



Analizando trayectorias de uso del suelo. Una propuesta de clusterización

Analyzing land use trajectories. A clusterization proposal

Germán Rosati

german.rosati@gmail.com

Escuela Interdisciplinaria de Altos Estudios Sociales (UNSAM-CONICET), Universidad Nacional de San Martín / Programa de Investigaciones sobre el Movimiento de la Sociedad Argentina, Argentina

Recepción: 16 Noviembre 2022

Aprobación: 31 Marzo 2023

Publicación: 02 Mayo 2023

Cita sugerida: Rosati, G. (2023). Analizando trayectorias de uso del suelo. Una propuesta de clusterización. *Geograficando*, 19(1), e130. <https://doi.org/10.24215/2346898Xe130>

Resumen: El trabajo presenta una alternativa metodológica para analizar trayectorias de uso de suelo. Toma como caso de estudio y prototipo un análisis de los cambios en el uso del suelo a un nivel general de Argentina (región pampeana, NEA, NOA y Cuyo). El objetivo es obtener un mapa con la mayor resolución posible que permita detectar las siguientes situaciones: 1) zonas recientes de expansión de frontera agraria; 2) zonas de agricultura “consolidada” y 3) zonas recientes de expansión de urbanización. Este trabajo se centra especialmente en el desarrollo de la metodología aplicada y en un primer intento de validación de la misma. A partir de datos de la Agencia Espacial Europea (ESA) vinculados a la “Climate Change Initiative-Land” (ESA-CCI-LC) del período 1992-2020 se genera una clusterización de trayectorias de uso del suelo mediante distancias de edición (utilizadas para el análisis de secuencias). Se obtuvieron 29 tipos de trayectorias a nivel píxel validadas por análisis visuales, con performance aceptable para la detección de diferentes trayectorias.

Palabras clave: Uso del suelo, Cambio de cobertura, Frontera agraria, Análisis de secuencias.

Abstract: This paper presents a methodological alternative to analyze land use trajectories. It takes as a case study and prototype an analysis of changes in land use at a general level in Argentina (the Pampas region, the Northwest, the Northeast, and Cuyo, excluding the Patagonia). The objective is to obtain a map with the highest possible resolution that allows to detect the following situations: 1) areas of recent agrarian frontier expansion; 2) areas of “consolidated” agriculture, and 3) areas of recent urban expansion. This paper focuses especially on the development of the applied methodology and a first attempt to validate it. Based on data from the European Space Agency (ESA) linked to the “Climate Change Initiative-Land” (ESA-CCI-LC) for the 1992-2020 period, a clustering of land use trajectories from distances is generated by means of editing distances (used for sequence analysis). There were 29 types of pixel-level trajectories obtained, validated by visual analysis, with an acceptable performance for detection of different trajectories.

Keywords: Land use, Cover change, Agrarian frontier, Sequence analysis.



INTRODUCCIÓN

La humanidad atraviesa por períodos de cambios demográficos. Según datos del Banco Mundial casi un 57% de la población vive en zonas urbanas. De forma concomitante se producen cambios en el uso del suelo y en la expansión de la frontera agraria: las tierras dedicadas a la agricultura expresaron un crecimiento neto a nivel mundial de alrededor de 1.000.000 de km². En Sudamérica, se observa un fuerte incremento de la superficie con uso agrícola y un decrecimiento de bosques y selvas (Radwan, Blackburn, Whyatty Atkinson, 2021).

Si bien parece haberse avanzado sobre la generación de información acerca de este tipo de expansión de frontera (medición, detección y mapeo de zonas deforestadas) no parece tan cierto que exista un entendimiento de igual magnitud acerca de la forma en que se producen dichas expansiones. Se han identificado algunas dimensiones relevantes para el estudio de las fronteras (Baumann, Gasparri, Buchadas, Oeser, Meyfroidt, Levers, Romero-Muñoz, le Polain de Waroux, Müller y Kuemmerle, 2022). En primer lugar, su temporalidad: existen fronteras nuevas, otras de larga data y existen zonas afectadas por la expansión de fronteras pero que, actualmente, se encuentran inactivas. En segundo lugar, los sujetos motorizadores de la expansión difieren. Mientras que las fronteras “de recursos” (*resource-frontier*) fueron impulsadas por pequeños productores con efectos atractores de población; la literatura actual (le Polain de Waroux, Baumann, Gasparri, Gavier-Pizarro, Godar, Kuemmerle, Müller, Vázquez, Volante y Meyfroidt, 2018; Kröger y Nygren, 2020), plantea que las nuevas fronteras (“de commodities”) son empujadas por empresas grandes e incorporadas al mercado mundial. Las mismas no parecen mostrar una relación tan clara entre expansión y atracción de población (Rosati, 2022). Finalmente, cada zona presenta dinámicas diferenciadas de avance: algunas fronteras avanzan de forma explosiva. Algunas áreas fronterizas presentan patrones de crecimiento relativamente constante en áreas cercanas o circundantes, mientras que otras aparecen caracterizadas por una expansión a saltos, conformando “mosaicos” de frontera (Kröger y Nygren, 2020).

Son necesarias herramientas adecuadas para abordar estos procesos y sus dimensiones. Los análisis de cambios en el uso del suelo mediante imágenes satelitales y sus productos derivados constituyen un instrumental sumamente útil en ese sentido. Como plantean Maciel, Camara, Vinhas, Picoli, Begotti y de Assis (2019) la apertura por parte de grandes agencias gubernamentales (como la NASA o la ESA) de bases de datos derivadas del procesamiento de imágenes satelitales ha generado el desarrollo de nuevos métodos de análisis. A partir de diferentes métodos de clasificación basados en diferentes técnicas de teledetección, es posible clasificar cada píxel de una imagen satelital en función de una categoría de uso del suelo: bosques, uso agrícola, arbustales, etc. Si se incorporan al análisis los cambios que atraviesa cada píxel durante una ventana temporal dada, puede hablarse de trayectorias en el uso del suelo (*land use trajectories*). Dichas trayectorias pueden ser definidas como la sucesión de estados a lo largo del tiempo (general, aunque no exclusivamente, a intervalos anuales) de las diferentes clases de cobertura del suelo (Verburg, van Berkel, van Doorn, van Eupen y van den Heiligenberg, 2010).

