendo la distribución espacial de las permanencias o cambios detectados en la imagen clasificada de estado final. Es de destacar que, para obtener este mapa final, primero se realizaron mapas parciales considerando los cambios y permanencias ocurridos para las dos clases de uso de manera independiente (ENVI Classic 5.3), y luego estos se superpusieron en el marco de un sistema de información geográfica (QGIS 3.8.1.).

Resultados

Inicialmente, a partir de la evaluación de las imágenes satelitales clasificadas (Figuras 2, 5 y 8), fue posible determinar la superficie destinada a cada clase de uso en los diversos sistemas ecológicos, para cada uno de los años evaluados (Tabla 3).

Posteriormente, tomando como base la información anterior, se procedió a efectuar un análisis de las transformaciones en los usos del suelo y a profundizar en la evaluación de los cambios de clase ocurridas respecto al uso de pastizales y pasturas y al uso agrícola, observados en cada uno de los distintos sistemas ecológicos para los periodos 1989-2004 y 2004-2019.

Sistema ecológico Serranías

En el periodo 1989-2004, el sistema ecológico Serranías (Figura 2) exhibió incrementos de la superficie agrícola, el área urbana y los cuerpos de agua, mientras que la extensión destinada a pastizales y pasturas disminuyó. En 2004-2019, la superficie agrícola volvió a incrementarse, y lo mismo ocurrió con el uso urbano. Por su parte, el área ocupada por pastizales y pasturas decreció, a lo que se sumó un descenso de los cuerpos de agua (Figura 3).

Tabla 3

Extensión de las clases de usos del suelo por sistemas ecológicos en 1989, 2004 y 2019

Clases	Sistema ecológico								
	Serranías			Llanura Periserrana			Planicie Distal		
	1989	2004	2019	1989	2004	2019	1989	2004	2019
Agrícola	14,36	18,82	19,79	91,99	106,71	108,90	368,91	384,25	483,92
Pastizales y pasturas	43,45	37,94	30,95	102,57	81,47	56,04	364,72	348,38	249,71
Urbana	2,09	3,11	9,18	18,74	25,01	48,35	0,00	0,00	0,00
Cuerpos de agua	0,08	0,11	0,06	0,09	0,20	0,10	0,01	1,01	0,01
Total			59,98			213,39			733,64

Referencias: superficies expresadas en km². Fuente: elaboración propia.

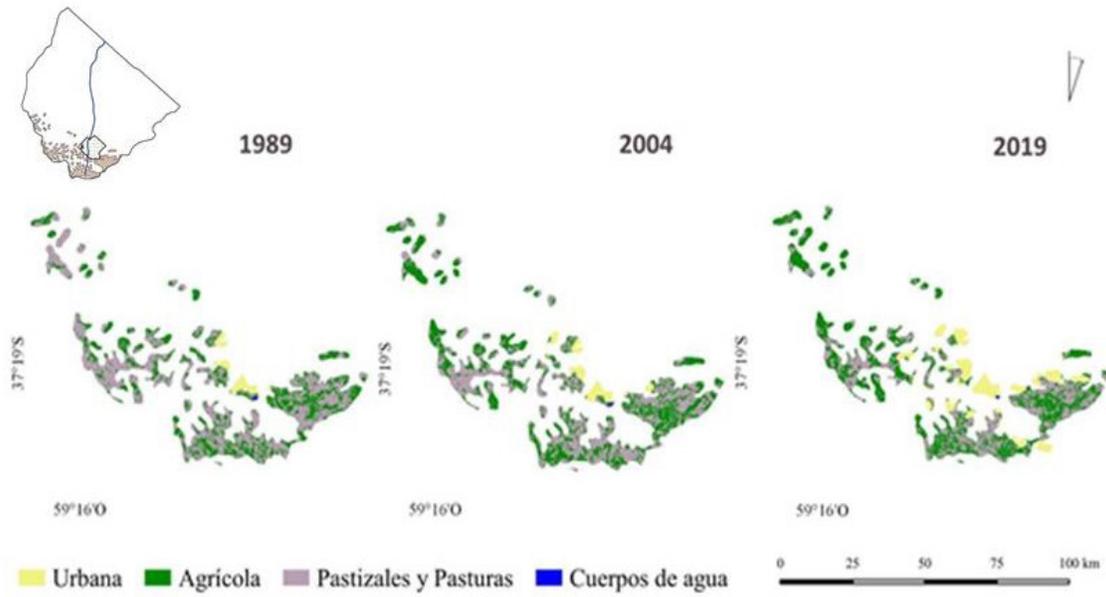


Figura 2. Clasificación supervisada de las Serranías en 1989, 2004 y 2019. Fuente: elaboración propia.

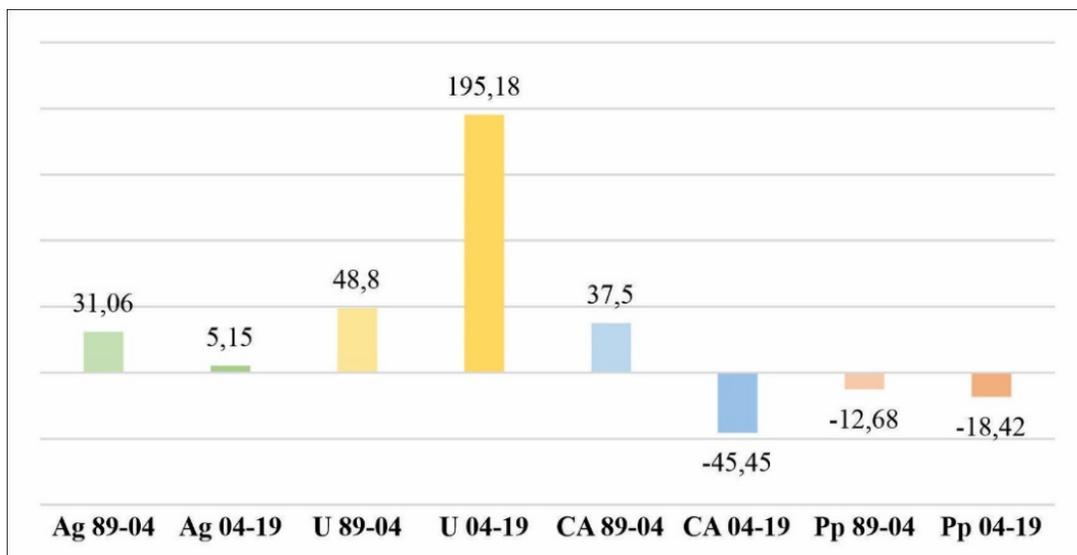


Figura 3. Variación de las clases presentes en Serranías durante los períodos analizados. Referencias: valores expresados en %. Ag, agrícola; U, urbana; CA, cuerpos de agua; Pp, pastizales y pasturas. Fuente: elaboración propia.

Puntualizando en la detección de cambios de clase referidos a los usos pastizales y pasturas y agrícola, la Tabla 4 exhibe el porcentaje de píxeles de cada clase que se mantuvieron o se vieron modificados respecto de la situación inicial de cada período analizado, y la Figura 4 demuestra la traducción territorial de estas transformaciones.

