

Changes in regulating ecosystem services and their relationship with land use changes in the Argentina Pampas

Cambios en los servicios ecosistémicos de regulación y su relación con los cambios en el uso del suelo en la región pampeana (Argentina)

Bruno Lara^{1*}; Marcelo Gandini¹; Sofía Salese²

¹Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Facultad de Agronomía, Laboratorio de Biología Funcional y Biotecnología (BIOLAB)-CICBAINBIOTEC-CONICET. Av. República de Italia 780, (7300) Azul. Buenos Aires, Argentina.

²Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Facultad de Agronomía, Laboratorio de Investigación y Servicios en Teledetección de Azul (LISTA). República de Italia 780, (7300) Azul. Buenos Aires, Argentina.

*Corresponding author: brunolara73@gmail.com; tel.: +54 (02281) 433291.

Abstract

Introduction: Land use changes represent the factor with the greatest impact on terrestrial ecosystems. The conceptual framework of ecosystem services allows understanding how changes in ecosystems affect human well-being.

Objective: To evaluate changes in five key ecosystem functions and two key ecosystem services in the Argentina Pampas between 2001 and 2018, and to analyze their relationship with land use changes.

Materials and methods: Five ecosystem functions (soil organic carbon storage, biomass carbon storage, erosion control, soil fertility and retention of excess precipitation by vegetation cover) and two regulating ecosystem services (flood regulation and climate regulation) were mapped from 2001-2018 using biophysical models. The main land uses were characterized based on remote sensing data.

Results and discussion: Ecosystem functions, except for biomass carbon storage, decreased at the regional scale between 2001 and 2018; precipitation retention by cover (40.7 %) and erosion control (35.4 %) decreased the most. Also, the ecosystem services of flood regulation and climate regulation decreased 6.78 % and 6.8 %, respectively. The spatial patterns of decrease in the levels of provision of these services were associated with the replacement of natural grasslands by cropland.

Conclusions: The use of biophysical models allowed us to analyze, spatially, the dynamics of regulating ecosystem services and to evaluate their relationship with land use changes.

Keywords: carbon storage; flood regulation; ecosystem functions; climate regulation; grassland replacement.

Resumen

Introducción: Los cambios en el uso del suelo representan el factor de mayor impacto sobre los ecosistemas terrestres. El marco conceptual de servicios ecosistémicos permite la comprensión de cómo los cambios en los ecosistemas afectan al bienestar humano.

Objetivo: Evaluar cambios en cinco funciones y dos servicios ecosistémicos clave en la región pampeana entre el 2001 y 2018, y analizar su relación con los cambios de usos del suelo.

Materiales y métodos: A partir de modelos biofísicos se mapearon cinco funciones ecosistémicas (almacenamiento de carbono orgánico en el suelo, almacenamiento de carbono en biomasa, control de la erosión, fertilidad de suelos y retención de excesos de precipitación por la cobertura vegetal) y dos servicios ecosistémicos de regulación (amortiguación de inundaciones y regulación climática) en el periodo 2001-2018. Los principales usos del suelo se caracterizaron a partir de datos de sensores remotos.

Resultados y discusión: Las funciones ecosistémicas, a excepción del almacenamiento de carbono en biomasa, disminuyeron a escala regional entre el 2001 y 2018; la retención de precipitación por la cobertura (40.7 %) y el control de la erosión (35.4 %) disminuyeron en mayor medida. De igual manera, los servicios ecosistémicos de amortiguación de inundaciones y regulación climática disminuyeron 6.78 % y 6.8 %, respectivamente. Los patrones espaciales de disminución en los niveles de provisión de dichos servicios se asociaron al reemplazo de pastizales naturales por cultivos agrícolas.

Conclusión: El uso de modelos biofísicos permitió analizar, espacialmente, la dinámica de servicios ecosistémicos de regulación y evaluar su relación con los cambios en el uso del suelo.

Palabras clave: almacenamiento de carbono; amortiguación de inundaciones; funciones ecosistémicas; regulación climática; reemplazo de pastizales.

Introduction

Global change comprises dimensions that interact in complex ways and alter the structure and functioning of the Earth's ecosystems (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES], 2019). Every ecosystem is vulnerable to climate change; however, the impact and size of the ecosystem response can be highly variable. Therefore, IPBES (2019) highlights that 75 % of the Earth's surface is significantly altered with ecosystem indicators that point to an accelerated decline and that the driving forces of change have increased unprecedentedly over the last 50 years, with land use change having the greatest impact on a global scale (IPBES, 2019). Thus, land management in the current context requires a broad conceptual framework that allows for an understanding of how society interacts with its natural environment.

The growing trend of environmental degradation and the social conflicts involved have led to the development of approaches that explain how changes in ecosystems affect human well-being. Ecosystem services (ES) approach has positioned itself as a conceptual framework of great relevance allowing the development of research in several disciplines (Bennett et al., 2015). Regardless of the diverse definitions, the proposal by Fisher et al. (2009), which refers to ES as those aspects of ecosystems used (actively or passively) to produce human well-being, allows distinguishing three central elements or components: the structure and function of ecosystems relevant to a service (the provision), the service used or enjoyed by the population (the ES itself), and the change resulting in the well-being of the population; i.e., the benefit. Usually, these elements form what is called the cascade model of ES provision (Haines-Young & Postchin, 2010), thus acquiring a more operational approach (Paruelo et al., 2016).

The development of standard procedures for mapping the level of ES provision has become one of the most interesting topics in academia, considering that the availability of spatially reliable information is one of the central issues for making decisions on land use planning (Balvanera et al., 2012). Thus, software or protocols have emerged to provide support for mapping ES and quantifying their level of provision, such as ARIES (Villa et al., 2014), InVEST (Nelson & Daily, 2010) and ECOSER (2022); however, their actual application in socio-environmental conflict resolution is still incipient (Weyland et al., 2019).

Environmental degradation has been accelerated in Argentina by the intensification and expansion of high-input agriculture, as in countries with economies dependent almost exclusively on natural capital and with inequitable distribution of its benefits (Arrieta et al.,

Introducción

El cambio global abarca dimensiones que interactúan de manera compleja y alteran la estructura y funcionamiento de los ecosistemas de la Tierra (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES], 2019). Cada ecosistema es vulnerable al cambio climático; sin embargo, el impacto y la magnitud de la respuesta de los ecosistemas puede ser altamente variable. Al respecto, el IPBES (2019) destaca que 75 % de la superficie terrestre se encuentra alterada significativamente con indicadores ecosistémicos que señalan una declinación acelerada y que las fuerzas directrices de cambio han aumentado sin precedentes durante los últimos 50 años, siendo el cambio en el uso del suelo el de mayor impacto a escala global (IPBES, 2019). De esta manera, la gestión del territorio en el contexto actual requiere un marco conceptual amplio que permita la comprensión de la forma en que la sociedad interactúa con su entorno natural.

La tendencia creciente de degradación ambiental y los conflictos sociales que conlleva han propiciado el desarrollo de enfoques que explican cómo los cambios en los ecosistemas afectan al bienestar humano. El enfoque de servicios ecosistémicos (SE) se ha posicionado como un marco conceptual de gran relevancia permitiendo el desarrollo de investigaciones en varias disciplinas (Bennett et al., 2015). A pesar de las diversas definiciones, la propuesta de Fisher et al. (2009) que refiere a los SE como aquellos aspectos de los ecosistemas utilizados (activa o pasivamente) para producir bienestar humano, permite distinguir tres elementos o componentes centrales: la estructura y función de los ecosistemas relevantes para un servicio (la provisión), el servicio usado o disfrutado por la población (el SE propiamente dicho) y el cambio que resulta en el bienestar de la población; es decir, el beneficio. Generalmente, estos elementos conforman lo que se denomina el modelo de cascada de provisión de SE (Haines-Young & Postchin, 2010) adquiriendo así un enfoque más operativo (Paruelo et al., 2016).

El desarrollo de procedimientos estándares para el mapeo del nivel de provisión de SE se ha convertido en uno de los tópicos de mayor interés en el ámbito académico, debido a que la disponibilidad de información espacialmente confiable es una de las cuestiones centrales para la toma de decisiones sobre la planificación del uso de la tierra (Balvanera et al., 2012). Así es que han surgido *softwares* o protocolos para brindar apoyo al mapeo de SE y cuantificar su nivel de provisión, tales como ARIES (Villa et al., 2014), InVEST (Nelson & Daily, 2010) y ECOSER (2022); sin embargo, su aplicación real en la solución de conflictos socioambientales es aún incipiente (Weyland et al., 2019).

2018). Specifically, in the Argentina Pampas, the first major transformations date back to the 16th century, after European colonization, with the introduction of domestic livestock and, later, with the introduction of agriculture at the end of the 19th century. Favorable soil and climate conditions have transformed the Pampean region into the area with the largest agricultural production in Argentina, causing severe changes in the original landscape (Matteucci, 2012).