Un problema que surge es la necesidad de agrupar de forma eficiente las diferentes combinaciones posibles de estados, las trayectorias mismas. En este sentido, el problema de la eficiencia y la escalabilidad no es trivial en tanto, 1) el largo de las trayectorias crece en función de la cantidad de clases de cobertura y de la cantidad de observaciones que se realicen y 2) la cantidad de píxeles a analizar es función de la resolución de la imagen y del área a analizar.

Si bien un procedimiento común es agrupar las diferentes trayectorias a un nivel mayor de desagregación, en este trabajo se explora otro camino: generar clusters de las trayectorias mismas a nivel píxel y presentar una alternativa metodológica para analizarlas. Forma parte de una investigación más general,¹ que se propone, entre otras cosas, mapear el proceso de deforestación, extender su análisis más allá del Chaco Seco y vincularlo a otras dinámicas (estructuras agrarias, otras problemáticas ambientales, etc.). Pese al amplio consenso existente sobre los impactos ambientales de esta expansión (Viglizzo y Jobbágy, 2010), se observa una escasez de información sobre los procesos de deforestación. Existen pocas fuentes estadísticas oficiales actualizadas y

con un nivel de desagregación adecuado. Esto ha hecho necesario el análisis de información proveniente de imágenes satelitales (Vallejos, Volante, Mosciaro, Vale, Bustamante y Paruelo, 2015).

Para esto se presenta como caso de estudio y prototipo un análisis de los cambios en el uso del suelo a nivel total de Argentina (con exclusión de las provincias patagónicas). El objetivo principal es generar un mapa con la mayor resolución posible que permita detectar en la mayor parte del territorio argentino las siguientes situaciones: 1) zonas de recientes expansión de frontera agraria; 2) zonas de agricultura “consolidada” y 3) zonas recientes de expansión urbana. El interés de este trabajo se centra en la exposición de la metodología aplicada y un primer intento de validación.

¿CÓMO SE ANALIZAN HABITUALMENTE LAS TRAYECTORIAS DE USO DEL SUELO?

Una serie de tiempo basada en imágenes satelitales consiste en diferentes medidas a intervalos regulares de tiempo de un píxel. Cada píxel tiene asociada una coordenada geográfica. En este caso, la medición consiste en la clase de cobertura (bosque, pastura, arbustal, agricultura, etc.) en cada uno de los píxeles a lo largo del tiempo. El problema a resolver, entonces, es extraer información de esas secuencias.

Buena parte de las aproximaciones que utilizan trayectorias tienen como objetivo generar las clasificaciones de uso del suelo a partir de la información radiométrica o a partir de indicadores derivados. Así, por ejemplo, Maus, Camara, Cartaxo, Sanchez, Ramos y de Queiroz (2016) y Chaves, Alves, Sáfyadi, de Oliveira, Picoli, Simoes y Mataveli (2021) usan técnicas de Time-Weighted Dynamic Time Warping para clasificar diferentes usos de suelo y de coberturas a partir de imágenes satelitales (MODIS) de mediana resolución.

Un primer método es llevar dichas trayectorias a unidades más grandes. Así, se calculan distribuciones de frecuencias para esas unidades (por ejemplo, municipios) y se seleccionan las trayectorias más frecuentes para cada una (Mena, 2008). Una estrategia similar es vectorizar áreas con el mismo uso del suelo en cada año (Mendonça-Santos y Claramunt, 2001). Ahora bien, sería necesario realizar una vectorización diferente en cada período. Dado que “los cambios en el uso del suelo son procesos dinámicos no hay garantía de que exista coherencia espacial entre los objetos [polígonos] en diferentes años” (Maciel et al. 2019, trad. propia).

En este trabajo, se intentará construir tipos de trayectorias a nivel píxel, es decir, tratando de mantener la unidad de captura original de los datos. En esta línea, Maciel et al. (2019) generaron una gramática que cubre tres operadores para describir y cuantificar situaciones de combinaciones típicas: conversión, recurrencia y evolución. Estos operadores y sus diversas combinaciones les permiten analizar procesos de cambio de corto y largo plazo. Si bien constituye una gramática sumamente útil para construir tipos de trayectorias, no evita la necesidad de construir una tipología y definir los criterios de búsqueda de forma manual. A su vez, los tiempos de procesamiento parecen bastante elevados. Baumann et al. (2022) realizan un trabajo similar definiendo seis clases de transición (bosque a pastura, bosque a agricultura, bosque a otras vegetaciones, otras vegetaciones a pasturas, otras vegetaciones a agricultura y pasturas a agricultura). Todas estas transiciones son definidas mediante reglas determinísticas para cada píxel.

DATOS Y FLUJO DE TRABAJO

Se utilizaron los datos de la Agencia Espacial Europea (ESA) producidos en la “Climate Change Initiative-Land” (ESA-CCI-LC). Este dataset fue lanzado con una resolución de 300 x 300mts y una cobertura anual desde 1992 a 2020. Su uso permite mantener una alta resolución espacial de la información y analizar trayectorias de uso del suelo en un período amplio para toda Argentina. Se definieron 5 cortes temporales de 7 años de amplitud para el período.²

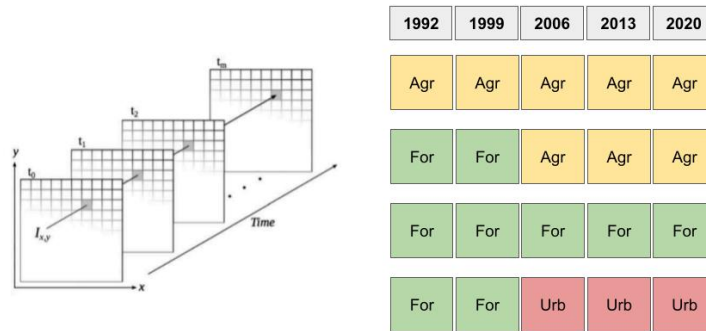
TABLA 1
Codificación y etiquetas originales ESA y agregadas