Una vez analizados lo sucedido en el primer período, pudo observarse que del total de píxeles que pasaron de

pastizales y pasturas a otro uso, un 95,48 % lo hizo a uso agrícola; mientras que, de la totalidad que dejó de ser agrícola, un 96,28 % pasó a pastizales y pasturas. En el segundo período, un 75,13 % de los píxeles que dejaron de representar pastizales y pasturas pasaron a ser agrícolas, y un 79,34 % de los que en 2004 se destinaban a este uso comenzaron a formar parte de los pastizales y pasturas.

Tabla 4

Matriz de detección de cambios del sistema ecológico Serranías para cada período determinado

		Sistema inicial			
		Pastizales y pasturas		Agrícolas	
		89 VS 04	04 VS 19	89 VS 04	04 VS 19
Situación inicial	Pastizales y pasturas	59,93	54,64	42,67	29,76
	Agrícolas	38,26	34,07	55,68	62,49
Cambios de clase		40,07	45,35	44,32	37,51
Diferencia de imagen		-14,77	-22,14	114,71	19,27

Referencias: valores expresados en %. Fuente: elaboración propia.

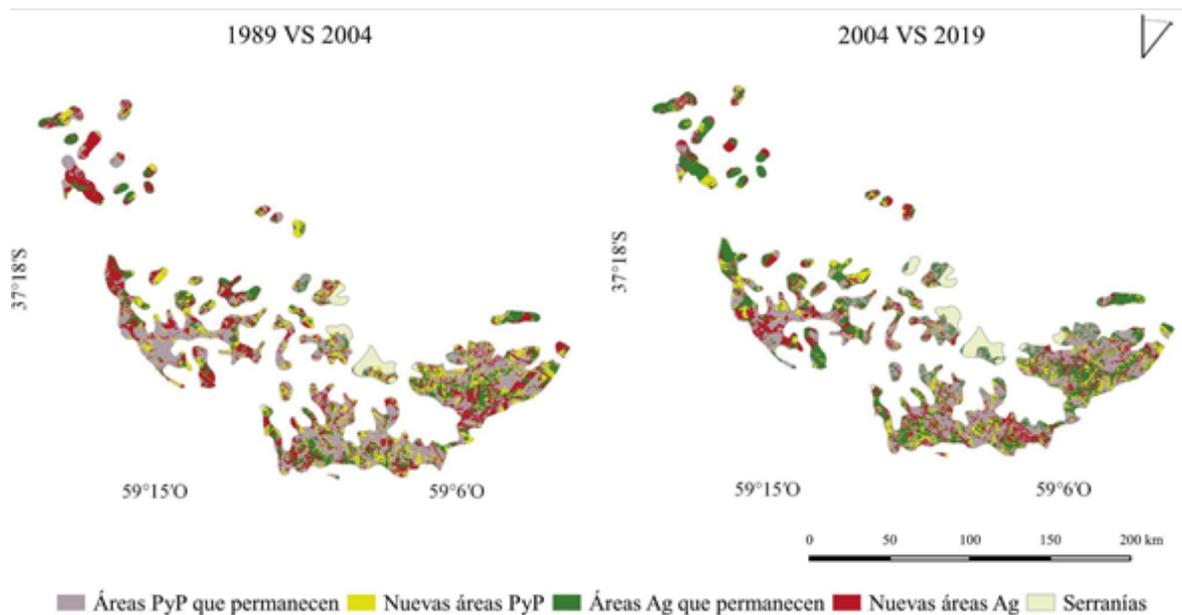


Figura 4. Mapa de cambios del sistema ecológico Serranías para cada período determinado. Fuente: elaboración propia.

Sistema ecológico Llanura Periserrana

En el período 1989-2004, el sistema ecológico Llanura Periserrana (Figura 5) demostró aumentos en la superficie agrícola y el área urbana, además de un importante crecimiento de los cuerpos de agua; al mismo tiempo que

las áreas consignadas a pastizales y pasturas decrecieron. Para 2004-2019 se presentó un nuevo acrecentamiento de la superficie agrícola y un crecimiento del área urbana. Contrariamente, las superficies ocupadas por cuerpos de agua y pastizales y pasturas disminuyeron (Figura 6).

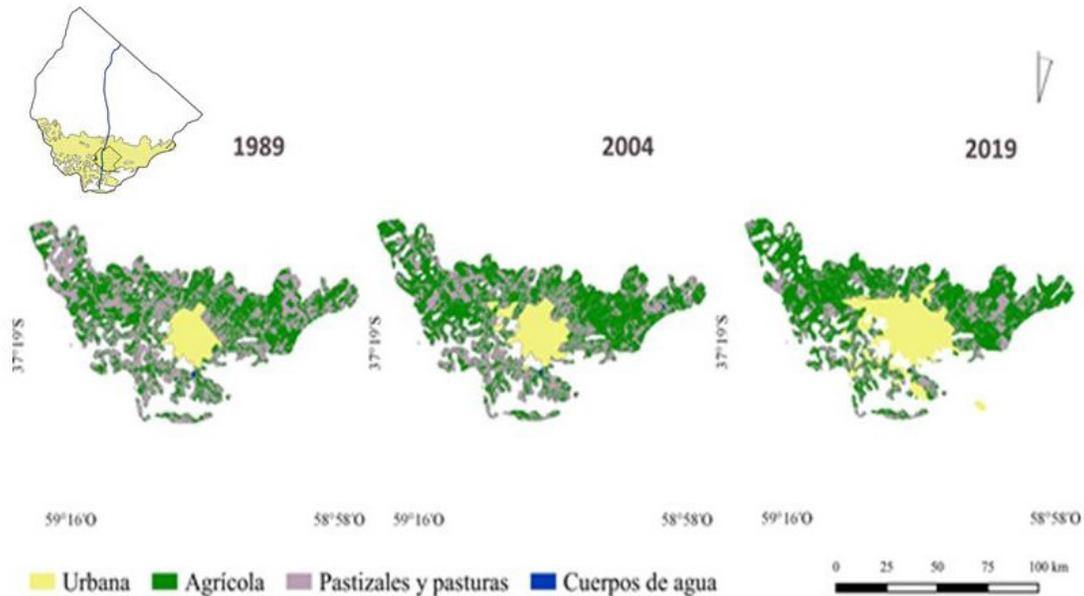


Figura 5. Clasificación supervisada de la Llanura Periserrana en 1989, 2004 y 2019. Fuente: elaboración propia.