The process of agriculturization, characterized by the increase of agricultural areas in areas of traditionally livestock or mixed use, which began slowly in the 1960s, has accelerated dramatically and has led to serious ecological and social changes (Mastrangelo et al., 2015). This process has been sustained mainly by deep structural economic changes and the incorporation of the technological package associated with the cultivation of genetically modified soybean (Matteucci, 2012). At the same time, the region has been subject to intense drought and flooding events (Celleri et al., 2018) with considerable impacts on the local and national economy (Bert et al., 2021). In this regard, global climate model projections predict a higher incidence of these extreme weather events accompanied by increases in mean annual temperature and precipitation (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013) which, in combination with changes in land use, could accentuate impacts on the functioning of ecosystems and the provision of ES (Volante et al., 2012).

This context requires tools and methodologies for the characterization and monitoring of ecosystems and ES provision, which are applicable at various scales and comparable with each other. The objective of this study was to evaluate changes in five functions and two regulating ecosystem services in the Argentina Pampas in the period 2001-2018, and to analyze their relationship with the main land use changes.

Materials and methods

Study area

The Argentina Pampas comprises an extensive plain of 398 966 km², crossed by the Tandilia and Ventania mountain ranges, and located in central-eastern Argentina, supporting the most important grassland ecosystem in the country and one of the largest in the world (Matteucci, 2012). According to its climate conditions, especially the availability of moisture, the Argentina Pampas has been subdivided into Humid Pampa and Subhumid Pampa, and into 11 ecosystem complexes, according to relief, topography and soil types (Figure 1).

En Argentina, la intensificación y expansión de la agricultura de altos insumos ha acelerado la degradación ambiental, al igual que en los países con economías dependientes casi exclusivamente del capital natural y con distribución inequitativa de sus beneficios (Arrieta et al., 2018). Particularmente, en la región pampeana, las primeras grandes transformaciones se remontan al siglo XVI, luego de la colonización europea, con la introducción del ganado doméstico y, posteriormente, con la introducción de la agricultura a finales del siglo XIX. Las condiciones edáficas y climáticas favorables han convertido a la región pampeana en la zona de mayor producción agrícola de Argentina, modificando severamente el paisaje original (Matteucci, 2012).

El proceso de agriculturización, caracterizado por el incremento de las áreas agrícolas en zonas de uso tradicionalmente ganadero o mixto, que comenzó lentamente en la década de 1960, se ha acelerado de manera dramática y ha provocado serios cambios ecológicos y sociales (Mastrangelo et al., 2015). Este proceso se ha sostenido principalmente por cambios económicos estructurales profundos y la incorporación del paquete tecnológico asociado al cultivo de soja genéticamente modificada (Matteucci, 2012). Al mismo tiempo, la región ha estado sujeta a fenómenos intensos de sequía e inundación (Celleri et al., 2018) con impactos considerables sobre la economía local y nacional (Bert et al., 2021). Al respecto, las proyecciones de los modelos climáticos globales predicen mayor incidencia de estos eventos climáticos extremos acompañados de aumentos en la temperatura media anual y en las precipitaciones (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013) que, en combinación con los cambios de usos del suelo, podrían acentuar los impactos sobre el funcionamiento de los ecosistemas y la provisión de SE (Volante et al., 2012).

Este contexto requiere herramientas y metodologías para la caracterización y el seguimiento de los ecosistemas y la provisión de SE, las cuales sean aplicables a varias escalas y comparables entre sí. El objetivo de este trabajo fue evaluar cambios en cinco funciones y dos servicios ecosistémicos de regulación en la región pampeana en el periodo 2001-2018, y analizar su relación con los principales cambios de usos del suelo.

Materiales y métodos

Área de estudio

La región pampeana o Ecorregión Pampa comprende una planicie extensa de 398 966 km², atravesada por los cordones serranos de Tandilia y Ventania, y situada en el centro-este de Argentina brindando soporte al

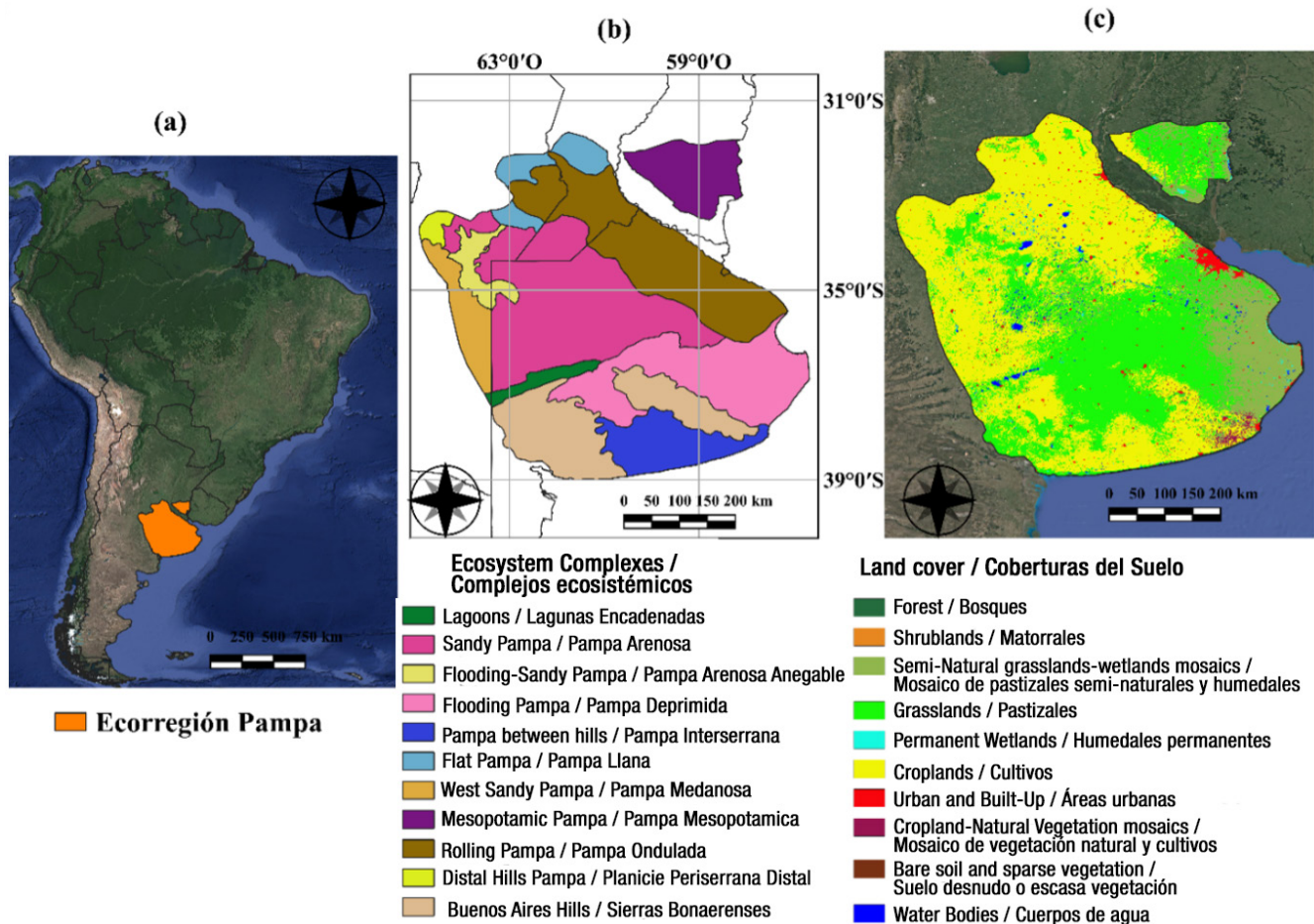


Figure 1. Location of the Argentina Pampas in the South American context (a), the Argentina Pampas and its ecosystem complexes (b) and land covers in 2018 (c).

Figura 1. Ubicación de la región pampeana en el contexto Sudamericano (a), Ecorregión Pampa y complejos ecosistémicos que la conforman (b) y coberturas del suelo en el 2018 (c).

The climate is characterized as humid temperate with mean annual precipitation of 700 mm to 1 200 mm and mean annual temperature of 14 to 20 °C. Precipitation decreases from northeast to southeast with a distributed regime mainly in the spring and summer months, while mean annual temperature decreases from north to south. The interannual variability found in precipitation patterns determines occasional extreme conditions of floods and droughts over large areas, which are linked, partially, to El Niño and La Niña events, which differentially impact the study area (Aliaga et al., 2016).

Local climate, topographic, edaphic and hydrological conditions determine the distribution of grassland types that differ in their vertical and horizontal structure and in the combination of species that inhabit them (Matteucci, 2012). The intense transformation of the landscape in the sectors of greatest agricultural aptitude, such as the Rolling Pampas, Flat Pampas and Pampas between hills complexes, has led to the almost total replacement of the natural grassland,

ecosistema de pastizales más importante del territorio nacional y uno de los más extensos del mundo (Matteucci, 2012). De acuerdo con sus condiciones climáticas, particularmente la disponibilidad de humedad, la región pampeana ha sido subdivida en Pampa Húmeda y Pampa Subhúmeda, y en 11 complejos ecosistémicos, según el relieve, topografía y tipos de suelo (Figura 1).