Etiqueta	Código final	Etiqueta
No Data	0	Sin datos
10 Cropland, rainfed 20 Cropland, irrigated or post-flooding 30 Mosaic cropland (>50%) / natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<50%) 40 Mosaic natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (>50%) / cropland (<50%)	1	Agricultura
50 Tree cover, broadleaved, evergreen, closed to open (>15%) 60 Tree cover, broadleaved, deciduous, closed to open (>15%) 70 Tree cover, needleleaved, evergreen, closed to open (>15%) 80 Tree cover, needleleaved, deciduous, closed to open (>15%) 90 Tree cover, mixed leaf type (broadleaved and needleleaved) 100 Mosaic tree and shrub (>50%) / herbaceous cover (<50%) 110 Mosaic herbaceous cover (>50%) / tree and shrub (<50%)	2	Forest
120 Shrubland	6	Shrubland
130 Grassland	3	Grassland
140 Lichens and mosses 150 Sparse vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<15%) 160 Tree cover, flooded, fresh or brakish water 170 Tree cover, flooded, saline water	7	Sparse vegetation
180 Shrub or herbaceous cover, flooded, fresh/saline/brakish water	4	Wetland
190 Urban areas	5	Urban
200 Bare areas	8	Bare area
210 Water bodies 220 Permanent snow and ice	9	Water

Fuente: elaboración propia en base a ESA-CCI-LC.

En función de la información sobre errores de clasificación y validación en la documentación producida por la ESA (2017), las 22 categorías originales fueron agrupadas en 10 (ver Tabla 1). Luego, se concatenaron los rasters en un solo archivo. Una vez completada la etapa de preprocesamiento (mediante el paquete xarray de Python), se obtuvo un archivo netCDF consistente en la concatenación de los cinco valores agregados de la clasificación de uso del suelo. El Esquema 1 muestra algunas trayectorias posibles. La primera corresponde a un píxel que mantuvo el mismo valor (agricultura) a lo largo de todo el período. La segunda muestra el reemplazo de bosque por agricultura entre 1999 y 2006. La tercera, en cambio, corresponde a un área estable de bosque. La cuarta finalmente muestra un proceso de urbanización.

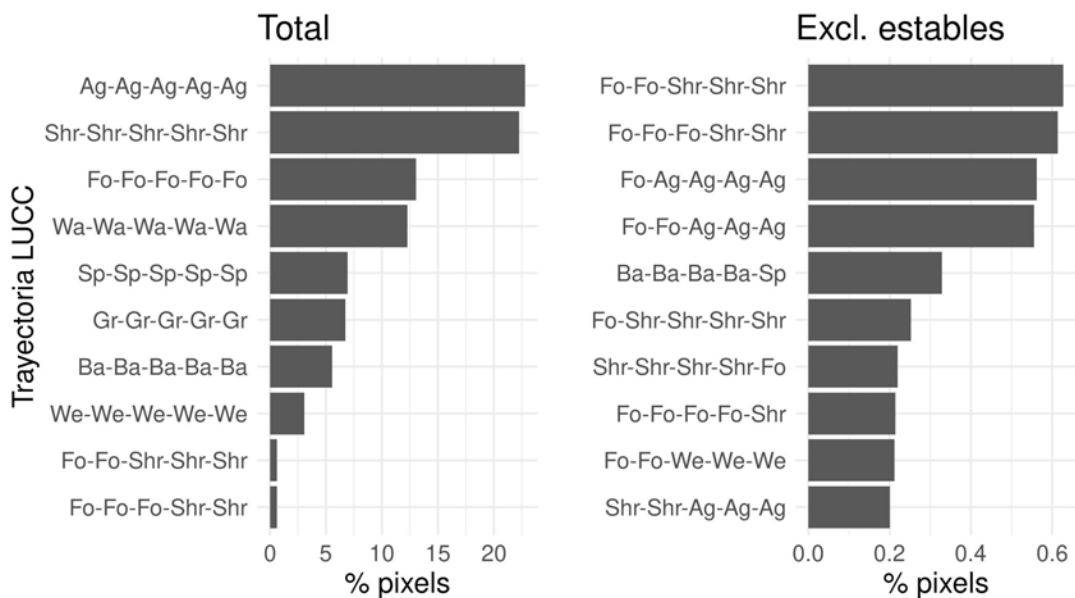
ESQUEMA 1 Ejemplos de trayectorias de uso del suelo a nivel pixel



Fuente: elaboración propia en base Maciel et al (2019) y a datos ESA-CCI-LC.

En el Gráfico 1, se presentan los tipos desagregados de trayectorias más importantes (en cantidad de píxeles). El panel de la izquierda muestra las 20 trayectorias más importantes sobre el total. Puede verse que las trayectorias “estables” (que no presentan cambios en todo el período) son las más frecuentes. Dentro de ellas, aquellas zonas con uso agrícola estable (Ag-Ag-Ag-Ag-Ag) concentran el 22% de los píxeles. A continuación, los arbustales (con el 20%) y luego, las zonas boscosas con el 13%. El panel de la derecha muestra la misma métrica pero excluyendo las trayectorias estables. Dentro de las trayectorias móviles se observa que las más relevantes son las vinculadas a transformaciones en las zonas boscosas: las que pasan de bosque a arbustal (Fo-Fo-Shr-Shr-Shr, Fo-Fo-Fo-Shr-Shr) y las que pasan de bosque a agricultura (Fo-Ag-Ag-Ag-Ag; Fo-Fo-Ag-Ag-Ag).

GRÁFICO 1
Cantidad de píxeles de las 20 trayectorias de uso del suelo más relevantes (total y excluyendo estables). Argentina, 1992-2020



Fuente: elaboración propia en base a datos ESA-CCI-LC.

Se obtuvieron unos 1200 tipos de trayectorias diferentes. Para poder interpretarlas era preciso agruparlas de alguna forma y reducir la cantidad de categorías. Para ello, se empleó un esquema de clustering. El insumo fundamental para cualquier procedimiento de clustering es una matriz de distancias. Es necesario definir alguna métrica que cuantifique cuán cerca (o lejos) están dos registros. En general, existen métricas válidas para variables cuantitativas (distancias euclidiana, de Manhattan, etc.) y para combinaciones de niveles de medición (Gower). ¿Pero qué ocurre si, como en este caso, se trata de muchas secuencias de estados a lo largo del tiempo? ¿Qué tan diferente es una trayectoria Bo-Bo-Agr-Agr-Agr de una Bo-Bo-Bo-Agr-Agr o de una Bo-Bo-Bo-Urb-Urb?