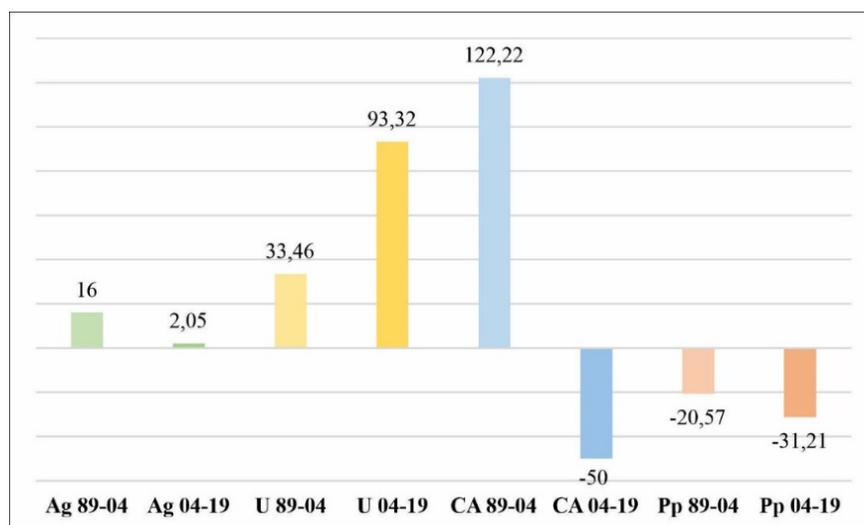


Figura 6. Variación de las clases presentes en Llanura Periserrana durante los periodos analizados. Referencias: valores expresados en %. Ag, agrícola; U, urbana; CA, cuerpos de agua; Pp, pastizales y pasturas. Fuente: elaboración propia.

A continuación, la Tabla 6 y la Figura 7 presentan la información acerca de la conservación o cambio de clases y su representación territorial, respectivamente.

Luego de examinado el primer período, se evidenció que el 92,10 % de los píxeles que dejaron de componer el uso pastizales y pasturas pasó a uso agrícola, y el 94,35

% de los que inicialmente constituían este uso pasaron a conformar pastizales y pasturas. En el segundo, del total de píxeles que correspondían a pastizales y pasturas y se vieron modificados, un 75,53 % pasó a uso agrícola; al mismo tiempo que un 70,98 % de los consignados a agricultura pasaron a ser parte de los pastizales y pasturas.

Tabla 6

Matriz de detección de cambios del sistema ecológico Llanura Periserrana para cada período determinado

		Sistema inicial			
		Pastizales y pasturas		Agrícolas	
		89 VS 04	04 VS 19	89 VS 04	04 VS 19
Situación inicial	Pastizales y pasturas	44,05	33,83	34,04	28,89
	Agrícolas	51,53	49,98	63,92	59,30
Cambio de clase		55,95	66,17	36,08	40,70
Diferencia de imagen		-20,69	-31,03	174,48	73,93

Referencias: valores expresados en %. Fuente: elaboración propia.

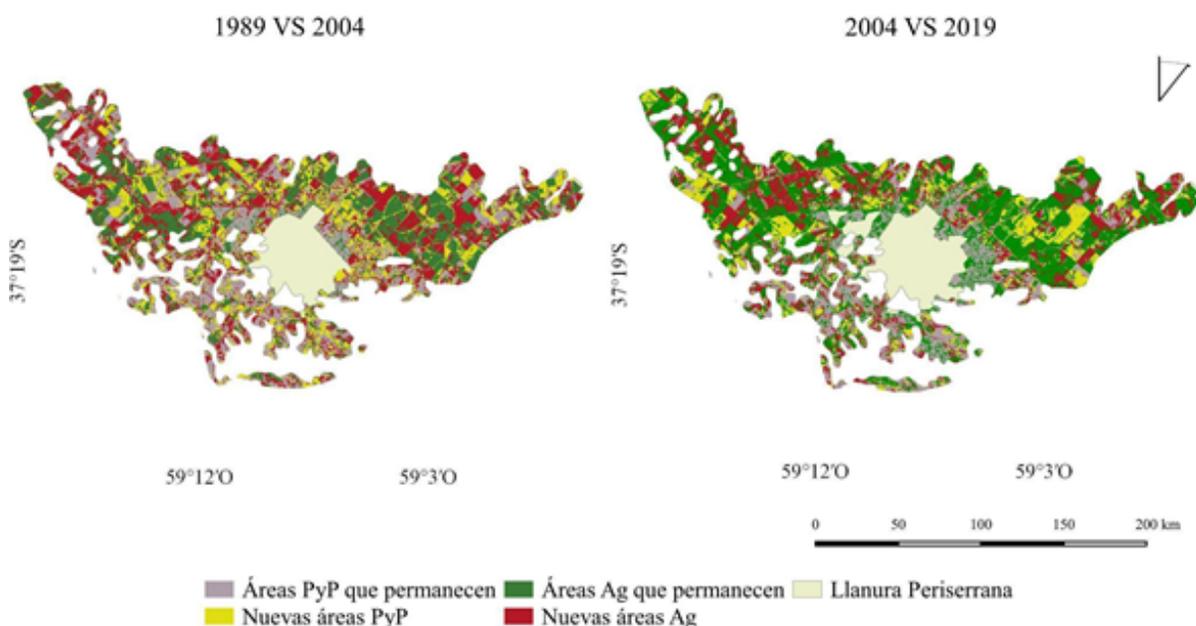


Figura 7. Mapa de cambios del sistema ecológico Llanura Periserrana para cada período determinado. Fuente: elaboración propia.

Sistema ecológico Planicie Distal

En el período 1989-2004, el sistema ecológico Planicie Distal (Figura 8) manifestó incrementos de la superficie agrícola y el área con cuerpos de agua, mientras que la extensión dedicada a pastizales y pasturas disminuyó. En 2004-2019, la superficie agrícola volvió a verse aumentada,

contraponiéndose a disminuciones del área con pastizales y pasturas y de aquellas con cuerpos de agua (Figura 9).

Seguidamente, se muestran los datos referidos a la conservación o cambio de clases (Tabla 6) y su expresión sobre el territorio (Figura 10).

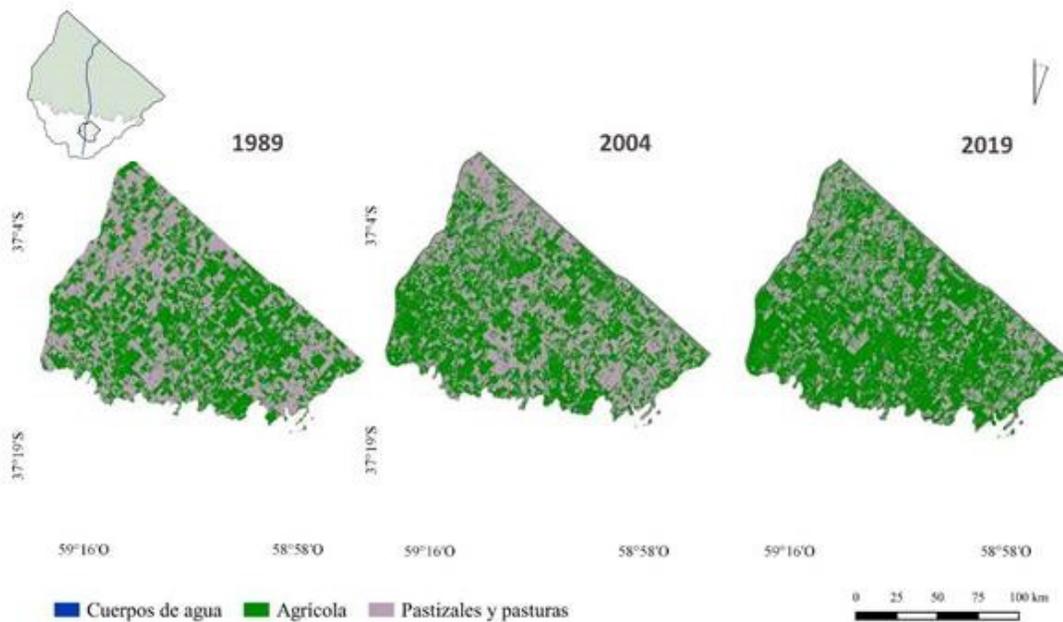


Figura 8. Clasificación supervisada de la Planicie Distal en 1989, 2004 y 2019. Fuente: elaboración propia.