El clima se caracteriza por ser templado húmedo con precipitación media anual de 700 mm a 1 200 mm y temperatura media anual de 14 a 20 °C. Las precipitaciones decrecen de noreste a sudeste con un régimen distribuido principalmente en los meses de primavera y verano, mientras que la temperatura media anual decrece de norte a sur. La variabilidad interanual en los patrones de precipitación determina condiciones extremas ocasionales de inundaciones y sequías sobre zonas amplias, que están vinculadas – en parte- a eventos de El Niño y La Niña, los cuales impactan diferencialmente el área de estudio (Aliaga et al., 2016).

which has considerably fragmented the natural habitat, affecting the associated local diversity. This process of agriculturalization has generated a homogenized landscape with low productive diversity (Lara & Gandini, 2014). In those sectors with limitations for agricultural activity, as occurs in the Flooding Pampas, natural and semi-natural grasslands, used as a source of forage for livestock, represent the main vegetation type forming floristic relicts of the vegetation that dominated this type of landscape (Gandini et al., 2019).

Ecosystem functions and services estimates for the Argentina Pampas

Ecosystem functions and services were estimated with the ECOSER protocol, a collaborative tool intended to provide decision support for land use planning (ECOSER, 2022). There are widespread protocols for mapping ecosystem services (such as ARIES or InVEST), but they differ from the cascade model of ES provision (Haines-Young & Postchin, 2010) and therefore make no clear distinction between functions and ES. In contrast, ECOSER is based on a procedure scheme which, based on edaphic properties, topography, climate variables, spatial distribution of land cover and land use, generates ecosystem functions that are integrated in a weighted linear combination (according to local ecological conditions) to create maps that capture the spatial heterogeneity in the provision of ES (Weyland et al., 2017); that is, there is an explicit separation between functions and ES.

Two regulating ES of great relevance for the Argentina Pampas were evaluated: flood regulation (reduction of frequency, extent and duration) and climate regulation (attenuation of global temperature increase, extreme weather events and changes in precipitation patterns). Considering the topographic and edaphic particularities of the study area, interannual variations in precipitation regimes usually determine flooding conditions in large areas; therefore, the ES of flood regulation is of great importance in the region. Furthermore, mitigating the impacts of climate change is one of the main global challenges and the IPCC (2013) recognizes land use as one of the main drivers of change. Thus, the ES of climate regulation has both global and local relevance due to its close relationship with the process of agriculturalization.

For the generation of these ES, five ecosystem functions that support the aforementioned services were mapped: i) soil organic carbon storage, ii) biomass carbon storage, iii) erosion control, iv) soil fertility, and v) retention of excess precipitation by vegetation cover.

Soil organic carbon storage (COS_i) is calculated considering the reference conditions (undisturbed native vegetation) and the change factor represented

Las condiciones locales climáticas, topográficas, edáficas e hidrológicas determinan la distribución de los tipos de pastizales que se diferencian en la estructura vertical y horizontal y en el ensamble de especies que los habitan (Matteucci, 2012). La transformación intensa del paisaje en los sectores de mayor aptitud agrícola, tales como los complejos Pampa Ondulada, Pampa Llana y Pampa Interserrana, han conducido al reemplazo casi total del pastizal natural que ha fragmentado considerablemente el hábitat natural, afectando la diversidad local asociada. Este proceso de agriculturización ha generado un paisaje homogeneizado y de baja diversidad productiva (Lara & Gandini, 2014). En aquellos sectores con limitaciones para la actividad agrícola, como ocurre en la Pampa Deprimida, los pastizales naturales y seminaturales, utilizados como fuente de forraje para el ganado vacuno, representan el principal tipo de vegetación conformando relictos florísticos de la vegetación que dominó este tipo de paisajes (Gandini et al., 2019).

Estimación de las funciones y servicios de los ecosistemas para la región pampeana

Las funciones y servicios ecosistémicos se estimaron con el protocolo ECOSER, una herramienta colaborativa destinada a brindar apoyo para la toma de decisiones acerca de la planificación del uso de la tierra (ECOSER, 2022). Existen protocolos muy difundidos para el mapeo de los servicios ecosistémicos (tales como ARIES o InVEST), pero no están basados en el modelo de cascada de provisión de SE (Haines-Young & Postchin, 2010) y, por lo tanto, no realizan una distinción clara entre las funciones y los SE. En cambio, ECOSER se basa en un esquema de procedimientos que, a partir de propiedades edáficas, topográficas, variables climáticas, distribución espacial de coberturas y usos del suelo, genera funciones ecosistémicas que se integran en una combinación lineal ponderada (acorde con las condiciones ecológicas locales) para generar los mapas que capturan la heterogeneidad espacial en la provisión de los SE (Weyland et al., 2017); es decir, hay una separación explícita entre las funciones y SE.

Se evaluaron dos SE de regulación de gran relevancia para la región pampeana: amortiguación de inundaciones (reducción de la frecuencia, extensión y duración) y regulación climática (atenuación del aumento de la temperatura global, de fenómenos climáticos extremos y de cambios en los patrones de precipitación). Dadas las particularidades topográficas y edáficas del área de estudio, las variaciones interanuales en los regímenes de precipitación suelen determinar condiciones de inundación en zonas amplias, por lo tanto, el SE de amortiguación de inundaciones es de gran importancia en la región. Por otro lado, la mitigación de los impactos del cambio climático es uno de los principales desafíos globales y el IPCC (2013) reconoce el uso del suelo como uno de

by the current vegetation cover type: $COS_i = COS_{ref} * F_{lu} * F_{mg} * F_a$; where, COS_{ref} = amount of organic C in the soil under the reference condition; F_{lu} , F_{mg} and F_a = change factor related to the type of soil cover/use, tillage practices and levels of C input to the soil, respectively. The values used were taken from IPCC (2006).

Biomass carbon storage (tree, shrub, herbaceous and litter carbon on the soil) is estimated according to a value given for each land cover/use by IPCC (2006).

Erosion control was estimated using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), which predicts mean annual sediment losses according to climatic, topographic, edaphic, land use and land cover factors. The function is estimated for bare soil conditions and vegetation cover.

Soil fertility index provides a numerical valuation of its productive capacity, assuming it depends on intrinsic properties, under optimal management conditions. Productivity is expressed on the following factors: moisture, drainage, effective depth, texture, structure, base saturation of the absorbent complex, concentration of soluble salts, organic matter content, nature of clay and mineral reserves. Each factor is rated on a productivity scale of 0-100: very good (70-100), good (69-50), fair (49-30) and low (29-0). The values of this index were taken from the soil map (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA], 1990).

The retention of precipitation excesses by vegetation cover (REP) is based on a relative SE estimation model proposed by Carreño et al. (2012). It is calculated as $REP = B * (1 - CVB) * F_{cis} * F_{prec} * (1 - F_{slope})$; where, B = vegetation biomass, CVB = coefficient of seasonal variation in biomass within a year, F_{cis} = soil infiltration capacity, F_{prec} = precipitation factor, and F_{slope} = slope factor.

These five ecosystem functions were mapped at a spatial resolution of 500 m for the years 2001 and 2018, except for the soil fertility function, which we assumed constant in the region in the study period (ECOSER, 2022). Since the maps derived for the ecosystem functions have different units, they were normalized to the range 0-100. Subsequently, the maps of the regulating ES were obtained using the equation $FSE_i = \sum b_{ij} * FE_j$, where the flow of ecosystem service i (FSE_i) derived from the linear combination of j ecosystem functions (FE_j), weighted by their relative contribution (b_{ij}) to that ES (Figure 2). The factors used for weighting the relative contribution of each of the ecosystem functions to the ES were taken from Weyland et al. (2017).

To assess changes in the provision of regulating ES between 2001 and 2018, relative differences were estimated for each of them at the regional scale.

sus principales impulsores al cambio. De esta manera, el SE de regulación climática posee relevancia tanto global como local por la relación estrecha que presenta con el proceso de agriculturización.

Para la generación de estos SE se mapearon cinco funciones ecosistémicas que dan soporte a los servicios mencionados: i) almacenamiento de carbono orgánico en el suelo, ii) almacenamiento de carbono en biomasa, iii) control de la erosión, iv) fertilidad de suelos, y v) retención de excesos de precipitación por la cobertura vegetal.

El almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (COS_i) se obtiene considerando las condiciones de referencia (vegetación nativa sin disturbio) y el factor de cambio representado por el tipo de cobertura vegetal actual: $COS_i = COS_{ref} * F_{lu} * F_{mg} * F_a$; donde, COS_{ref} = cantidad de C orgánico en el suelo bajo la condición de referencia; F_{lu} , F_{mg} y F_a = factor de cambio relacionado al tipo de cobertura/uso del suelo, prácticas de labores y niveles de aporte de C al suelo, respectivamente. Los valores utilizados fueron tomados de IPCC (2006).

El almacenamiento de carbono en biomasa (carbono arbóreo, arbustivo, herbáceo y hojarasca sobre el suelo) se estima de acuerdo con un valor otorgado para cada cobertura/uso del suelo por el IPCC (2006).

El control de la erosión se estimó utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), la cual predice pérdidas medias anuales de sedimentos de acuerdo con factores climáticos, topográficos, edáficos y de uso y cobertura del suelo. La función se estima para las condiciones de suelo desnudo y para las coberturas vegetales.