Las secuencias de estados como las anteriores son objetos complejos que proveen diferentes tipos de información: la duración de cada estado, la sucesión de los estados, el orden de los estados. Si se piensa en una secuencia de estados como si fuera una palabra se pueden considerar diferentes formas de medir la similitud entre palabras. En términos generales, puede plantearse que existen varias maneras de medir el grado de similaridad entre dos palabras o secuencias: se llaman “distancias de edición” y todas se basan en la cantidad de operaciones que es necesario realizar para transformar una en otra.³ De esta forma, es posible construir una matriz de disimilaridad que sirva como un insumo para construir clusters de trayectorias en el uso del suelo.

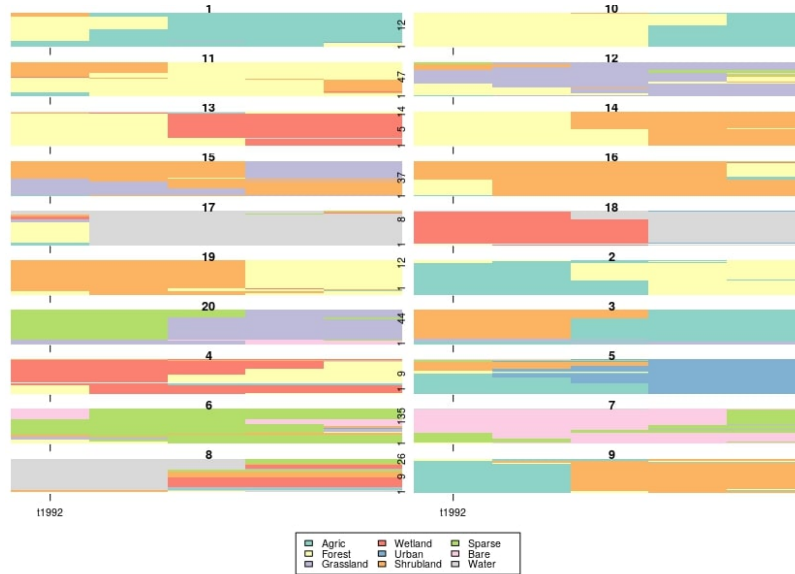
En esta aproximación se usa el método llamado OptimalMatching (OM): el mismo usa un algoritmo llamado Needleman-Wunsch⁴ para calcular la distancia entre dos secuencias. El método considera tres operaciones posibles: supresión, inserción y sustitución de un elemento. Se define un costo para la aplicación de cada operación a cada secuencia. Para cada par de secuencias se busca una combinación con el menor costo total que genere dos secuencias idénticas. En este trabajo, usamos una subclase del método de OM: la llamada LongestCommonSubsequence (o LCS). La misma corresponde al número de elementos en una secuencia que puede ser matcheada de forma única con los elementos que ocurren en el mismo orden en otra secuencia. LCS es equivalente a un OM con un costo constante de sustitución igual a 2. Se probaron otros métodos y los resultados son consistentes. El procesamiento y clusterización de las trayectorias se hizo mediante el paquete TraMineR en el lenguaje R.

RESULTADOS

El Gráfico 2 muestra el resultado del clustering para cada uno de los 1200 tipos de trayectoria de uso del suelo. Se definió una cantidad de clusters igual a 30 ($k=30$). Como puede verse existen algunos tipos de clusters que resultan muy relevantes en términos conceptuales. Así, el cluster 1 y el 10 representan una de las situaciones objetivo de este trabajo: zonas que comienzan siendo bosque o arbustales y terminan transformándose en zonas agrícolas. A su vez, los píxeles agrupados en el cluster 1 parecen hacer la transición antes del año 2006. El cluster 10 muestra transiciones hacia la agricultura más recientes.

El cluster 3 también puede estar expresando situaciones de expansión de la frontera agrícola: zonas que eran arbustales (shrublands) y se transformaron en zonas agrícolas. El cluster 14 muestra zonas que eran bosques y se transforman en arbustales. Una inspección manual de algunas zonas de este cluster permite ver que muchas se tratan de zonas de expansión de frontera. El cluster 5 concentra situaciones que, independientemente de su origen diverso (bosques, arbustales, agricultura, etc.), terminan en zonas urbanizadas.

GRÁFICO 2
Tipos de trayectorias de uso del suelo obtenidos

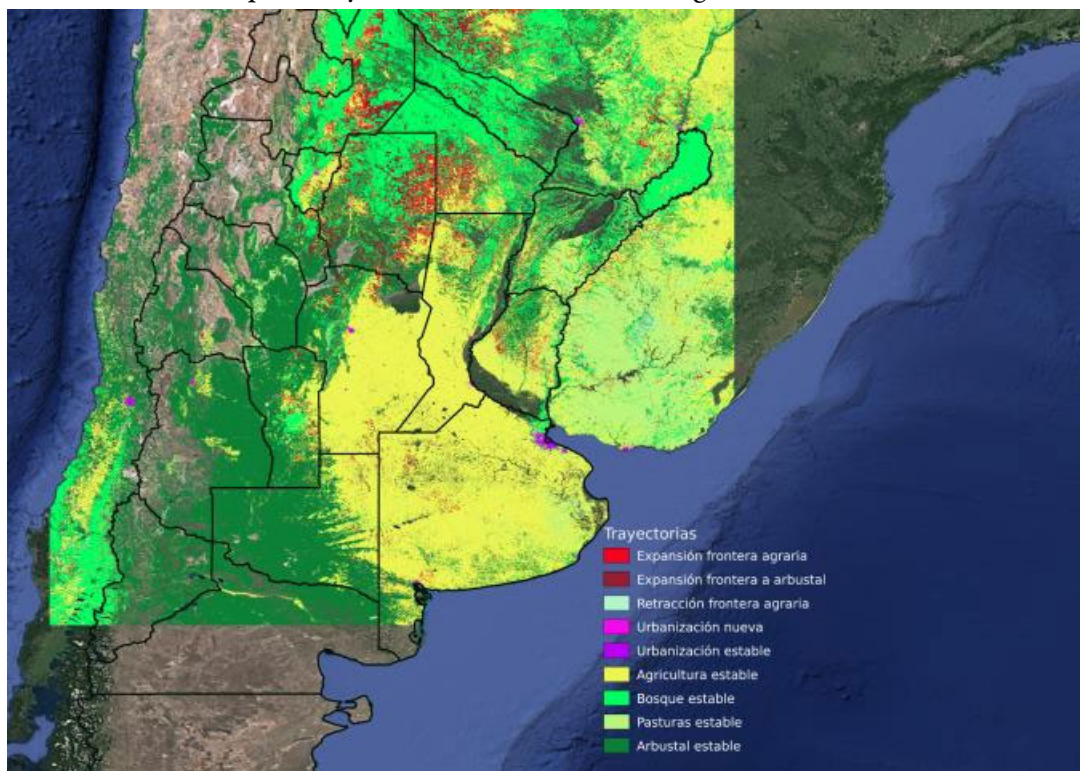


Fuente: elaboración propia en base a datos ESA-CCI-LC.