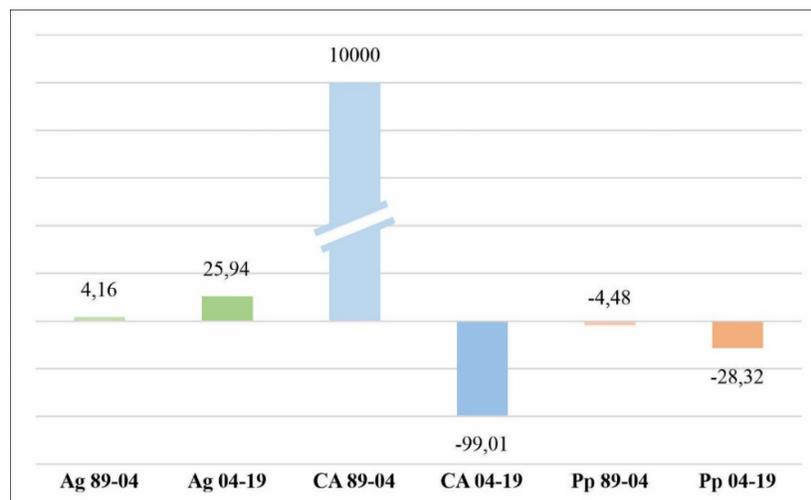


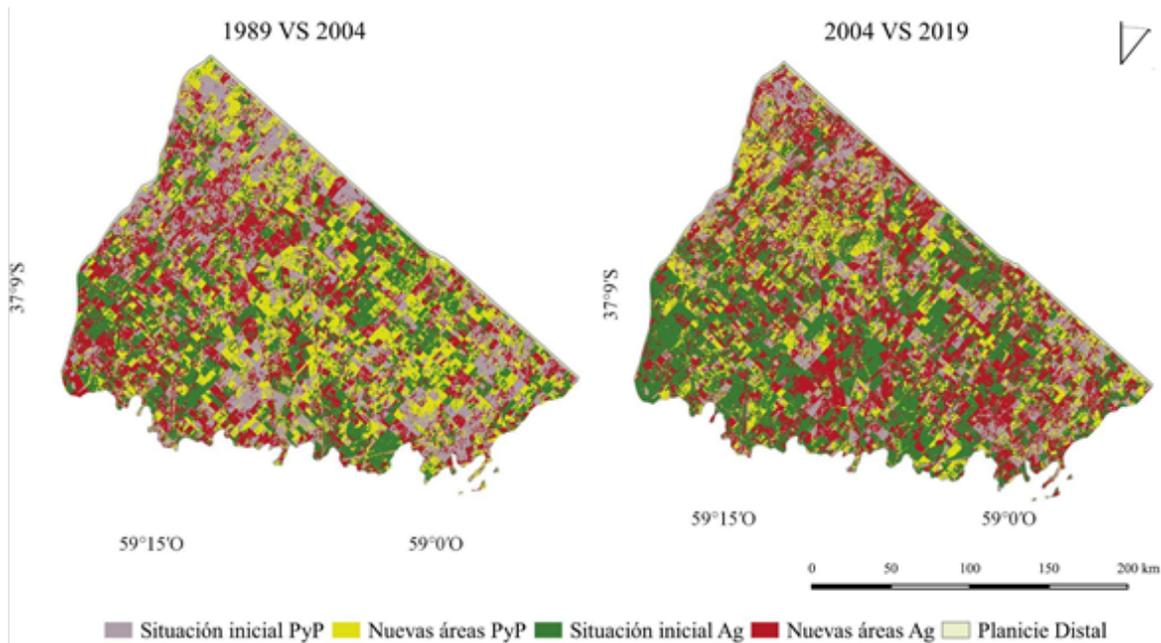
Figura 9. Variación de las clases presentes en Planicie Distal durante los períodos analizados. Referencias: valores expresados en %. Ag, agrícola; CA, cuerpos de agua; Pp, pastizales y pasturas. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6

Matriz de detección de cambios del sistema ecológico Planicie Distal para cada período determinado

		Sistema inicial			
		Pastizales y pasturas		Agrícolas	
		89 VS 04	04 VS 19	89 VS 04	04 VS 19
Situación inicial	Pastizales y pasturas	48,81	37,90	43,37	30,33
	Agrícolas	50,04	61,54	56,47	69,65
Cambios de clase		50,19	62,09	43,53	30,35
Diferencia de imagen		-4,48	-28,32	163,64	492,69

Referencias: valores expresados en %. Fuente: elaboración propia.

**Figura 10.** Mapa de cambios del sistema ecológico Planicie Distal para cada período determinado. Fuente: elaboración propia.

La evaluación de lo sucedido en el primer período, estableció que de la totalidad de píxeles que pasaron de pastizales y pasturas a un uso distinto, el 99,70 % lo hizo a uso agrícola; mientras que, del total que dejó de ser agrícola, un 99,63 % pasó a pastizales y pasturas. En el segundo, un 99,11 % de los píxeles que dejaron de representar pastizales y pasturas pasaron a ser agrícolas, y un 99,93 % de los que en 2004 se destinaban a este uso comenzaron a conformar pastizales y pasturas.

Discusión

A través de los datos obtenidos con las imágenes satelitales clasificadas, fue posible determinar la superficie ocupada por las distintas clases de uso en los diversos sistemas ecológicos y, a partir de ello, efectuar un análisis acerca de su transformación temporal para cada uno de los períodos evaluados. Inicialmente, cabe mencionar que el uso urbano solo se encuentra en los sistemas Serranías y

Llanura Periserrana, siendo esta última la que concentra la mayor extensión, debido principalmente a que allí se localiza la ciudad de Tandil. Respecto de su variación, en ambos períodos se observa un continuo crecimiento de su superficie, resultando mayor el ocurrido en 2004-2019. Asimismo, se destaca que, a pesar de poseer una menor área urbana, el sistema Serranías demuestra una mayor variación porcentual de crecimiento entre 1989-2019 (339,23 %) en comparación a Llanura Periserrana (158 %); coincidiendo con lo planteado por Fernández & Ramos (2017), quienes observaron un modelo de crecimiento urbano disperso, cercano al área central, pero que no encuentra ningún tipo de barreras en los faldeos serranos. Por otra parte, considerando la relación entre aumento demográfico y expansión urbana, los resultados adquiridos se condicen con un incremento del 36,25 % de la población del partido de Tandil entre 1991 y 2019, pasando de 101.228 a 137.922 habitantes, respectivamente (INDEC, 1991, 2015).

