

Estimación mediante sensores remotos de las áreas de cultivos agrícolas
invernales de renta y de servicios en el Litoral Oeste de Uruguay

*Trabajo final presentado para optar al título de
Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio
de los recursos naturales y la producción agropecuaria*

Maria Eugenia Alzueta

Ing. Agrónoma - Universidad de Buenos Aires - 2004

Lugar de trabajo: Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires

TUTOR

Tutor

Gervasio Piñeiro

Ingeniero Agrónomo (Universidad de la República Oriental del Uruguay)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TRABAJO FINAL

Jurado

Germán Baldi

Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Jurado

Santiago R. Verón

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 13 de octubre de 2022

Resumen

Contar con información de la superficie agrícola de invierno y su variación a lo largo del tiempo es clave para evaluar la provisión de servicios ecosistémicos que brindan los paisajes agrícolas. En los últimos años, en Uruguay y Argentina, además de los cultivos de invierno de renta (CR), se ha popularizado la siembra de cultivos de servicios (CS), para los cuales no existe información precisa de su cobertura y distribución espacial. El denominado Litoral Oeste de Uruguay concentra gran parte de la actividad agrícola del Uruguay, especialmente los departamentos de Río Negro, Soriano y Colonia. Los objetivos de este trabajo final son: 1) clasificar y analizar las coberturas agrícolas de invierno (CS, CR y barbecho) para las campañas 2014/15 a la 2019/20 y 2) describir la fenología de las clases presentes, con el uso de información satelital (imágenes LANDSAT y MODIS). Se realizaron clasificaciones con entrenamiento supervisado de cultivos de invierno en base a imágenes LANDSAT 8 mediante Random Forest. Se utilizaron para entrenar las clasificaciones datos de cobertura de cultivos obtenidos de 41 campos CREA en la región (aproximadamente 950 potreros para cada año). La clasificación arrojó una exactitud general de entre 75 y 82 % según campaña. Los resultados muestran una disminución en el área total de cultivos de invierno en los tres departamentos analizados. Esta tendencia se repite para los CS y el área de barbecho. Los CR, muestran una tendencia más estable con algunas fluctuaciones entre años en el área total, mientras que para los departamentos de Soriano y Colonia se incrementan levemente, con fluctuaciones entre campañas. Cuando se compararon las firmas espectrales fenológicas promedio de los CS, CR y barbechos, se observó que los CS inician y culminan su crecimiento más temprano que los CR y los valores máximos de NDVI son menores en CS respecto a los CR. A su vez, existió una heterogeneidad importante dentro de cada cobertura para un mismo año, posiblemente por la heterogeneidad de ambientes y también entre años, probablemente por diferencias de precipitaciones entre años que afectan el manejo y crecimiento de los cultivos. A pesar de esta variabilidad, las particularidades en las firmas fenológicas de cada cobertura sugieren que sería posible separar los CS de los CR mediante reglas de decisión relativamente sencillas. La clasificación de imágenes satelitales resultó ser una metodología económica y precisa para conocer el cambio en el uso del suelo a lo largo del tiempo en la región y sugiere que existe mayor superficie agrícola de invierno que la estimada mediante otras fuentes como las encuestas agropecuarias en la región de estudio, aunque ambas fuentes muestran una disminución del área de cultivos anuales a lo largo del tiempo.

Palabras clave: Sensores remotos, Clasificación, Cultivos de servicios.

Abstract

Having information on the winter agricultural area and its variation over time is key to evaluating the provision of ecosystem services provided by agricultural landscapes. In recent years, in Uruguay and Argentina, in addition to winter income crops (CR), the planting of cover crops (SC) has become popular, for which there is no precise information on their coverage and spatial distribution. The so-called West Coast of Uruguay concentrates a large part of Uruguay's agricultural activity, especially the departments of Río Negro, Soriano and Colonia. The objectives of this final work are: 1) to classify and analyze the winter agricultural coverage (CS, CR and fallow) for the 2014/15 to 2019/20 campaigns and 2) to describe the phenology of the present classes, with the use of satellite information (LANDSAT and MODIS images). Classifications with supervised training of winter crops were carried out based on LANDSAT 8 images using Random Forest. Crop cover data obtained from 41 CREA fields in the region (approximately 950 paddocks each year) was used to train the classifications. The classification yielded an overall accuracy of between 75 and 82% depending on the campaign. The results show a decrease in the total area of winter crops in the three departments analyzed. This trend is repeated for the CS and the fallow area. The CRs show a more stable trend with some fluctuations between years in the total area, while for the departments of Soriano and Colonia they increase slightly, with fluctuations between campaigns. When signatures were compared the average phenological spectral signatures of the CS, CR and fallows, it was observed that the CS begin and end their growth earlier than the CR and the maximum values of NDVI are lower in CS compared to CR. In turn, there was significant heterogeneity within each coverage for the same year, possibly due to the heterogeneity of environments and also between years, probably due to differences in rainfall between years that affect crop management and growth. Despite this variability, the particularities in the phenological signatures of each coverage suggest that it would be possible to separate the CS from the CR by means of relatively simple decision rules. The classification of satellite images turned out to be an economical and precise methodology to find out the change in land use over time in the region and suggests that there is a greater winter agricultural area than that estimated by other sources such as agricultural surveys in the study region, although both sources show a decrease in the area of annual crops over time.