El índice de fertilidad de suelos permite establecer una valoración numérica de su capacidad productiva asumiendo que esta depende de las propiedades intrínsecas, bajo condiciones óptimas de manejo. La productividad se expresa a partir de los factores siguientes: humedad, drenaje, profundidad efectiva, textura, estructura, saturación en bases del complejo absorbente, concentración de sales solubles, contenido en materia orgánica, naturaleza de la arcilla y reservas minerales. Cada factor se valora en una escala de productividad de 0-100: muy buena (70-100), buena (69-50), regular (49-30) y baja (29-0). Los valores de este índice se obtuvieron del mapa de suelos (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA], 1990).

La retención de excesos de precipitación por la cobertura vegetal (REP) está basada en un modelo de estimación relativa de SE propuesto por Carreño et al. (2012). Se calcula como $REP = B * (1 - CVB) * F_{cis} * F_{prec} * (1 - F_{pend})$; donde, B = biomasa de la vegetación, CVB = coeficiente de variación estacional en la biomasa

Based on the frequency distribution for the maps, regulating ES were categorized into low, medium and high levels of provision, based on the magnitude of changes between years. Subsequently, the high level of provision was extracted for the year 2018 and those areas of the Argentina Pampas that showed high levels in both flood control and climate control ES, called hotspots, were mapped.

On the other hand, the relationship between changes in the magnitude of ES provision levels, at the regional scale, with the main changes in land cover and land use was determined with a correspondence analysis.

Land cover and land use in the Argentina Pampas (2001-2018)

Land covers and land uses of the Argentina Pampas for the years 2001 and 2018 were characterized with the

dentro de un año, F_{cis} = capacidad de infiltración del suelo, F_{prec} = factor de precipitación, y F_{pend} = factor de pendiente.

Estas cinco funciones ecosistémicas se mapearon a una resolución espacial de 500 m para los años 2001 y 2018, excepto la función de fertilidad de suelos, la cual asumimos constante en la región en el periodo de estudio (ECOSER, 2022). Dado que los mapas obtenidos para las funciones ecosistémicas poseen unidades distintas, estas fueron normalizadas al rango 0-100. Posteriormente, los mapas de los SE de regulación se obtuvieron mediante la ecuación $FSEi = \sum_{bij} * F_{Ej}$ donde el flujo del servicio ecosistémico i ($FSEi$) se obtiene a partir de la combinación lineal de j funciones ecosistémicas (F_{Ej}), ponderado por su aporte relativo (b_{ij}) a ese SE (Figura 2). Los factores utilizados para la ponderación del aporte relativo de cada una de las funciones ecosistémicas al SE se obtuvieron de Weyland et al. (2017).

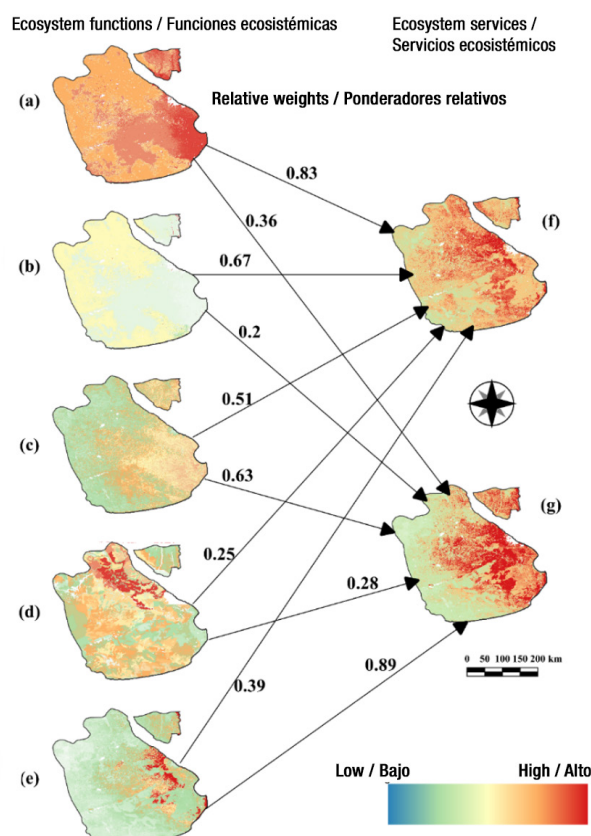


Figure 2. Relationships established between the ecosystem functions (a: soil organic carbon storage, b: biomass carbon storage, c: erosion control, d: soil fertility, e: retention of precipitation excess by vegetation cover), and the ecosystem services (f: climate regulation, g: flood regulation) analyzed for the Argentina Pampas. The numerical values of the arrows indicate the relative contribution of each ecosystem function to each of the ecosystem services.

Figura 2. Relaciones establecidas entre las funciones ecosistémicas (a: almacenamiento carbono orgánico en el suelo, b: almacenamiento carbono en biomasa, c: control de la erosión, d: fertilidad de suelos, e: retención de excesos de precipitación por la cobertura vegetal), y los servicios ecosistémicos (f: regulación climática, g: amortiguación de inundaciones) analizados para la región pampeana. Los valores numéricos de las flechas indican el aporte relativo de cada función ecosistémica a cada uno de los servicios ecosistémicos.

MODIS Land Cover product (MCD12Q1, version 6) of a spatial resolution of 500 m which makes it optimal for spatial patterns of covers at a regional scale of a wide extension such as the study area. These were improved and corrected from high spatial resolution images available in Google Earth, auxiliary field data and cover maps elaborated at a scale of greater detail (Gandini et al., 2019; Guevara-Ochoa et al., 2018; Lara & Gandini, 2014). From these maps, the main changes in vegetation cover over the period derived by cross-tabulation in the geographic information systems (GIS) environment.

Results and Discussion

Changes in ecosystem functions and the provision of regulating ecosystem services (2001-2018)

At the regional scale, three of the ecosystem functions analyzed for the Argentina Pampas showed drops in their mean values during the 2001-2018 period (Table 1). The strongest losses were observed in the function of retention of precipitation excesses by vegetation cover (40.75 %) and in the function of erosion control (35.39 %). Soil organic carbon storage only decreased by 0.70 %. In contrast, biomass carbon storage was the only ecosystem function that increased moderately at the regional scale (5.61 %; Table 1).

Concerning the regulating ES analyzed, flood regulation and climate regulation decreased 6.78 % (136.74 to 127.47) and 6.80 % (142.20 to 132.53), respectively.

When analyzing the magnitude of changes in regulating ecosystem services between 2001 and 2018, significant losses were observed in flood and climate regulation (Figures 3 and 4). In that period, for flood regulation service, 16.29 % of the study area went from

Para evaluar los cambios en la provisión de los SE de regulación entre 2001 y 2018 se estimaron las diferencias relativas para cada uno de ellos a escala regional. A partir de la distribución de frecuencias para los mapas, los SE de regulación se categorizaron en niveles de provisión bajo, medio y alto, a partir de la magnitud de los cambios entre años. Posteriormente, el nivel alto de provisión se extrajo para el año 2018 y se mapearon aquellas zonas de la región pampeana que mostraron niveles altos tanto en el SE de regulación de inundaciones como en el de regulación climática, denominadas *hotspots*.

Por otro lado, la relación entre los cambios en la magnitud de los niveles de provisión de SE, a escala regional, con los principales cambios de cobertura y usos del suelo se determinó con un análisis de correspondencia.

Coberturas y usos del suelo en la región pampeana (2001-2018)

Las coberturas y usos del suelo de la región pampeana para los años 2001 y 2018 se caracterizaron con el producto Land Cover de MODIS (MCD12Q1, versión 6) de una resolución espacial de 500 m que lo hace óptimo para los patrones espaciales de coberturas a escala regional de una extensión amplia como el área de estudio. Estos fueron mejorados y corregidos a partir de imágenes de alta resolución espacial disponibles en Google Earth, datos de campo auxiliares y mapas de coberturas elaborados a una escala de mayor detalle (Gandini et al., 2019; Guevara-Ochoa et al., 2018; Lara & Gandini, 2014). A partir de estos mapas se obtuvieron los principales cambios de coberturas en el período mediante tabulación cruzada en el entorno de sistemas de información geográfica (SIG).

Table 1. Mean values of ecosystem functions (normalized to the range 0-100) in the Argentina Pampas and percentage of change for the period 2001-2018.

Cuadro 1. Valores medios de las funciones ecosistémicas (normalizadas al rango 0-100) en la región pampeana y porcentaje de cambio para el periodo 2001-2018.