Con relación a los cambios exhibidos por los cuerpos de agua, pueden diferenciarse dos tendencias compartidas por los tres sistemas. El período 1989-2004 demuestra un crecimiento de la superficie ocupada, siendo mayor el ocurrido en el sistema Planicie Distal, seguido por Llanura Periserrana y Serranías. No obstante, el período 2004-2019 exhibe un escenario opuesto, en el que los cuerpos de agua decrecieron en la totalidad del área, resultando los sistemas Planicie Distal y Serranías los más y menos afectados, respectivamente. Como posible respuesta a lo ocurrido durante el primer período, nos encontramos ante un aumento de las precipitaciones anuales del partido, pasando de 739,90 a 752,80 mm. Si bien 2004 no presenta notables variaciones respecto de los valores anuales promedio de la zona, se evidencia un período antecedente con lluvias más elevadas, alcanzando los 1352,80 mm en 2001, 1309,60 mm en 2002 y 941 mm en 2003 (EEA INTA Balcarce, 2018); lo que podría explicar un incremento en los cuerpos de agua superficiales.

Por su parte, las precipitaciones del segundo período presentan un decrecimiento (EEA INTA Balcarce, 2018), justificando el descenso de las áreas ocupadas por este uso. Al mismo tiempo, según un informe del Servicio Meteorológico Nacional, entre diciembre de 2017 y los primeros meses de 2018, la Región Pampeana Argentina registró una significativa disminución de las reservas hídricas del suelo, destacándose Tandil como uno de los partidos que presentó sequía severa (SMN, 2018).

Respecto de lo acontecido con la superficie destinada a pastizales y pasturas, los resultados muestran un continuo

decrecimiento para los tres sistemas, siendo el ocurrido en el segundo período mayor al del primero en todos los casos. Puede observarse que la pérdida más relevante de 1989-2004 se halló en el sistema Llanura Periserrana, seguido por Serranías y Planicie Distal. Asimismo, la disminución más importante del segundo período volvió a presentarse sobre el sistema Llanura Periserrana, aunque en este caso seguido por Planicie Distal y Serranías.

La superficie agrícola exhibe un crecimiento persistente en los tres sistemas analizados, ocurriendo los mayores avances sobre Serranías, Llanura Periserrana y Planicie Distal en 1989-2004, y Planicie Distal, Serranías y Llanura Periserrana en 2004-2019. Asimismo, es posible remarcar que los sistemas Serranías y Llanura Periserrana alcanzaron su mayor incremento en el primer período, mientras que Planicie Distal hizo lo propio en el segundo.

Luego de observar lo acontecido tanto para áreas de pastizales y pasturas como para las agrícolas es posible analizar ciertas interacciones entre los distintos sistemas ecológicos. Las Llanuras Periserranas, áreas productivas por excelencia, han funcionado en el período de estudio como propulsoras de la agricultura influenciando la dispersión de la actividad productiva hacia los paisajes circundantes como las Serranías y las Planicies Distales. En el diseño de una planificación ambiental, dicha unidad debería diagramarse como un corredor entre sectores del paisaje con relictos de pastizales naturales (Serranías), donde urge impedir el avance del proceso de agriculturización, y sectores de pasturas implantadas y/o pastizales mejorados con importantes limitaciones para el cultivo (Planicies Distales), que permiten aún el desarrollo de la ganadería extensiva y por ende de pastizales y pasturas en las zonas bajas con drenaje imperfecto. Su ubicación como paisaje de transición y conexión entre los mencionados sistemas y su aptitud agrícola generan una oportunidad para fomentar sistemas de producción mixtos. En las Serranías, la presencia de suelos aptos para la agricultura en las zonas lindantes a las Llanuras Periserranas genera que, a pesar de la abundancia de afloramientos rocosos, se produzca la expansión de la actividad agrícola a costas de un alto riesgo de erosión hídrica.

Profundizando en el análisis de las transformaciones observadas en estos dos últimos usos del suelo, que simbolizan la matriz productiva del área de estudio, se entiende que la construcción de mapas de cambio resulta una valiosa herramienta para identificar, focalizar y resaltar los determinantes de la variación en el uso del suelo. Dichos datos son de importancia crítica para comprender las posibles modificaciones en la provisión

de SE intrínsecos en distintos paisajes, en el tiempo, ya que ilustran los resultados de la gestión e implementación de políticas y ordenamiento territorial (o ausencia de las mismas) (Jacobs et al., 2017).

En los tres sistemas ecológicos y para ambos períodos, el aumento superficial del uso agrícola (diferencia de imagen positiva) está figurado esencialmente por el avance sobre tierras que anteriormente eran pastizales y pasturas. A su vez, el retroceso de esta última clase (diferencia de imagen negativa), se caracteriza por una disminución en la cantidad de píxeles que la representaban y por una redistribución sobre áreas que previamente eran agrícolas. Como consecuencia, si bien en el corto plazo se estarían potenciando SE de abastecimiento, al mismo tiempo se observa la existencia de un proceso de degradación, derivado de la disminución de pastizales y pasturas, que reduciría la capacidad de los suelos para proporcionar numerosos SE que actúan tanto a escala local, regional y global (polinización, regulación del agua, regulación climática, recreación); lo que impactará a largo plazo sobre el suministro de alimentos y fibra para lograr la seguridad alimentaria (Bengtsson et al., 2019; Kopittke et al., 2019; Steffen et al., 2015).

Puntualizando en la conservación de pastizales y pasturas, el sistema de Serranías exhibe una mejor situación, ya que en ambos períodos demuestra que una proporción de píxeles mayor al 50 % permanecieron en dicha categoría. Además, el porcentaje de píxeles que evidencian nuevas áreas agrícolas también es menor, en comparación a los otros sistemas. Esto reviste gran importancia ya que estas sierras albergan numerosas especies vegetales, que constituyen el hábitat y el alimento para una fauna única; representando áreas clave para la conservación de la biodiversidad pampeana (de Rito et al., 2020).

Asimismo, la vegetación de estos ambientes ofrece otros múltiples SE, constituyéndose en hábitat para diversos insectos que actúan como controladores biológicos de plagas y polinizadores de pasturas y cultivos agrícolas (Gilarranz et al., 2015), lo que provee forraje para el ganado y hierbas de valor medicinal, controlando la erosión y reteniendo sustancias contaminantes en sus raíces (Herrera et al., 2019), entre otros.

Si bien las transformaciones de este sistema no poseen la misma magnitud que en los restantes, debería efectuarse un monitoreo de las áreas con pastizales y pasturas, promoviendo aún más su conservación. Esto se sustenta en la baja conectividad que actualmente exhiben los ambientes serranos (Herrera et al., 2017), sumado a la

dominancia de parches (ambientes no transformados) de tamaño pequeño (menor a 10 ha), lo que podría afectar el funcionamiento del paisaje en general y de los ecosistemas naturales en particular (Jaimes et al., 2019). A su vez, en el área se realiza un pastoreo invernal de tipo continuo y no controlado, y se siembran especies forrajeras con aplicación previa de herbicidas para eliminar arbustos y pastizales (de Rito et al., 2020).