Keywords: Remote sensing, Classification, Cover crops.

Índice

Resumen	3
Abstract	4
Índice	5
Introducción	9
Materiales y métodos	14
Resultados y Discusión	19
Clasificaciones de coberturas agrícolas en invierno	19
Descripción fenológica de las distintas coberturas de invierno	26
Conclusión	27
Anexo	i

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de los campos CREA utilizados como “verdad terrestre” en el litoral oeste de Uruguay.....	14
Figura 2. Esquema de los pasos seguidos en el desarrollo del trabajo (descripción de los pasos en el texto).....	18
Figura 3. Mapas con clasificación final de las campañas 2014/15 y 2019/20 acompañados por la matriz de confusión correspondiente donde se analizan las clases del Nivel 3 de invierno.....	20
Figura 4. Ejemplos de errores de clasificación observados. En cada columna se observa de arriba hacia abajo: imagen de alta resolución, clasificación obtenida y lotes con la cobertura informada para esa campaña. Las coberturas de Nivel 3 son: CS en rojo, CR amarillo, barbecho en blanco. Las flechas señalan ejemplos de errores citados en el texto.....	21
Figura 5. Comparación entre las superficies obtenidas en la clasificación para el área de estudio (línea entera) y la información de las encuestas a nivel país (línea punteada).	22
Figura 6. Evolución de la superficie obtenida en la clasificación (líneas enteras) y en encuestas (línea punteada). Izquierda: detalle de cada cobertura, derecha: superficie total agrícola ocupada con barbecho, CS y CR para cada departamento.....	23

Figura 7. Comparación de los porcentajes de cada cobertura (barbecho, CS, CR) correspondientes a distintas fuentes de información: a) clasificación (datos corregidos por método de Olofsson et al., 2014 y sin corregir), b) datos de los campos FUCREA y c) información de encuestas (a nivel país). Se presenta un gráfico por cada año analizado..... 25

Figura 8. Firma fenológica promedio de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura. Las curvas correspondientes a cada año se encuentran en el Anexo, Figura A 7 a Figura A 12 27

Índice de tablas

Tabla 1. Número de lotes de campos CREA con coberturas herbáceas por campaña analizada..... 15

Tabla 2. Esquema de los niveles de clasificación 16

Tabla 3. Evolución de la superficie obtenida en la clasificación y comparación con CR en encuestas.
* Superficie estimada: Se calcularon los porcentajes que representó cada departamento en la campaña 2019/20; se tomaron los mismos como constantes para aplicar sobre los totales del país en las encuestas de invierno en las demás campañas..... 24

Índice de figuras en Anexo

Figura A 1. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2014/15..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 2. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2015/16..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 3. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2016/17..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 4. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2017/18..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 5. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2018/19..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 6. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2019/20..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 7. Firma fenológica promedio para la campaña 2014/15, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 8. Firma fenológica promedio para la campaña 2015/16, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 9. Firma fenológica promedio para la campaña 2016/17, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 10. Firma fenológica promedio para la campaña 2017/18, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 11. Firma fenológica promedio para la campaña 2018/19, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 12. Firma fenológica promedio para la campaña 2019/20, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 13. Firma fenológica promedio de todas las campañas para el departamento de Río Negro, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.**¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 14. Firma fenológica promedio de todas las campañas para el departamento de Soriano, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura ... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A 15. Firma fenológica promedio de todas las campañas para el departamento de Colonia, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura ... **¡Error! Marcador no definido.**

Índice de tabla en Anexo

Tabla A 1. Superficie obtenida en la clasificación (ha) y corregida por el método de Olofsson (ha) e intervalo de confianza.....vii