Estos tres tipos de trayectorias constituyen el objetivo central del presente artículo. No obstante, existen otros tipos relevantes. Los *clusters* 2 y 9 presentan una situación que podría ser asimilable a procesos de retracción de la frontera agraria. Son zonas que pasan de ser agrícolas a zonas que presentan bosques o arbustales. Otro indicador indirecto de la expansión de la frontera, en este caso ganadera, puede ser el cluster20 (transición de zonas de arbustos a praderas -*grasslands*-). Estas áreas podrían estar vinculadas a la constitución de zonas de pastura para los animales.

El Mapa 1 muestra que las zonas de agricultura estable (en amarillo) abarcan la pampa húmeda, parte de la provincia de Córdoba, el sur de Santa Fe, parte del este y sur de Santiago del Estero, el sur, centro y oeste de Chaco y el sudoeste y centro de Tucumán, por ejemplo. A su vez, pueden notarse en rojo las zonas de expansión de frontera agraria.

MAPA 1
Principales trayectorias de uso del suelo, Argentina 1992-2020



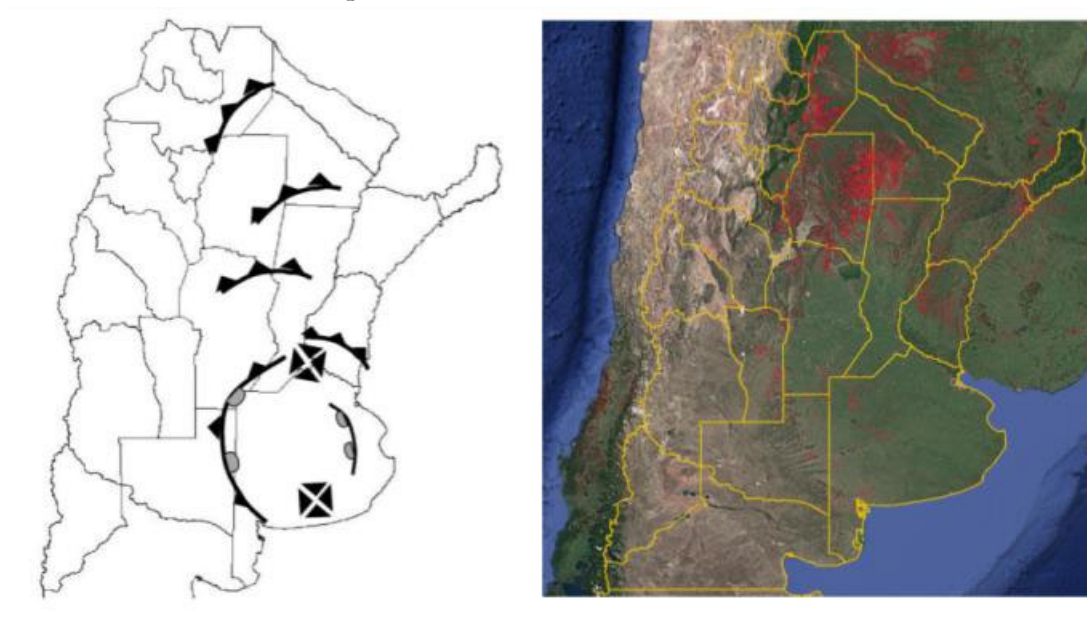
Fuente: elaboración propia en base a datos ESA-CCI-LC.

Validación

Para una primera validación de los resultados obtenidos se realizarán dos ejercicios. Por un lado, uno de carácter general: se compararon las zonas de expansión de frontera agrícola detectadas con el estudio que Viglizzo y Jobbagy (2010) realizaron sobre el tema. Se observa que los frentes identificados por los autores coinciden con los obtenidos mediante la metodología propuesta en este trabajo.

Aparecen frentes de expansión de frontera hacia el suroeste de Salta, el centro-oeste de Chaco y centro-este de Santiago del Estero, el centro de Entre Ríos. A su vez aparecen frentes de expansión nuevos que no se observan en el estudio de Viglizzo y Jobbagy (2010): ciertas zonas en San Luis; Misiones y Corrientes, oeste de Santiago y este de Catamarca.

MAPA 2
Comparación entre frentes de frontera identificados



Fuente: elaboración propia en base a datos ESA-CCI-LC.