En síntesis, los resultados alcanzados en esta investigación permiten afirmar que la región en estudio se caracteriza por un reemplazo de áreas de pastizales y pasturas, que debieran presentar un mayor grado de conservación en virtud de los SE que brindan, por áreas de cultivos agrícolas. Esta situación se encuentra justificada, esencialmente, por el aumento en la demanda mundial de alimentos (Bengtsson et al., 2019) y por la aparente mayor rentabilidad en el corto plazo que posee la actividad agrícola (Tamagno et al., 2018), sin considerar los costos de la pérdida de SE.

Este escenario, donde la agriculturización de los sistemas productivos ha sustituido la superficie con ganadería extensiva tradicional por cultivos anuales (Behrends Kraemer et al., 2013; Paruelo & Oesterheld, 2004), concuerda con las tendencias observadas por Volante et al. (2015) para el sur de Latinoamérica, donde las áreas cultivadas se incrementaron un 43 % entre 2000-2001 y 2010-2011. Asimismo, regiones cercanas al área de estudio manifiestan realidades similares, tal es el caso del partido Azul, donde entre 1995 y 2011 la agricultura avanzó un 173 % y generó una disminución del 41 % de la ganadería (Vazquez et al., 2016); y el partido de Benito Juárez que, si bien es una zona históricamente ganadera, demostró un incremento del 111,24 % de la superficie agrícola entre 1989-1990/2002-2003 y del 124,78 % en 2002-2003/2014-2015 (Sequeira et al., 2021).

Conclusiones

Los resultados dan cuenta de modificaciones sustanciales en los usos del suelo y en el destino productivo de las áreas agropecuarias, lo que evidencia la ausencia de una planificación territorial ambiental en el ámbito rural con respecto al uso del suelo. Se verifica la hipótesis planteada puesto que la expansión agropecuaria ocurre de manera diferencial al interior de la cuenca dependiendo su intensidad de las características ecológicas presentes.

Si dejamos de lado la intensificación productiva, la expansión es el factor común a todos los paisajes del área de estudio, observándose que los ecosistemas estarían adaptados en su mayor parte a la provisión de servicios de abastecimiento

de importancia comercial en detrimento de pastizales y pasturas proveedores además de SE de regulación, como por ejemplo aquellos asociados a la regulación climática local, al control de la erosión, a la regulación hídrica, amortiguación de perturbaciones, polinización, purificación del agua, regulación de nutrientes, biodiversidad, control biológico y provisión de hábitat a flora y fauna silvestre.

Las aptitudes ecológicas y agrarias no exhiben impedimentos para el avance de la actividad agrícola puesto que los insumos tecnológicos intensivamente empleados son capaces de transformar la identidad ecosistémica en pos de objetivos económicos. Así, pese a que Serranías conforma el sistema con menores condiciones agroecológicas para el desarrollo agrícola (esencialmente, suelos poco profundos y pendientes pronunciadas), este uso registró el mayor porcentaje de avance de superficie en el primer período; y ocupó el segundo lugar en 2004-2019.

Ante lo mencionado, es urgente el desarrollo e implementación de planes de gestión ambiental del territorio rural que consideren la heterogeneidad paisajística, que permitan la adopción de acciones encaminadas a lograr la máxima racionalidad ambiental en agroecosistemas e involucren beneficios como el refuerzo de las funciones ecosistémicas, la optimización de la producción agrícola y la contribución a la resiliencia de los ecosistemas. Es pertinente, por ejemplo, la conservación y el monitoreo de pastizales y vegetación nativa en el sistema de Serranías, áreas de elevada vulnerabilidad que resultan claves para la provisión de SE como los de biodiversidad nativa, controles biológicos de plagas, polinización, forraje, regulación de la erosión hídrica, provisión de agua, entre otros.

Por otro lado, en los sistemas de Llanura Periserrana y Planicie Distal sería propicio fomentar acciones tendientes al mantenimiento de la productividad de los suelos, captura de carbono, a la regulación de nutrientes, amortiguación de perturbaciones y al mantenimiento de la biodiversidad relacionada a la provisión de hábitat tanto para la flora y fauna silvestre como para especies de explotación comercial. Finalmente, cabe destacar que, si bien el presente estudio permitió obtener un primer diagnóstico de las transformaciones en los usos y coberturas del suelo de la CuSAL, sería importante profundizar el análisis mediante la aplicación de indicadores de sustentabilidad, que permitan medir las incidencias ambientales de los procesos evaluados; como así también, monitorear la evolución de la situación del área de estudio a lo largo del tiempo. De esta forma, la presente investigación, en conjunto con estudios venideros, propone brindar información relevante a los tomadores de decisión al

momento de planificar acciones concretas en el territorio, focalizadas en el desarrollo ambientalmente sustentable de los agroecosistemas.

Referencias

- Alam, A., Bhat, M. S. & Maheen, M. (2020). Using Landsat satellite data for assessing the land use and land cover change in Kashmir valley. *GeoJournal*, 85, 1529-1543. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10037-x>
- Argañaraz, J. P. & Entraigas, I. (2011). Análisis comparativo entre las máquinas de vectores soporte y el clasificador de máxima probabilidad para la discriminación de cubiertas del suelo. *Revista de Teledetección*, 36, 26-39. http://www.aet.org.es/revistas/revista36/Numero36_03.pdf
- Baeza, S. & Paruelo, J. M. (2020). Land use/land cover change (2000–2014) in the Rio de la Plata grasslands: an analysis based on MODIS NDVI time series. *Remote Sensing*, 12(3), 381. <https://doi.org/10.3390/rs12030381>
- Baldi, G. & Paruelo, J. M. (2008). Land-Use and Land Cover Dynamics in South American Temperate Grasslands. *Ecology and Society*, 13(2), 6. <https://doi.org/10.5751/es-02481-130206>
- Behrends Kraemer, F., Chagas, C. I., Marre, G., Palacin, E. & Santanatoglia, O. (2013). Desplazamiento de la ganadería por la agricultura en una cuenca de la pampa ondulada: efectos sobre el escurrimiento superficial y erosión hídrica. *Ciencia del suelo*, 31(1), 83-92. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v31n1/v31n1a08.pdf>
- Bengtsson, J., Bullock, J. M., Egoh, B., Everson, C., Everson, T., O'Connor, T., ... & Lindborg, R. (2019). Grasslands-more important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere*, 10(2), e02582. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2582>
- Cabrera, A. L. (1976). *Regiones Fitogeográficas Argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. ACME.
- Chander, G. & Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 2674-2677. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.818464>