Introducción

El empleo de sensores remotos es una práctica cada vez más utilizada para clasificar el uso y la cobertura del suelo y sus tendencias en el tiempo. La disponibilidad de imágenes periódicas de toda la superficie terrestre permite cubrir grandes extensiones, con una alta frecuencia, facilitando los procesos de clasificación (Baeza et al., 2014). Actualmente, la alta resolución espacial de las imágenes satelitales disponibles permite además realizar las clasificaciones a escalas muy detalladas, por ejemplo, a la escala de lote (Weiss et al., 2020). Las características fenológicas de la vegetación y particularmente la de los cultivos agrícolas, son clave para la diferenciación de distintos usos del suelo y su clasificación exitosa con sensores remotos (Alcaraz et al., 2006; Paruelo et al., 2001). Por todo esto, el uso de imágenes satelitales de libre acceso como las derivadas de los sensores LANDSAT permite la clasificación de grandes zonas agrícolas en diversas regiones del planeta, así como el análisis de los cambios en el uso del suelo ocurridos en el tiempo.

El uso de sensores remotos en clasificaciones para identificar cambios de uso del suelo ha sido usado en muchas regiones del planeta y particularmente en los pastizales del Río de la Plata. Los primeros productos de clasificación a partir del lanzamiento de la serie de satélites NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) permitieron un mapeo global de las distintas coberturas y usos del suelo del planeta. Posteriormente el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites TERRA y AQUA, mejoró la capacidad para obtener información sobre la vegetación a una escala más detallada. Desde entonces se han desarrollado diferentes proyectos para conocer coberturas de suelo a distintas escalas espaciales, temporales y conceptuales (Clark et al., 2010; Hansen et al., 2000). Algunos trabajos a nivel regional se han basado en la fenología de la vegetación para la clasificación de usos del suelo, utilizando imágenes MODIS y han separado distintas coberturas vegetales como recursos forrajeros perennes, forestación y montes, cultivos de verano y doble cultivos a escala regional (Baeza and Paruelo, 2020) o a nivel país (Baeza et al., 2014). Sin embargo, para un análisis con mayor nivel de detalle espacial se requiere el uso de otros sensores con un menor tamaño de píxel como es el caso de Landsat.

Los métodos de clasificación pueden agrupar entidades a nivel de píxeles, pero también pueden trabajar a nivel subpíxel (clasificaciones difusas) o con clasificaciones por objetos. Entre las reglas de decisión para la asignación de píxeles a clases se encuentran los métodos paramétricos, que asumen la existencia de un set de datos con distribución normal. Entre estos métodos se encuentra por ejemplo las distancias mínimas, en el cual se calcula la distancia espectral entre un píxel candidato, y el valor medio de la firma espectral de cada clase. Este método, resulta muy rápido en términos de procesamiento y ningún píxel queda sin clasificar. Sin embargo, no tiene en cuenta la variabilidad de las clases espectrales. Por

otro lado, se puede usar la máxima verosimilitud, donde cada píxel tiene una probabilidad de pertenecer a una determinada clase espectral definida en base a las funciones de densidad de probabilidad calculadas a partir de los valores de dispersión de los píxeles incluidos en las áreas de entrenamiento. Este método es más preciso, pero más lento en términos de procesamiento. Por otro lado, existen los métodos no paramétricos de clasificación, que no se basan en parámetros estadísticos para separar clases, y resultan adecuados para paisajes complejos, como por ejemplo las neural networks, árbol de decisión, support vector machine, método del paralelepípedo, en este último se establecen límites superior e inferior para cada banda espectral, y se define un paralelepípedo para un par de bandas. Este método es fácil, simple y útil como primera aproximación. Sin embargo, muchos píxeles pueden resultar fuera de la clasificación o quedar incluidos en más de un paralelepípedo.