Ecosystem function / Función ecosistémica	2001	2018	Change (%) / Cambio (%)
Soil organic carbon storage / Almacenamiento de carbono orgánico en el suelo	55.86	55.47	-0.70
Biomass carbon storage / Almacenamiento de carbono en biomasa	32.26	34.07	5.61
Erosion control / Control de la erosión	70.45	45.52	-35.39
Retention of excess precipitation by vegetation cover / Retención de excesos de precipitación por la cobertura vegetal	53.69	31.81	-40.75

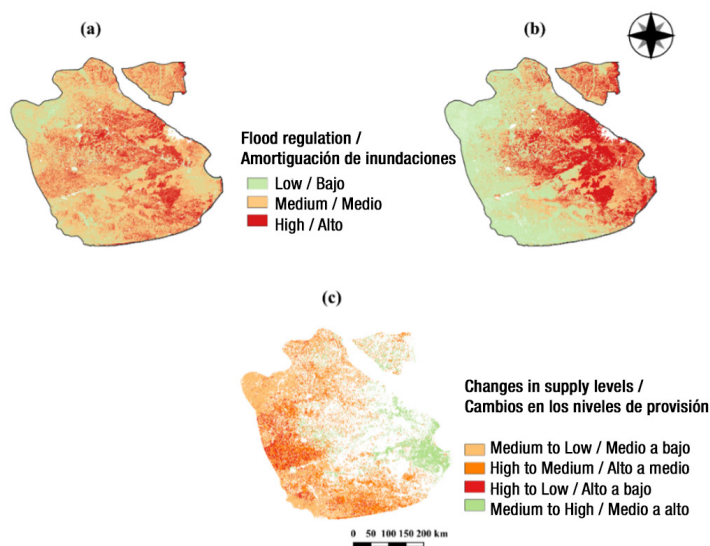


Figure 3. Ecosystem service of flood regulation for 2001 (a) and 2018 (b). Changes in provision levels for the Argentina Pampas for the period 2001-2018 (c).

Figura 3. Servicio ecosistémico de amortiguación de inundaciones para el 2001 (a) y 2018 (b). Cambios en los niveles de provisión para la región pampeana en el periodo 2001-2018 (c).

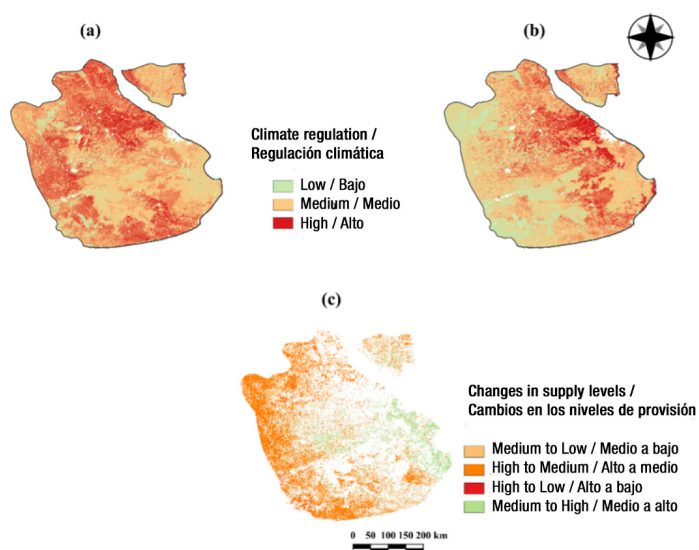


Figure 4. Ecosystem service of climate regulation for 2001 (a) and 2018 (b). Changes in provision levels in the Argentina Pampas during the period 2001-2018 (c).

Figura 4. Servicio ecosistémico de regulación climática para el 2001 (a) y 2018 (b). Cambios en los niveles de provisión en la región pampeana durante el periodo 2001-2018 (c).

medium to low levels, 16.23 % changed from high to medium levels and 3.70 % from high to low levels. Only 8.38 % of the area showed an increase in flood regulation, going from medium values in 2001 to high values in 2018, located mainly in the central-eastern sector of the Argentina Pampas (Figure 3c).

Regarding climate regulating ecosystem service, 24.76 % of the study area experienced changes from

Resultados y discusión

Cambios en las funciones ecosistémicas y la provisión de servicios ecosistémicos de regulación (2001-2018)

A escala regional, tres de las funciones ecosistémicas analizadas para la región pampeana mostraron caídas en sus valores medios durante el periodo 2001-2018

high to medium levels for the period 2001-2018, while 2.08 % and 0.51 % went from medium to low values and from high to low values, respectively. Only 7.26 % of the study area presented increases in climate regulation levels which, similarly to the flood control service, was located in the central-eastern sector of the Argentina Pampas (Figure 4c). Thus, 36.22 % and 27.35 % of the entire Argentina Pampas showed significant decreases in flood and climate regulation between 2001 and 2018.

The spatial patterns of these decreases are similar to those found by Paruelo et al. (2016) in an integrative index of ES, and to the changes observed in the decrease in carbon gains and increase in their seasonality caused by the conversion of natural grasslands to agricultural areas (Lara et al., 2019, 2020).

Although soil fertility has been considered herein as invariant over the period 2001-2018, some authors (Cruzate & Casas, 2016; Schipanski & Bennett, 2012) have found negative net balances in the main soil nutrients caused by agricultural and livestock production in Argentina that would ultimately negatively impact edaphic fertility. However, there is no updated and spatially explicit information that evaluates changes in the soil productivity index at a broad regional scale. Although this function is the least relevant, with lower weighting factors than

(Cuadro 1). Las pérdidas más bruscas se observaron en la función de retención de excesos de precipitación por la cobertura vegetal (40.75 %) y en la función de control de la erosión (35.39 %). El almacenamiento de carbono orgánico en el suelo solo disminuyó 0.70 %. En cambio, el almacenamiento de carbono en biomasa fue la única función ecosistémica que aumentó moderadamente a escala regional (5.61 %; Cuadro 1).

Con respecto a los SE de regulación analizados, la amortiguación de inundaciones y regulación climática disminuyeron 6.78 % (136.74 a 127.47) y 6.80 % (142.20 a 132.53), respectivamente.

Al analizar la magnitud de los cambios en los servicios de regulación entre el 2001 y el 2018, se observaron pérdidas significativas en la regulación de inundaciones y la regulación climática (Figuras 3 y 4). En dicho periodo, para el caso del servicio de regulación de inundaciones, 16.29 % del área de estudio pasó de niveles medios a bajos, 16.23 % cambió de niveles altos a medios y 3.70 % de niveles altos a bajos. Solo 8.38 % del área mostró aumento en la regulación de inundaciones, pasando de valores medios en 2001 a valores altos en 2018, situado principalmente en el sector centro-este de la región pampeana (Figura 3c).

Para el caso del servicio de regulación climática, 24.76 % del área de estudio experimentó cambios

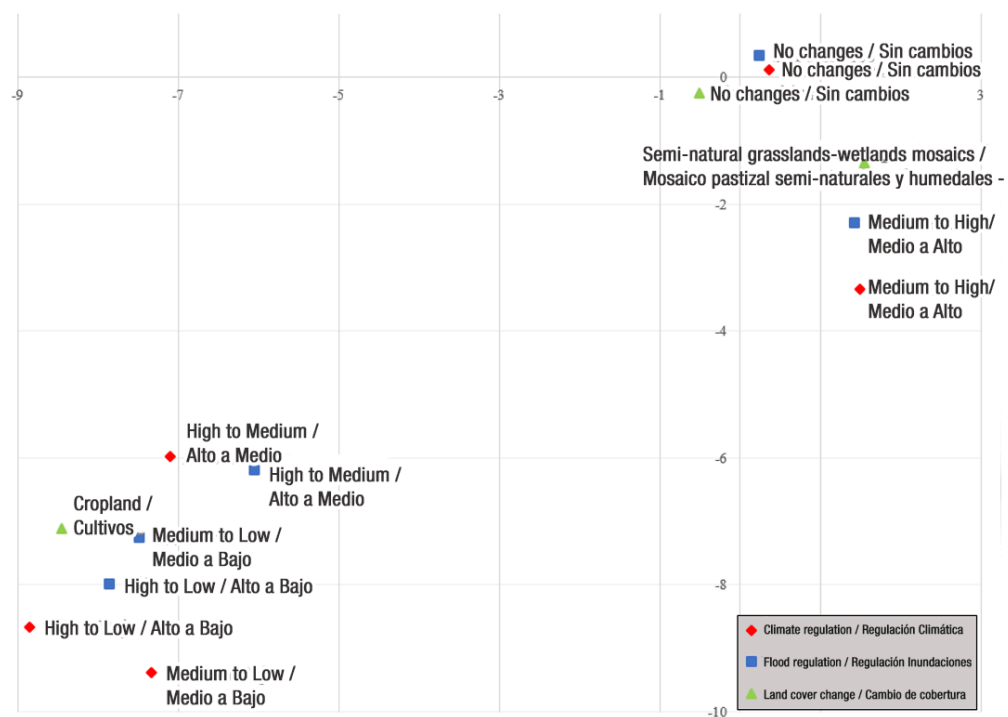


Figure 5. Correspondence analysis showing the changes in the levels of provision of the most representative regulating ecosystem services and land cover changes in the Argentina Pampas in the period 2001-2018.

Figura 5. Análisis de correspondencia donde se muestran los cambios en los niveles de provisión de los servicios de regulación y los cambios de coberturas más representativos en la región pampeana en el periodo 2001-2018.

the others, it is likely that the levels of SE provision of flood and climate regulation have been slightly overestimated by considering soil fertility as constant during the period analyzed.