- Chander, G., Markham, B. & Barsi, J. (2007). Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(3), 490-494. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2007.898285>
- Chander, G., Markham, B. M. & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chen, X., Vierling, L. & Deering, D. (2005). A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sensing of Environment*, 98(1), 63-79. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.021>
- Chen, H., Chen, C., Zhang, Z., Lu, C., Wang, L., He, X., ... & Chen, J. (2021). Changes of the spatial and temporal characteristics of land-use landscape patterns using multi-temporal Landsat satellite data: a case study of Zhoushan Island, China. *Ocean & Coastal Management*, 213, 105842. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105842>
- Congalton, R. G. (2007). Thematic and positional accuracy assessment of digital remotely sensed data. En R. E. McRoberts, G. A. Reams, P. C. Van Deusen & W. H. McWilliams (Eds.), *Proceedings of the seventh annual forest inventory and analysis symposium* (pp. 149-154). US Department of Agriculture, Forest Service.
- Cousins, S. A., Auffret, A. G., Lindgren, J. & Tränk, L. (2015). Regional-scale land-cover change during the 20th century and its consequences for biodiversity. *AMBIO*, 44, 17-27. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0585-9>
- De Rito, M. V., Fernández Honaine, M. & Herrera, L. P. (2020). Aplicación de un índice de naturalidad para las sierras del sistema de Tandilla. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 22(1). <https://doi.org/10.22179/revmacn.22.672>
- Dros, J. M. (2004). *Managing the Soy Boom: Two Scenarios of Soy Production Expansion in South America*. AIDEnvironment. https://www.feu.awsassets.panda.org/downloads/managingthesoyboomenglish_nbvt.pdf
- EEA INTA Balcarce [Estación Experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria]. (2018). Grupo Agrometeorología, Unidad Integrada Balcarce. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- FAO. (2014). *Building a common vision for sustainable food and agriculture. Principles and approaches*. FAO.
- Fernández, G. & Ramos, A. G. (2017). El crecimiento urbano de Tandil: ¿modelo territorial de la ciudad difusa? *Geográfica Digital*, 10(20), 1-12. <http://dx.doi.org/10.30972/geo.10202201>
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185-201. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00295-4)
- Gilarranz, L. J., Sabatino M., Aizen M. A. & Bascompte, J. (2015). Hot spots of mutualistic networks. *Journal of Animal Ecology*, 84(2), 407-413. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12304>
- Herrera, L. P., Montti, L. F., Sabatino, M. & de Rito, M. V. (2019). El paisaje serrano de Tandilia: Un tesoro geológico, ecológico y cultural. *Ciencia Hoy*, 28(163), 44-50. https://notablesdelaciencia.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/121501/CONICET_Digital_Nro.bcb80589-1cd6-471c-a1ac-ca16966613d4_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Herrera, L. P., Sabatino, M. C., Jaimes, F. R. & Saura, S. (2017). Landscape connectivity and the role of small habitat patches as stepping stones: an assessment of the grassland biome in South America. *Biodiversity and Conservation*, 26(14), 3465-3479. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1416-7>
- INDEC [Instituto Nacional de Estadística y Censos]. (1991). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 1991*. <http://redatam.indec.gov.ar>
- INDEC [Instituto Nacional de Estadística y Censos]. (2015). *Estimaciones de población por sexo, departamento y año calendario 2010-2025*. https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/poblacion/proyeccion_departamentos_10_25.pdf
- Jacobs, S., Verheyden, W. & Dendoncker, N. (2017). Why to map? En B. Burkhard & J. Maes (Eds.), *Mapping Ecosystem Services* (pp. 171-175). Pensoft Publishers.

- Jaimes, F. R., Sabatino, M. & Herrera, L. P. (2019). Caracterización del paisaje serrano de Tandilia (Buenos Aires, Argentina) utilizando SIG. Una aproximación para definir áreas prioritarias para la conservación. *Revista Estudios Ambientales*, 7(2), 39-65. <https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudios-ambientales/article/download/480/421>
- Jaramillo, L. & Antunes, A. (2018). Detección de cambios en la cobertura vegetal mediante interpretación de imágenes Landsat por redes neuronales artificiales (RNA). Caso de estudio: Región Amazónica Ecuatoriana. *Revista de Teledetección*, 51, 33-46. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8995>
- Kaufman, Y. J. (1989). The atmospheric effect on remote sensing and its correction. En G. Asrar (Ed.), *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (pp. 336-428). John Wiley & Sons.
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A. & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment international*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Lara, B. & Gandini, M. (2014). Quantifying the land cover changes and fragmentation patterns in the Argentina Pampas, in the last 37 years (1974-2011). *GeoFocus*, 14, 163-180. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/download/306/154>
- Lindsay, E., King, D., Davidson, A. & Daneshfar, B. (2019). Canadian Prairie Rangeland and Seeded Forage Classification Using Multiseason Landsat 8 and Summer RADARSAT-2. *Rangeland Ecology & Management*, 72(1), 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2018.07.005>
- Montico, S., Di Leo, N., Bonel, B. & Denoia, J. (2019). Cambios del uso de la tierra en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe: Impacto en la sostenibilidad y en los servicios ecosistémicos. *Cuadernos del CURIHAM*, 25, 31-39. <https://doi.org/10.35305/curiham.v25i0.115>
- Paruelo, J. M. & Oesterheld, M. (2004). *Patrones espaciales y temporales de la expansión de Soja en Argentina: relación con factores socioeconómicos y ambientales*. https://www.agro.uba.ar/users/lart/bancomundial/INFORME_final.pdf
- Pflugmacher, D., Rabe, A., Peters, M. & Hostert, P. (2019). Mapping pan-European land cover using Landsat spectral-temporal metrics and the European LUCAS survey. *Remote Sensing of Environment*, 221, 583-595. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.001>
- Picone, N. & Campo, A. M. (2014). Comparación urbano-rural de parámetros meteorológicos en la ciudad de Tandil, Argentina. *Revista de Climatología*, 14, 3-23. https://notablesdelaciencia.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/21824/CONICET_Digital_Nro.26210.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Piquer Rodríguez, M., Butsic, V., Gärtner, P., Macchi, L., Baumann, M., Pizarro, G. G., ... & Kuemmerle, T. (2018). Drivers of agricultural land-use change in the Argentine Pampas and Chaco regions. *Applied geography*, 91, 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.01.004>
- Pons, X., Pesquer, L., Cristóbal, J. & González-Guerrero, O. (2014). Automatic and improved radiometric correction of Landsat imagery using reference values from MODIS surface reflectance images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 243-254. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.06.002>
- Richards, J. & Jia, X. (2006). *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Springer-Verlag.
- Ruiz de Galarreta, A. R., Barranquero, R. S., Varni, M. & Rodríguez, C. I. (2011). Geología e hidrolitología de la cuenca del Arroyo Languayú, Provincia de Buenos Aires (Argentina). *Ciencia, docencia y tecnología*, 20(43), 157-176. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3789189>
- Ruiz de Galarreta, V. R., Noriega, R. B., Barranquero, R. S., Díaz, A. A., Rodríguez, C. I. y Miguel, R. E. (2010). Análisis integral del sistema hídrico, uso y gestión. Cuenca del arroyo Languayú, Tandil, Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 121(4), 343-356. https://www.igme.es/Boletin/2010/121_4/4-ARTICULO%201.pdf
- Ruiz de Galarreta, V. A., Varni, M., Banda Noriega, R. & Barranquero, R. (2007). *Caracterización geohidrológica preliminar en la cuenca del arroyo Languayú, partido de Tandil, Buenos Aires* [Presentación de paper]. V Congreso Argentino de Hidrogeología y III Seminario Hispano-Latinoamericano de Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Paraná, Entre Ríos, Argentina.