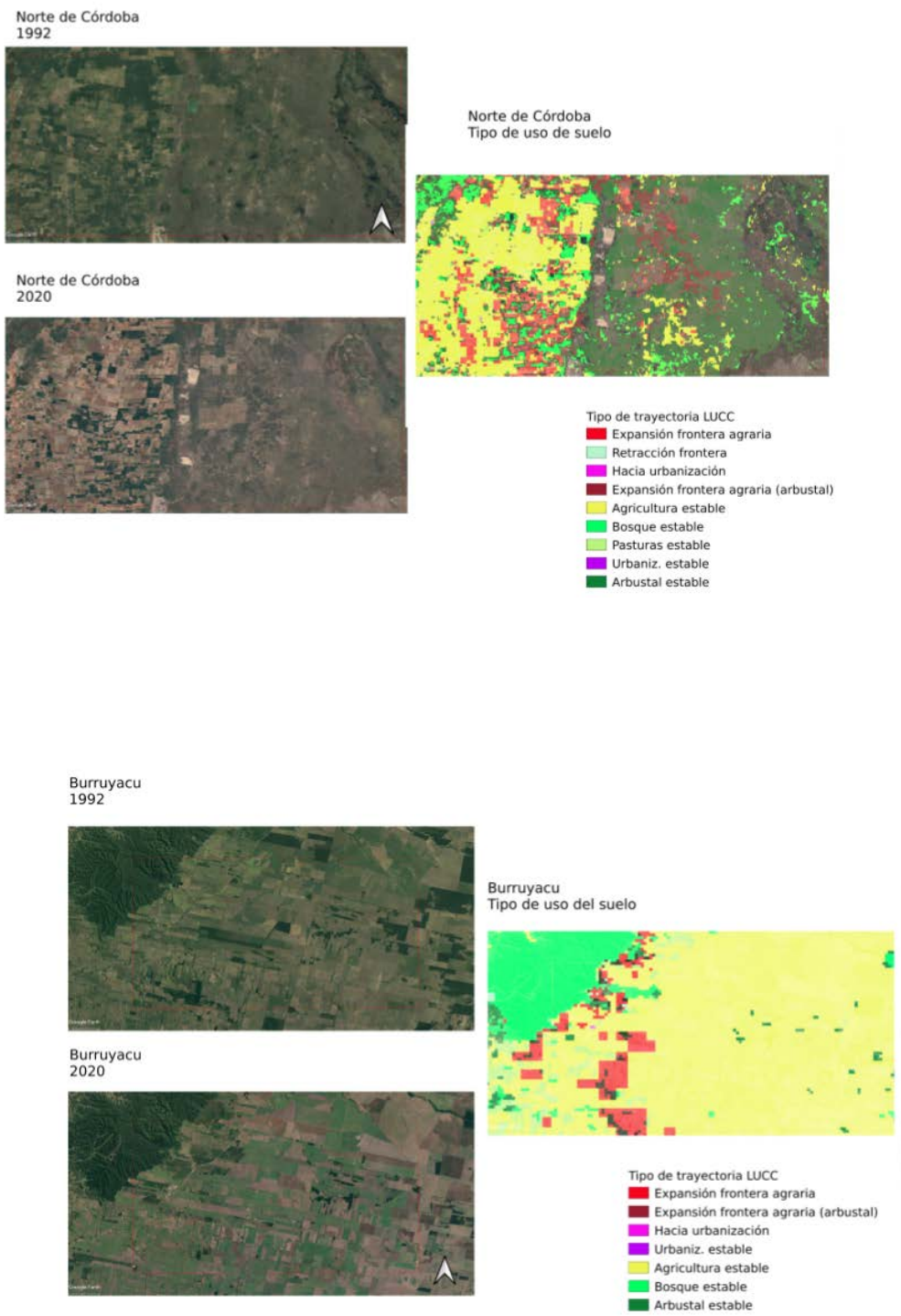
En segundo lugar, se seleccionaron tres zonas con dinámicas diferentes de expansión de frontera. El primero de ellos se ubica en el norte de Córdoba (Salizzi, 2020; Cáceres y Gras, 2020). Se caracteriza por la coexistencia de tres aspectos: expansión de frontera agraria mediante desmonte y la consolidación de áreas agrícolas y bosques estables. Pueden verse en la Imagen 1 a la izquierda dos fotos satelitales (georeferenciadas a partir de Google Earth Pro) de los momentos extremos del período. A la derecha se observan las principales trayectorias de la zona construidas mediante la metodología de clustering de la información de uso de suelo proveniente de la ESA. En todas las figuras el esquema es el mismo. Se notan dos situaciones bien definidas: hacia el oeste se observa predominio de zonas agrícolas estables (es decir que, al menos desde 1992, fueron zonas explotadas) y algunos “parches” de expansión más reciente. Este patrón es captado por los clústers construidos (en amarillo y rojo); hacia el este zonas de bosque nativo o arbustales y una expansión de frontera sobre esas zonas con un patrón también de mosaico.

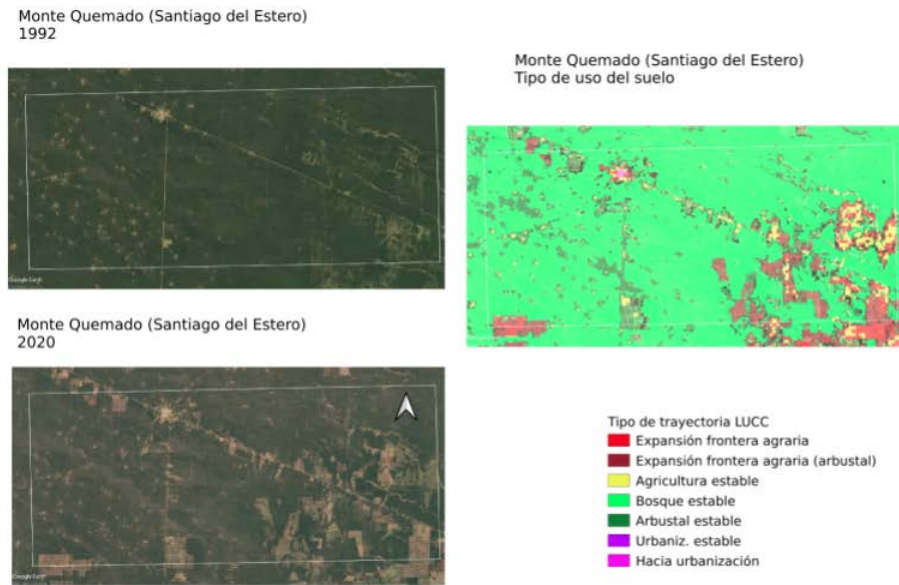
La segunda zona (panel 2) se ubica en la zona aledaña a la localidad de Burruyacu (límite entre Tucumán y Santiago del Estero). Es un área agrícola de larga data. No obstante, estudios recientes (Gras y Zorzoli, 2019) muestran indicios de expansión agrícola. En los tipos construidos se confirma que la trayectoria “agricultura estable” es la predominante y que existen algunos machones leves de expansión de frontera agraria.

El último caso (panel 3) se caracteriza por un claro predominio de monte y bosque nativo que sufrió en los últimos 30 años una fuerte expansión de frontera agraria (Pérez Carrera, Moscuza y Fernández Cirelli, 2018). Se trata de la zona cercana a la localidad de Monte Quemado al norte de Santiago del Estero, en el límite con la provincia de Chaco. Se nota que los clusters construidos logran captar el avance de la frontera agraria que se da, sobre todo hacia el oeste y algunos parches o manchones hacia el este, que se trata predominantemente de una zona que articula puestos ganaderos y monte.