Using spatial analysis through correspondence analysis of the areas of changes in the levels of provision of regulating ES with the main patterns of land cover change, it was determined that the losses of these services were positively associated with areas of conversion from natural grasslands to annual crops. Areas with no changes in ES provision levels were positively associated with areas with no land cover change between periods. In addition, areas that showed increases in the levels of flood and climate regulation were mainly associated with areas of transition from natural grasslands to the mosaic category of semi-natural grasslands and wetlands and, to a lesser extent, to areas with no land cover change (Figure 5).

From the final (2018) maps of flood regulation (Figures 3b) and climate regulation (Figure 4b) it was possible to determine the areas with high levels of provisioning, called hotspots (Figure 6). Although most of these areas are closely associated with areas of natural grasslands and the mosaic of semi-natural grasslands and wetlands, they are also associated with crop areas, mainly in the northern sector of the region and, to a lesser extent, in the south of the Argentina Pampas.

de niveles altos a medios para el periodo 2001-2018, mientras que 2.08 % y 0.51 % pasaron de valores medios a bajos y de valores altos a bajos, respectivamente. Solo 7.26 % del área de estudio presentó aumentos en los niveles de regulación climática que, de manera similar al servicio de regulación de inundaciones, se localizó en el sector centro-este de la región pampeana (Figura 4c). De este modo, 36.22 % y 27.35 % de toda la región pampeana mostraron disminuciones significativas en la regulación de inundaciones y la regulación climática entre los años 2001 y 2018.

Los patrones espaciales de estas disminuciones son similares a los encontrados por Paruelo et al. (2016) en un índice integrador de SE, y a los cambios observados en la disminución de las ganancias de carbono y aumento de su estacionalidad provocados por la conversión de pastizales naturales a áreas agrícolas (Lara et al., 2019, 2020).

Si bien aquí se ha considerado a la fertilidad de suelos como invariante en el periodo 2001-2018, algunos autores (Cruzate & Casas, 2016; Schipanski & Bennett, 2012) han encontrado balances netos negativos en los principales nutrientes del suelo provocados por la producción agrícola y ganadera en Argentina que, en última instancia, impactarían negativamente la fertilidad edáfica. No obstante, no hay información actualizada y espacialmente explícita que evalúe los

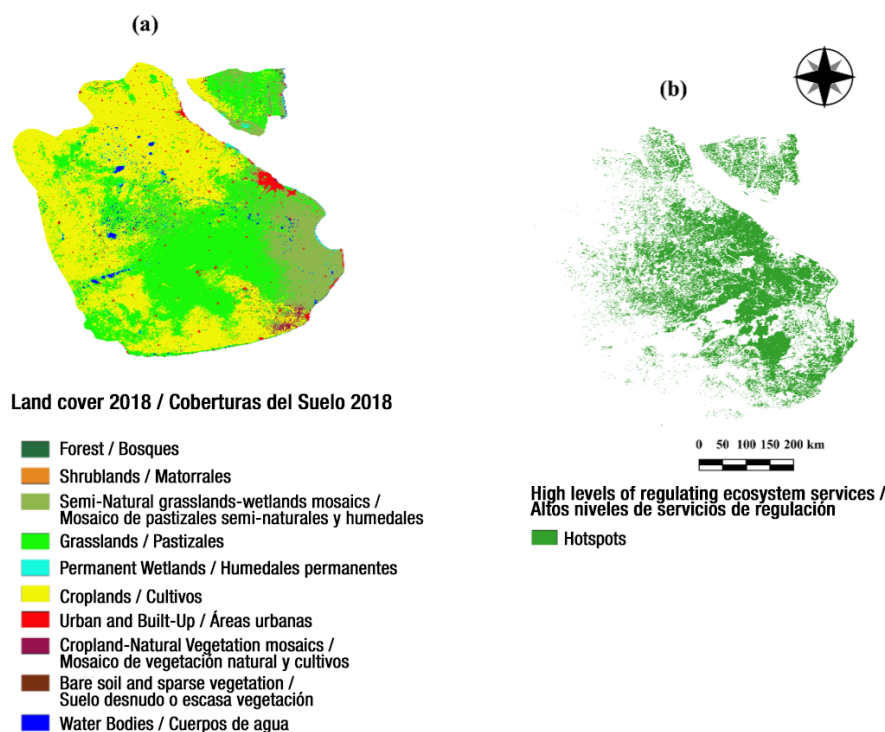


Figure 6. Land cover map for 2018 (a) and areas with high levels (hotspots) of supply of ecosystem services in the Pampas (b).

Figura 6. Mapa de coberturas del suelo para el año 2018 (a) y áreas con niveles altos (*hotspots*) de provisión de servicios ecosistémicos en la región pampeana (b).

It is possible that, in the northern sector, the hotspots are associated with the implantation of double annual crops, a practice that increased considerably at the end of the 1990s with the approval of glyphosate-resistant genetically modified soybean cultivation (Baeza & Paruelo, 2020). Unlike a single annual crop, the winter and summer crop sequences maintain a photosynthetically active plant cover for a longer period. This is reflected in the increase of the evapotranspiration process (Nosetto et al., 2015), which represents more than 80 % of the hydrological balance and is the main control of water outflow in these plain systems (Pinilla et al., 2019), thus increasing the flood control capacity. Evapotranspiration consists of two components: direct evaporation from the surface and transpiration by vegetation. The latter is coupled to carbon fixation by sharing the ecophysiological mechanism of gas exchange regulated by the stomatal opening of plants, so it is expected that this double cropping system will increase carbon sequestration, one of the processes involved in climate control. In this sense, Lara et al. (2018) demonstrated that, in the Argentina Pampas, both in natural and transformed (in this case agricultural) systems, the length of the growing season is closely related to annual carbon gains or sequestration.

On the other hand, in the southern sector of the Pampas, a process similar to that described above, although more recent, would explain the association between high levels in both control ES and the presence of crops. This sector, traditionally an agricultural area of winter crops, has experienced a significant change in the annual double cropping system. This process is based on the replacement of wheat by barley as a winter crop and soybean as a successor crop, since the former has an early harvest resulting in lower yield losses of the following summer crop, particularly soybean (Forján & Manso, 2012). Between 2000-2014, in three emblematic departments of the southern sector, a marked decrease in wheat area (from 560 950 ha to 219 880 ha) and an increase in barley (from 41 500 ha to 147 400 ha) were observed, combined with a significant increase in soybean (from 51 500 ha to 437 300 ha), which was reflected in an increasing trend in carbon gains (Lara et al., 2020).

Land cover and land use changes in the Pampas (2001-2018)

The main process of land use change in the period 2001-2018 is related to the replacement of natural grasslands. From the total area of change, 77 % is crop area, while 20 % is related to areas of semi-natural grasslands and wetlands (Figure 7). The main source of change in this region is directly related to the process of agriculturization, which coincides with other studies (Baeza & Paruelo, 2020; Lara et al., 2018, 2020). It is

cambios en el índice de productividad de suelos a una escala regional amplia. Aunque esta función es la de menor relevancia, con factores de ponderación inferiores a las demás, es probable que los niveles de provisión del SE de regulación de inundaciones y de regulación climática hayan sido levemente sobrestimados, al considerar la fertilidad de suelos como constante durante el periodo analizado.

A través del análisis espacial mediante análisis de correspondencia de las áreas de cambios en los niveles de provisión de los SE de regulación con los principales patrones de cambio de coberturas, se determinó que las pérdidas de esos servicios estuvieron asociadas positivamente a áreas de conversión de pastizales naturales a cultivos anuales. Las áreas que no mostraron cambios en los niveles de provisión de SE se asociaron positivamente a áreas sin cambios de coberturas entre periodos. Además, las zonas que presentaron aumentos en los niveles de regulación de inundaciones y regulación climática estuvieron asociados, principalmente, a áreas de transición de pastizales naturales a la categoría de mosaico de pastizales seminaturales y humedales y, en menor medida, a áreas sin cambios de coberturas (Figura 5).

A partir de los mapas finales (2018) de regulación de inundaciones (Figuras 3b) y regulación climática (Figura 4b) fue posible obtener las áreas con niveles altos de provisión, denominadas *hotspots* (Figura 6). Si bien gran parte de estas áreas están asociadas estrechamente a zonas de pastizales naturales y del mosaico de pastizales seminaturales y humedales, también están asociadas a áreas de cultivos, principalmente en el sector norte de la región y, en menor medida, en el sur de la región pampeana.

Posiblemente, en el sector norte, los hotspots estén asociados a la implantación de dobles cultivos anuales, una práctica que aumentó considerablemente a fines de la década de 1990 con la aprobación del cultivo de soja genéticamente modificada resistente al glifosato (Baeza & Paruelo, 2020). A diferencia de un único cultivo anual, la secuencia cultivo de invierno y de verano mantiene una cobertura vegetal fotosintéticamente activa durante un mayor periodo. Esto se ve reflejado en el aumento del proceso de evapotranspiración (Nosetto et al., 2015), el cual representa más de 80 % del balance hidrológico y es el principal control de la salida del agua en estos sistemas de llanura (Pinilla et al., 2019), incrementando así la capacidad de regulación de inundaciones. La evapotranspiración consta de dos componentes: la evaporación directa desde la superficie y la transpiración realizada por la vegetación. Esta última se encuentra acoplada a la fijación de carbono al compartir el mecanismo ecofisiológico de intercambio de gases regulado por la apertura estomática de las plantas, por lo que es esperable que este sistema de doble cultivo incremente la captura de carbono, uno

even a process that predates the study period (Mateucci, 2012), but which continues to further deepen.