- Sánchez, R., Mattus, G. & Zulaica, M. L. (1999). *Compartimentación ecológica y ambiental del partido de Tandil (provincia de Buenos Aires)* [Presentación de *paper*]. Congreso Ambiental 1999. San Juan, Argentina.
- Sánchez, R. & Zulaica, L. (octubre, 2002). *Ordenamiento morfoedáfico de los sistemas ecológico-paisajísticos del Partido de Tandil (Provincia de Buenos Aires)* [Presentación de *paper*]. Congreso Nacional de Geografía “Contribuciones científicas. Las grandes ciudades y sus contradicciones”. Buenos Aires, Argentina.
- Sequeira, N. D., Vazquez, P. S., Sacido, M. B., & Daga, D. Y. (2021). Zonificación agroecológica del partido de Benito Juárez (Argentina): agriculturización y consecuencias ambientales en una porción de la Región Pampeana Argentina. *Investigaciones Geográficas*, 76, 285-307. <https://doi.org/10.14198/ingeo.18076>
- Sequeira, N. D., Vazquez, P. S. & Zulaica, M.L. (2016). Impactos sobre el ecosistema derivados de la agriculturización en el partido de Benito Juárez, Buenos Aires, período 2003-2011. *Revista Iberoamericana Universitaria en Ambiente, Sociedad y Sustentabilidad (AMBIENS)*, 2(3), 30-51. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/59496/CONICET_Digital_Nro.eb279824-d4d9-4310-bc2b-01065aa469e4_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Simons, G., Bastiaanssen, W., Ngo, L. A., Hain, C. R., Anderson, M. & Senay, G. (2016). Integrating global satellite-derived data products as a pre-analysis for hydrological modelling studies: a case study for the Red River Basin. *Remote Sensing*, 8(4), 279. <https://doi.org/10.3390/rs8040279>
- SMN [Servicio Meteorológico Nacional]. (2018). *Informe especial de la sequía 2017-2018 en la Región Pampeana*. Buenos Aires, Argentina. https://www.smn.gob.ar/sites/default/files/Informe_sequ%C3%ADa_regi%C3%B3npampeana.pdf
- Somoza A., Vazquez P. S., Sacido M. B. & Zulaica, M. L. (2021a). Zonificación agroecológica del partido de Tandil (Argentina): aportes para gestión de servicios ecosistémicos. *Cadernos de Geografía*, 43, 107- 126. https://doi.org/10.14195/0871-1623_43_8
- Somoza A., Vazquez P. S., Zulaica, M. L. & Sacido, M. (2021b). Cambios de usos del suelo en el partido de Tandil (1989-2019), según sistemas ecológicos-paisajísticos. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, 13(19), 1-19. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/164568/CONICET_Digital_Nro.53845303-c330-4c94-8d39-58ecb6e73f80_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Song, X. P., Hansen, M. C., Stehman, S.V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F. & Townshend, J. R. (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 560(7720), 639–643. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>
- Soriano, A., León, R. J. C., Sala, O. E., Lavado, R. S., Deregibus, V. A., Cahupé, M.A., ... & Lemcoff, J. H. (1992). Río de la Plata grasslands. En R. T., Coupland (Ed.), *Ecosystems of the world 8A. Natural grasslands* (pp. 367-407). Elsevier. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/1015647>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Tamagno, L. N., Iermanó, M. J. & Sarandón, S. J. (2018). Los saberes y decisiones productivo-tecnológicas en la agricultura familiar pampeana: Un mecanismo de resistencia al modelo de agricultura industrial. *Mundo Agrario*, 19(42), e100. <https://doi.org/10.24215/15155994e100>
- Tscharntke, T., Clough, Y., Wanger, T. C., Jackson, L., Motzke, I., Perfecto, I., ... & Whitbread, A. (2012). Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological conservation*, 151(1), 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.01.068>
- U.S. Geological Survey. (2020). *Landsat-Earth observation satellites. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2015–3081*, 4 p. <https://doi.org/10.3133/fs20153081>

- Vazquez, P. S., Rivas, R. E. & Usunoff, E. (2008). Análisis multitemporal de la disponibilidad de agua en el suelo. *Revista Ciencia*, 3(3), 47-58. https://www.researchgate.net/publication/351051077_Analisis_Multitemporal_de_la_Disponibilidad_de_Agua_en_el_Suelo_a_Partir_de_Datos_de_Satelite_1_2_3_Multitemporal_Analsys_of_Soil_Moisture_from_Remote_Sensing_Data
- Vazquez, P. S. & Zulaica, M. L. (2013). Intensificación agrícola y pérdida de servicios ambientales en el partido de Azul (Provincia de Buenos Aires) entre 2002-2011. *Sociedade y Natureza*, 25(3), 543-556. <https://doi.org/10.1590/s1982-45132013000300008>
- Vazquez, P. S., Zulaica, M. L. & Ferreyra, M. V. (2014a). Expansión agrícola e impactos territoriales en la Cuenca Superior del Arroyo Langueyú (Partido de Tandil, provincia de Buenos Aires, Argentina). *Geografia em Questão*, 7(1), 177-202. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/25821/CONICET_Digital_Nro.9efbfaa4-5d66-4af8-8c54-01634ed03cf8_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Vazquez, P. S., Zulaica, M. L. & Sacido, M. B. (2014b). Indicadores de sustentabilidad en las unidades agroecológicas de la Cuenca del río Quequén Grande (Argentina). *Campo-Territorio: revista de Geografía Agrária*, 9(19), 118-148. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/34857/CONICET_Digital_Nro.ac9806cb-44d5-4fa8-96c3-4db09b74249f_A.pdf?sequence=2
- Vazquez, P. S., Zulaica, M. L. & Requesens, E. (2016). Análisis ambiental de los cambios en el uso de las tierras en el partido de Azul (Buenos Aires, Argentina). *Agriscientia*, 33(1), 15-26. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v33.n1.16568>
- Vazquez, P. S., Zulaica, M. L., Sequeira, N. D. & Daga, D. Y. (2019). Expansión agrícola y potenciales implicancias sobre los servicios ecosistémicos en los paisajes del partido de Necochea, Buenos Aires, Argentina. *Acta Geográfica*, 13(31), 171-196. <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v13i31.5323>
- Vazquez, P. S. & Somoza, A. (2020). Cuenca hidrográfica agropecuaria y evolución de los servicios ecosistémicos en la región sur pampeana Argentina. *Papeles de Geografía*, 66, 103-122. <https://doi.org/10.6018/geografia.431471>
- Vicente-Serrano, S. M., Pérez-Cabello, F. & Lasanta, T. (2008). Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3916-3934. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.011>
- Viglizzo, E., Frank, F., Carreño, L., Jobbagy, E., Pereyra, H., Clatt, J., Pincen, D. & Ricard, F. (2011). Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17(2), 959-973. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x>
- Volante, J., Mosciaro, J., Poclava, M. M., Vale, L., Castrillo, S., Sawchik, J., ... & Paruelo, J. (2015). Expansión agrícola en Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Chile entre 2000-2010. Caracterización espacial mediante series temporales de índices de vegetación. *RIA Revista de investigaciones agropecuarias*, 41(2), 179-191. <http://www.scielo.org.ar/pdf/ria/v41n2/v41n2a11.pdf>
- Zulaica, L. (2008). Sistemas ambientales de la Cuenca Superior del arroyo Langueyú (partido de Tandil, Argentina). *Investigaciones Geográficas*, 45, 251-269. <https://doi.org/10.14198/ingeo2008.45.10>