IMAGEN 1

Principales trayectorias de uso del suelo en tres zonas seleccionadas



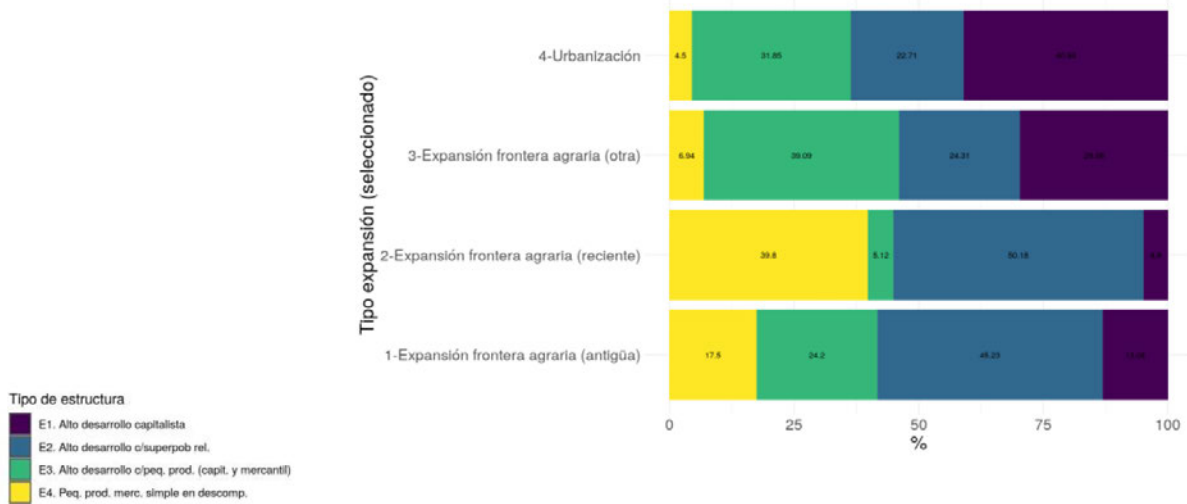


Fuente: elaboración propia sobre fotografías Google Earth Pro y ESA-CCI-LC.

Si bien este trabajo se centra en la dimensión metodológica y los procesos de construcción de la información, es necesario un primer análisis de los resultados obtenidos.

¿Qué relación tienen estos procesos de cambio en el uso del suelo con los procesos de profundización del capitalismo en el campo? Una primera aproximación puede realizarse a partir del análisis de las estructuras agrarias concretas de Argentina.

GRÁFICO 3
Tipos seleccionados de trayectorias de uso del suelo según estructuras agrarias en Argentina (1992-2020)



Fuente: elaboración propia en base a datos ESA-CCI-LC y Rosati y Chazarreta (2020).

Para ello se ha utilizado la regionalización construida en otro trabajo (Rosati y Chazarreta, 2020).⁵

La expansión agrícola presenta patrones diferenciales no solamente por variaciones de condiciones ambientales, sino también porque muestra diferencias según el tipo de relaciones sociales productivas con

las que se encuentra. Se observan movimientos divergentes en la distribución de estas cuatro modalidades de cambio de uso del suelo según cada estructura. La expansión de la frontera antigua se concentra en la llamada estructura 4, es decir, aquellas zonas caracterizadas por la presencia de un alto grado de desarrollo de las relaciones salariales, combinado con una igualmente elevada prevalencia de pequeños productores con escasa cantidad de medios de vida y potencialmente incapacitados de realizar la reproducción simple de su explotación. En cambio, la expansión reciente se distribuye más equitativamente entre esta última y la estructura 3, caracterizada por el predominio de pequeños productores casi sin posibilidades de reproducción.

COMENTARIOS FINALES

Este trabajo presentó una propuesta metodológica para construir trayectorias de uso de suelo. La misma trabaja de forma directa con los píxeles de un producto derivado de imágenes satelitales, lo cual permite construir trayectorias al menor nivel de agregación.

Cabe mencionar algunas desventajas. Por un lado, se observa en la documentación de la fuente de base (ESA, 2017) que existen ciertos errores de clasificación. Los datos tienden a confundir hasta cierto punto zonas de vegetación de frondosidad media (por ejemplo, ciertos tipos de bosques con ciertos arbustales). A su vez, la fuente no permite discriminar entre los diferentes usos agrícolas del suelo; es decir, no permite discriminar cuál es el cultivo y/o la actividad que se siembra en la zona.

Como contracara, la fuente puede ser utilizada para modelar y mapear cambios en el uso del suelo a escalas más grandes (incluso a nivel mundial -Radwan, Blackburn, Whyatt Atkinson, 2021-). En este trabajo se realizó un análisis de escala intermedia y para un período amplio 1992-2020. Al mismo tiempo, la metodología de clustering de trayectorias propuesta permite un monitoreo de mediano plazo de los cambios en el uso del suelo y la detección de zonas con movimientos distintivos. Por ejemplo, fue posible identificar dos clústers de expansión agraria: uno de más larga data (previo a 2006) y otro de constitución más reciente. A su vez, permitió detectar diferentes formas de urbanización recientes. Además, se intentó realizar una primera agregación de tres tipos relevantes de trayectorias y ponerlas en relación con las diferentes estructuras agrarias en las que se producen. Al mismo tiempo, los resultados permiten validar aquellas hipótesis que vinculan la expansión de frontera agraria a un patrón parecido a un mosaico (*patchwork*) poco lineal (Kröger y Nygren, 2020).

Los resultados permiten caracterizar modalidades de expansión de frontera (y otros cambios) de forma desagregada al interior de una unidad territorial determinada (un departamento, por ejemplo). Así, los estudios de caso se ven enriquecidos: se hace posible enmarcarlos en escalas diversas. Pero además, puede servir como insumo para la selección de nuevos casos con criterios sistemáticos: zonas en las que se combinen diferentes movimientos (como el norte de Córdoba) u otras (como Monte Quemado) en los que predomine alguna.

Finalmente, este tipo de aproximación podría utilizarse sin problemas con otras fuentes de datos (otras capas secundarias de uso del suelo; modelos de clasificación entrenados ad-hoc, etc.). Dado que se trata de un proceso relativamente poco costoso en términos computacionales presenta utilidad para monitoreo de los cambios de uso del suelo en el mediano plazo, lo cual tiene implicaciones claras para la política pública.