On the other hand, the change of cover from natural grasslands to semi-natural grasslands and wetlands is located in the central-eastern sector of the Pampas, a sector that has severe limitations for crop development. In this sense, the change is probably related to the intensification of livestock activity previously analyzed in the region (Gandini et al., 2019; Lara & Gandini, 2014). Despite the loss of natural grasslands to another type of grassland, at the scale analyzed in this study, this change involved no decreases in the provision levels of regulating ES.

Unlike replacement by crops, the change in structure is minor, so it is likely that at the regional scale this type of modification does not have such a widespread negative impact. However, more detailed studies, with a more detailed analysis of a broad set of ecosystem functions, are needed to provide greater certainty about their impacts on local and regional biodiversity.

On a global scale, grasslands are one of the most transformed biomes, either replaced by crops or modified by livestock activity (Sirimarco et al., 2018). Land use change has proven to be the main driving force with the greatest negative impact on terrestrial ecosystems (IPBES, 2019), such that having spatially explicit information on the relationship between land use patterns, functions and ES is fundamental for decision making to delineate strategies on land planning. For the Argentina Pampas, the close relationship found between the decrease in the levels of regulating ES and the replacement of natural grasslands by crops should become a focus of attention to avoid trade-offs between agricultural

de los procesos que intervienen en la regulación climática. En este sentido, Lara et al. (2018) demostraron que, en la región pampeana, tanto en los sistemas naturales como transformados (en este caso agrícolas), la duración de la estación de crecimiento está estrechamente relacionada con las ganancias o captura anual de carbono.

Por otro lado, en el sector sur de la región pampeana, un proceso similar a lo anteriormente descrito, aunque más reciente, explicaría la asociación entre niveles altos en ambos SE de regulación y la presencia de cultivos. Este sector, tradicionalmente un área agrícola de cultivos de invierno ha experimentado un cambio significativo del sistema de doble cultivo anual. Dicho proceso se fundamenta en el reemplazo del trigo por la cebada como cultivo invernal y la soja como cultivo sucesor, ya que la primera posee una cosecha anticipada permitiendo pérdidas menores de rendimiento del cultivo de verano siguiente, particularmente la soja (Forján & Manso, 2012). Durante el periodo 2000-2014, en tres departamentos emblemáticos del sector sur, se observó decrecimiento marcado de la superficie de trigo (de 560 950 ha a 219 880 ha) e incremento de cebada (de 41 500 ha a 147 400 ha), junto con aumento significativo del cultivo de soja (de 51 500 ha a 437 300 ha), lo que se reflejó en una tendencia creciente de las ganancias de carbono (Lara et al., 2020).

Cambios de coberturas y usos del suelo en la región pampeana (2001-2018)

El principal proceso de cambio en el uso del suelo en el periodo 2001-2018 está relacionado con el reemplazo de pastizales naturales. De la totalidad de área de cambio, 77 % es área de cultivos, mientras que 20 % está relacionado con áreas de pastizales seminaturales y

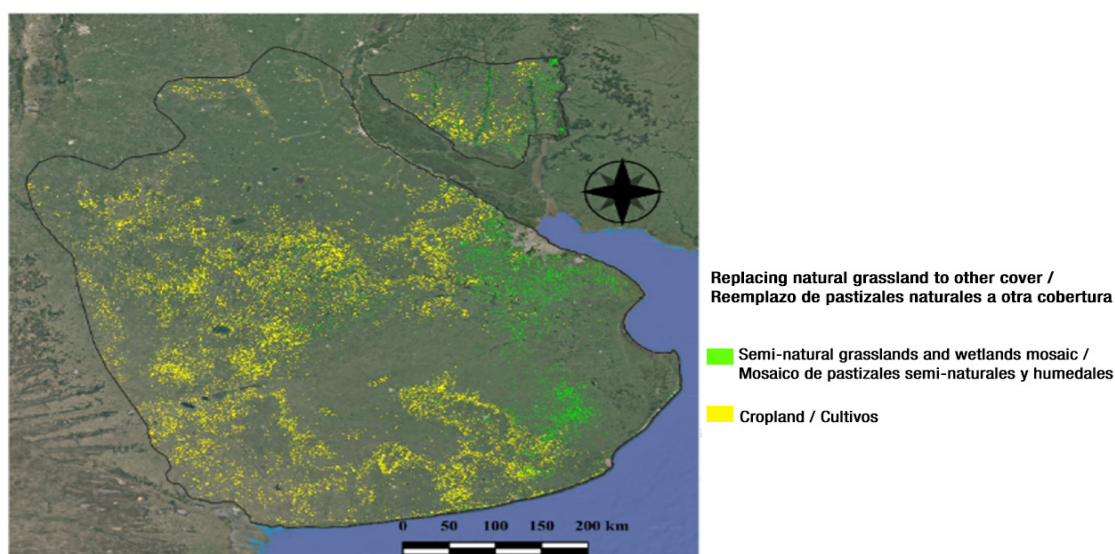


Figure 7. Replacing natural grassland areas in the Argentina Pampas in the period 2001-2018.

Figura 7. Reemplazo de áreas de pastizales naturales en la región pampeana en el periodo 2001-2018.

expansion and the system that supports this type of productive activities within the framework of sustainable development. One of the advantages of the methodology developed in this study is the possibility of incorporating frequent updates of land cover and land use maps for monitoring functions and ES. In this sense, the use of time series images, coming from different sensors in a cloud geospatial analysis platform environment (Gorelick et al., 2017), could allow a more detailed and differentiated description of crops in the region (Guevara-Ochoa et al., 2018).

Conclusions

The combination of land cover and land use maps with biophysical models allowed the spatially explicit analysis of several ecosystem functions and two key regulating ecosystem services in the Argentina Pampas, evaluating their spatio-temporal changes and their relationship with the development of productive activities. At the regional scale, flood and climate regulation services decreased 6.78 % and 6.80 %, respectively, in the period 2001-2018. The spatial patterns of decrease in the levels of provision of these services were associated with the replacement of natural grasslands by crops, a process of agriculturization that has grown significantly in the last 25 years. It is important to note that the areas with increases in the levels of service provision were associated with transitions related to livestock farming, an issue that should be further studied.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) and the UNCPBA (accredited project 03/A237) for supporting this research.

End of English version

References / Referencias

- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., Alberdi-Algañaraz, E. D., Bohn, V., & Piccolo, M. C. (2016). Distribución y variabilidad de la precipitación en la región pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 261–280. <https://doi.org/10.18172/cig.2867>
- Arrieta, E. M., Cuchietti, A., Cabrol, D., & González, A. D. (2018). Greenhouse gas emissions and energy efficiencies for soybeans and maize cultivated in different agronomic zones: a case study of Argentina. *Science of the Total Environment*, 625,199–208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.286>
- humedales (Figura 7). Es notorio que el principal motor de cambio en la región está directamente relacionado al proceso de agriculturización, lo cual coincide con otros trabajos (Baeza & Paruelo, 2020; Lara et al., 2018, 2020). Incluso es un proceso anterior al periodo de estudio (Mateucci, 2012), pero que continúa profundizándose.
- Por otro lado, el cambio de cobertura de pastizales naturales a pastizales seminaturales y humedales está situado en el sector centro-este de la región pampeana, un sector que presenta limitaciones severas para el desarrollo de cultivos. En este sentido, el cambio probablemente está relacionado con la intensificación de la actividad ganadera previamente analizado en la región (Gandini et al., 2019; Lara & Gandini, 2014). A pesar de la pérdida de pastizales naturales por otro tipo de pastizal, a la escala analizada en este trabajo, dicho cambio no implicó disminuciones en los niveles de provisión de los SE de regulación.
- A diferencia del reemplazo por cultivos, el cambio de estructura es menor, por lo que es probable que a escala regional este tipo de modificaciones no tengan impacto negativo tan generalizado. No obstante, estudios de mayor detalle, y con un análisis más puntual sobre un conjunto amplio de funciones ecosistémicas, son necesarios para dar mayor certidumbre sobre todo sus impactos en la biodiversidad local y regional.
- A escala global, los pastizales son uno de los biomas más transformados, ya sea reemplazados por cultivos o modificados por la actividad ganadera (Sirimarco et al., 2018). El cambio de uso del suelo ha demostrado ser la principal fuerza directriz con mayor impacto negativo sobre los ecosistemas terrestres (IPBES, 2019), de tal manera que contar con información espacialmente explícita sobre la relación entre patrones de usos del suelo, funciones y SE es fundamental para la toma de decisiones que permitan delinear estrategias sobre la planificación del territorio. Para la región pampeana, la estrecha relación encontrada entre la disminución de los niveles de SE de regulación y el reemplazo de pastizales naturales por cultivos debiera convertirse en un foco de atención para evitar las compensaciones entre la expansión agrícola y el sistema que soporta este tipo de actividades productivas en el marco de un desarrollo sustentable. Una de las ventajas de la metodología desarrollada en este trabajo es la posibilidad de incorporar actualizaciones frecuentes de mapas de coberturas y usos del suelo para el monitoreo de funciones y SE. En este sentido, la utilización de series temporales de imágenes, provenientes de distintos sensores en un entorno de plataforma de análisis geoespacial en la nube (Gorelick et al., 2017), podría permitir la descripción más detallada y diferenciada de los cultivos de la región (Guevara-Ochoa et al., 2018).