REFERENCIAS

Baumann, M., Gasparri, I., Buchadas, A., Oeser, J., Meyfroidt, P., Levers, C., Romero-Muñoz, A., le Polain de Waroux, Y., Müller, D. y Kuemmerle, T. (2022). Frontier metrics for a process-based understanding of deforestation dynamics. *Environmental Research Letters*, 17(9).

- Cáceres, D. M., y Gras, C. (2020). A tipping point for agricultural expansion? Technological changes and capital accumulation in Argentina's rural sector. *Journal of Agrarian Change*, 20(1), 79–97. <https://doi.org/10.1111/joac.12336>
- Chaves, M. E. D., Alves, M. de C., Sáfadi, T., Oliveira, M. S. de, Picoli, M. C. A., Simoes, R. E. O. y Mataveli, G. A. V. (2021). Time-weighted dynamic time warping analysis for mapping interannual cropping practices changes in large-scale agro-industrial farms in Brazilian Cerrado. *Science of Remote Sensing*, 3.
- European Space Agency. (2017). *Land Cover CCI. Product User Guide*, Versión 2.0. Recuperado de https://www.esa-landcover-cci.org/?q=webfm_send/84
- Gras, C. y Zorzoli, F. (2019). Ciclos de acaparamiento de tierra y procesos de diferenciación agraria en el noroeste de Argentina. *Trabajo y Sociedad*, 33, 129–151.
- Kröger, M. y Nygren, A. (2020). Shifting frontier dynamics in Latin America. *Journal of Agrarian Change*, 20(3), 364–386.
- le Polain de Waroux, Y., Baumann, M., Gasparri, N. I., Gavier-Pizarro, G., Godar, J., Kuemmerle, T., Müller, R., Vázquez, F., Volante, J. N. y Meyfroidt, P. (2018). Rents, Actors, and the Expansion of Commodity Frontiers in the Gran Chaco. *Annals of the American Association of Geographers*, 108(1), 204–225.
- Maciel, A. M., Camara, G., Vinhas, L., Picoli, M. C. A., Begotti, R. A. y Assis, L. F. F. G. de. (2019). A spatiotemporal calculus for reasoning about land-use trajectories. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(1), 176–192.
- Maus, V., Camara, G., Cartaxo, R., Sanchez, A., Ramos, F. M. y de Queiroz, G. R. (2016). A Time-Weighted Dynamic Time Warping Method for Land-Use and Land-Cover Mapping. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(8), 3729–3739.
- Mena, C. (2008). Trajectories of Land-use and Land-cover in the Northern Ecuadorian Amazon: Temporal Composition, Spatial Configuration, and Probability of Change. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(6), 737–751.
- Mendonça-Santos, M. L. y Claramunt, C. (2001). An integrated landscape and local analysis of land cover evolution in an alluvial zone. *Computers, Environment and Urban Systems*, 25(6), 557–577.
- Müller, N. S., Gabadinho, A., Ritschard, G. y Studer, M. (2008). Extracting knowledge from life courses: Clustering and visualization. *Data Warehousing and Knowledge Discovery, LNCS*, 5182, 176–185.
- Obschatko, E., Foti, M. y Román, M. (2007). *Los pequeños productores en la República Argentina: importancia en la producción agropecuaria y en el empleo en base al Censo Nacional Agropecuario 2002*. Buenos Aires: Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura.
- Pérez Carrera, A., Moscuza, C. H. y Fernández Cirelli, A. (2008). Efectos socioeconómicos y ambientales de la expansión agropecuaria. Estudio de caso: Santiago del Estero, Argentina. *Ecosistemas*, 17(5), 5–15.
- Radwan, T. M., Blackburn, G. A., Whyatt, J. D. y Atkinson, P. M. (2021). Global land cover trajectories and transitions. *Scientific Reports*, 11(1), 12814.
- Rosati, G. (2022). Frontera, deforestación y despoblamiento. Discutiendo algunas hipótesis sobre la expansión reciente de la frontera agraria en Argentina. En T. Porcaro, E. Salizzi, J. Martirén y S. Lanter (Comps.), *Fronteras: Aportes para la consolidación de un campo de estudios* (pp. 225-258). Buenos Aires: Teseo Press.
- Rosati, G. y Chazarreta, A. (2020). Tipos de estructuras sociales agrarias en la formación social argentina. Un análisis a nivel departamental: 2001-2002. *Mundo Agrario*, 21(48). Recuperado de <https://www.mundoagrario.unlp.edu.ar/article/view/MAe153>
- Salizzi, E. (2020). Agronegocio, deforestación y disputas en torno al Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos de la provincia de Córdoba (Argentina). *Territorios*, 43, 1–28.
- Vallejos, M., Volante, J. N., Mosciaro, M. J., Vale, M. L., Bustamante, M. L. y Paruelo, J. M. (2015). Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: A plot level geo-database from 1976 to 2012. *Journal of Arid Environment*, 12, 3-11.

Verburg, P. H., van Berkel, D. B., van Doorn, A. M., van Eupen, M. y van den Heiligenberg, H. A. R. M. (2010). Trajectories of land use change in Europe: a model-based exploration of rural futures. *Landscape Ecology*, 25(2), 217–232.

Viglizzo, E. y Jobbágy, E. G. (Eds.) (2010). *Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico ambiental*. Buenos Aires: Ediciones INTA.

NOTAS

- 1 No se citan los proyectos vinculados en esta versión para mantener el anonimato.
- 2 Dado que se trata de datos pesados y que el presente constituye un primer ejercicio se buscó cubrir todo el período posible a intervalos regulares a un relativo bajo costo computacional. En vista de los resultados favorables, en futuras aproximaciones se replicará el diseño con la serie completa de cada píxel.
- 3 Pueden definirse cuatro operaciones que diferencian secuencias: sustituciones, borrados- inserciones (indels), compresiones-expansiones y transposiciones. En términos estrictos, las distancias de edición no constituyen distancias propiamente dichas: no satisfacen una de las tres propiedades de una métrica, la desigualdad triangular.
- 4 Detalles de la métrica OM y del algoritmo de estimación pueden encontrarse en Müller; Gabadinho; Ritschard y Studer, 2008.
- 5 La misma fue construida a partir de microdatos del Censo Nacional de Población y Vivienda del año 2001 y una clasificación de EAP de pequeños productores (Obschatko, Foti y Román, 2007). Se aplicaron técnicas de análisis multivariado (PCA y clustering jerárquico) para su detección.