- 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>
- Balvanera, P., Uriarte, M., Almeida-Leñero, L., Altesor, A., DeClerck, F., Gardner, T., Hall, J., Lara, A., Litter, P., Peña-Claros, M., Silva Matos, D. M., Vogl, A. L., Romero-Duque, L. P., Arreola, L. F., Caro-Borrero, A. P., Gallego, F., Jain, M., Little, C., ... Vallejos, M. (2012). *Ecosystem services research in Latin America: the state of the art. Ecosystem Services*, 2, 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.09.006>
- Bennett, E. M., Cramer, W., Begossi, A., Cundill, G., Díaz, S., Egoh, B. N., Geijzendorffer, I. R., Krug, C. B., Lavorel, S., Lazos, E., Lebel, L., Martín-López, B., Meyfroidt, P., Mooney, H. A., Nel, J. L., Pascual, U., Payet, K., Pérez Harguindeguy, N., Peterson, G. D., ... Woodward, G. (2015). Linking biodiversity, ecosystem services, and human well-being: three challenges for designing research for sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.03.007>
- Bert, F., de Estrada, M., Naumann, G., Negri, R., Podestá, G., Skansi, M., Spennemann, P., & Quesada, M. (2021). *The 2017-18 drought in the Argentine Pampas - impacts on agriculture*. https://www.preventionweb.net/files/78456_cs1.14laplataargentinafinal20210215.pdf
- Carreño, L., Frank, F. C., & Viglizzo, E. F. (2012). Tradeoffs between economic and ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.019>
- Celleri, C., Zapperi, G., González Trilla, G., & Pratolongo, P. (2018). Spatial and temporal patterns of rainfall variability and its relationship with land surface phenology in central east Argentina. *International Journal of Climatology*, 38(10), 3963–3975. <https://doi.org/10.1002/joc.5547>
- Cruzate, G. A., & Casas, R. (2016). Balance de nutrientes en los suelos agrícolas de la Argentina en la campaña 2015/16. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 28, 14–23. [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/3C5A42102BE9AAAF58525821E005CBD64/\\$FILE/Art%203.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/3C5A42102BE9AAAF58525821E005CBD64/$FILE/Art%203.pdf)
- ECOSER. (2022). *ECO-SER: Protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial*. www.eco-ser.com.ar
- Fisher, B., Turner, R., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
- Forján, H., & Manso, L. (2012). La secuencia de cultivos. In H. Forján, & L. Manso (Eds.), *Rotaciones y secuencias de cultivos en la región mixta cerealera del centro-sur bonaerense: 30 años de experiencias* (pp. 25–34). Ediciones INTA.
- Gandini, M., Lara, B., Moreno, L., Cañibano, A., & Gandini, P. (2019). Trends in fragmentation and connectivity

Conclusiones

La combinación de mapas de coberturas y usos del suelo con modelos biofísicos permitió el análisis espacialmente explícito de diversas funciones ecosistémicas y dos servicios ecosistémicos de regulación clave en la región pampeana, evaluando sus cambios espacio-temporales y su relación con el desarrollo de las actividades productivas. A escala regional, los servicios de regulación de inundaciones y regulación climática disminuyeron 6.78 % y 6.80 %, respectivamente, en el periodo 2001-2018. Los patrones espaciales de disminución en los niveles de provisión de esos servicios estuvieron asociados al reemplazo de pastizales naturales por cultivos, proceso de agriculturización que en los últimos 25 años ha crecido significativamente. Cabe destacar que las áreas con aumentos en los niveles de provisión de servicios estuvieron asociadas a transiciones relacionadas con la ganadería, cuestión que debería ser profundizada con estudios más detallados.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la UNCPBA (proyecto acreditado 03/A237) por brindar el soporte de este trabajo.

Fin de la versión en español

- of *Paspalum quadrifarium* grasslands in the Buenos Aires province, Argentina. *PeerJ*, 7, e6450. <https://doi.org/10.7717/peerj.6450>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guevara-Ochoa, C., Lara, B., Vives, L., Zimmermann, E., & Gandini, M. (2018). Una metodología para la caracterización del uso del suelo mediante imágenes de media resolución espacial. *Revista Chapingo Series Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(2), 207–218. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.10.061>
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. In Raffaelli, D., & Frid, C. (Eds.), *Ecosystem ecology: A new synthesis* (Ch. 7). BES Ecological Reviews Series-CUP Cambridge.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (1990). *Atlas de suelos de la República Argentina*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Working group I contribution of the fifth assessment report*.

- Climate change 2013: the physical science basis*. Cambridge University Press. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the IPBES*. https://www.ipbes.net/system/tdf/spm_global_unedited_advance.pdf?file=1&type=node&id=35245
- 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. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 14, 63–180. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/306>
- Lara, B., Gandini, M., Gantes, P., & Matteucci, S. (2018). Regional patterns of ecosystem functional diversity in the Argentina Pampas using MODIS time-series. *Ecological Informatics*, 43, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.11.004>
- Lara, B., Gandini, M., Gantes, P., & Matteucci, S. (2020). Trends and land surface phenological responses to climate variability in the Argentina Pampas. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46(2), 581–602. <https://doi.org/10.18172/cig.4310>
- Lara, B., Gandini, M., Matteucci, S., & Scaramuzzino, R. (2019). Cambios en el funcionamiento de los ecosistemas de la región pampeana en los últimos 20 años: indicios del impacto del cambio global. *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes*, 9(1), 81–84. https://d1e074e619.clvaw-cdnwnd.com/3cfd20b93af41ab30f4d34afad6c23cb/200000100-03c7e03c81/20_Lara_CAEP_cambios%20%281%29.pdf?ph=d1e074e619
- Mastrangelo, M. E., Weyland, F., Herrera, L., Villarino, S., Barral, M. P., & Auer, A. (2015). Ecosystem services research in contrasting socio-ecological contexts of Argentina: critical assessment and future directions. *Ecosystem Services*, 16, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.10.001>
- Matteucci, S. (2012). Ecorregión Pampa. In J. Morello, S. Matteucci, A. Rodríguez, & M. Silva (Eds.), *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos* (pp. 391–446). Orientación Gráfica Editora. https://www.researchgate.net/profile/Silvia-Matteucci-2/publication/268447092_Ecorregiones_y_complejos_ecosistemicos_Argentinos/links/598333be0f7e9b2ac353f62e/Ecorregiones-y-complejos-ecosistemicos-Argentinos.pdf
- Nelson, E. J., & Daily, G. C. (2010). Modelling ecosystem services in terrestrial systems. *F1000 Biology Reports*, 2(53). <https://doi.org/10.3410/B2-53>
- Nosetto, M. D., Paez, R., Ballesteros, S., & Jobbágy, E. (2015). Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.009>
- Paruelo, J. M., Texeira, M., Staiano, L., Mastrángelo, M., Amdan, L., & Gallego, F. (2016). An integrative index of ecosystem services provision based on remotely sensed data. *Ecological Indicators*, 71, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.054>
- Pinilla, A., Guevara, C., Lara, B., & Kruse, E. (2019). Impactos de los cambios de uso del suelo sobre la recarga subterránea en una zona de llanura. Caso de estudio, cuenca superior del arroyo Del Azul. *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes*, 9(1), 40–44. https://d1e074e619.clvaw-cdnwnd.com/3cfd20b93af41ab30f4d34afad6c23cb/200000091-59ed959edb/10_Pinilla_CAEP_azul%20%281%29.pdf?ph=d1e074e619
- Schipanski, M. E., & Bennet, E. M. (2012). The influence of agricultural trade and livestock production on the global phosphorus cycle. *Ecosystems*, 15, 256–268. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9507-x>
- Sirimarco, X., Barral, M. P., Villarino, S., & Litterra, P. (2018). Water regulation by grasslands: a global meta-analysis. *Ecohydrology*, 11(4), e1934. <https://doi.org/10.1002/eco.1934>
- Villa, F., Bagstad, K. J., Voigt, B., Johnson, G. W., Portela, R., Honzak, M., & Batker, D. (2014). A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment. *PLoS ONE*, 9(3), e91001. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091001>
- Volante, J., Alcaraz-Segura, D., Mosciaro, M. J., Viglizzo, E. F., & Paruelo, J. M. (2012). Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.012>
- Weyland, F., Mastrangelo, M., Auer, A., Barral, M. P., Nahuelhual, L., Larrazábal, A., Parera, A., Berrouet Cadavid, L. M., López-Gómez, C. P., & Villegas Palacio, C. (2019). Ecosystem services approach in Latin America: from theoretical promises to real applications. *Ecosystem Services*, 35, 280–293. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.11.010>
- Weyland, F., Barral, M. P., & Litterra, P. (2017). Assessing the relationship between ecosystem functions and services: importance of local ecological conditions. *Ecological Indicators*, 81, 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.062>