Las clases a estimar se pueden definir considerando la similitud entre entidades o ser conocidas con anterioridad. En el primer caso, solo se especifica un número de clases a obtener (ej: Iterative Self Organizing Data Analysis Technique o ISODATA método que usa las distancias espectrales a través de un proceso secuencial e iterativo para asignar los píxeles por similitud según valor medio y varianza. Los agrupamientos resultantes son evaluados en términos de su similitud y en base a esto se redefine el criterio para cada clase y se clasifica nuevamente). En el segundo caso, se conocen previamente las clases a separar y se cuenta con un set de datos para entrenar el algoritmo, como por ejemplo el árbol de decisión (classification and regression tree (CART)), en el cual cada nodo del árbol selecciona un atributo de los datos que divide con mayor eficacia. Este método es sensible al conjunto de datos de entrenamiento y pueden existir sobreajuste a dichos datos. Para revertir estos puntos se puede usar el método de Random Forest (RF) (caso particular de bagging o método donde varios clasificadores simples son aplicados en paralelo) (Abella-Miravet, 2021). La decisión final se toma como una media de las decisiones individuales de los árboles, de este modo la varianza de la predicción disminuye respecto a un solo árbol de decisión. Sin embargo, este último método produce modelos predictivos no descriptivos y demanda mayor capacidad de procesamiento (Orellana Alvear, n.d.). Este método es uno de los más utilizados debido a su simplicidad y sus buenos resultados, pero es sensible a las clases de entrenamiento desbalanceadas en número y puede existir sobreajuste si el número de árboles es muy grande.

Para realizar una clasificación con entrenamiento supervisado es muy importante que los datos de campo sean representativos respecto del área de estudio, que se encuentren homogéneamente distribuidos en toda la superficie y que exista un balance entre las clases

a diferenciar (Olofsson et al., 2014)¹. Un método que cumple con estos requisitos es el de los segmentos aleatorios utilizado por el ex Ministerio de Agroindustria de Argentina (Ministerio de Agroindustria, n.d.). En lugares donde no se han realizado segmentos aleatorios específicos para realizar clasificaciones, como es el caso de Uruguay, es posible usar información de establecimientos productivos que cuentan con un croquis de los usos del suelo a lo largo del tiempo. En este sentido, las organizaciones de productores como AACREA en Argentina FUCREA en Uruguay, así como AAPRESID o AUSID cuentan con información detallada de los usos del suelo de muchos establecimientos en una región. En general los productores llevan un registro de los cultivos implantados en cada predio (invierno-verano), y durante periodos largos de tiempo. Sin embargo, las rotaciones y manejos de cultivos realizadas por estos productores no son un muestreo al azar, y por lo tanto podrían no ser representativas de una región, aunque se espera generalmente que lo sean.

El denominado “Litoral Uruguayo”, es la zona más extensa de agricultura en este país, y ha experimentado diversos cambios en el uso del suelo en los últimos años (Arbeletche et al., 2010). En Uruguay existen distintas fuentes de información respecto a los usos del suelo. Cada 10 años se realiza el censo agropecuario y anualmente se llevan a cabo encuestas a una muestra poblacional representativa. La información recogida en las entrevistas es posteriormente expandida para obtener estimaciones de los totales de las explotaciones definidas en el último censo. De ese modo se obtiene una aproximación de los distintos usos del suelo. Por otro lado, desde el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial de Uruguay, se han publicado clasificaciones de la cobertura física y biofísica del Uruguay

¹ Olofsson et al. plantean en primer lugar un muestreo aleatorio, y proponen expresar la matriz de

confusión como proporciones de las áreas clasificadas $\hat{\rho}_{ij} = W_i \frac{n_{ij}}{n_i}$

Siendo que la clasificación obtenida puede estar sesgada, plantean para la corrección del sesgo un método utilizando un estimador de cada clase. Consideran que para dicho estimador de proporción de área debe utilizarse los valores de referencia (datos de campo) por tener menor

sesgo que los de la clasificación. $\hat{\rho}_{.k} = \sum_{i=1}^q \hat{\rho}_{ik}$, y lo afectan sobre el área clasificada para obtener el área corregida $\hat{A}_k = A \times \hat{\rho}_{.k}$

Luego calculan el error estándar $S(\hat{\rho}_{.k}) = \sqrt{\sum_i W_i^2 \frac{n_{ik} (1 - \frac{n_{ik}}{n_i})}{n_i - 1}} = \sqrt{\sum_i \frac{W_i \hat{\rho}_{ik} - \hat{\rho}_{ik}^2}{n_i - 1}}$ y obtienen un intervalo de confianza con un 95% de confianza $\hat{A}_k \pm 1.96 \times S(\hat{A}_k)$.

a escala 1:100.000, correspondientes a los años 2000, 2008, 2011 y 2015, que respecto de cultivos solo identifica el uso o no de riego (MVOTMA-DINOT, 2015). Desde el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) se ha publicado el mapa integrado de cobertura/uso del suelo del Uruguay correspondiente al año 2018, realizado por los equipos de Sistemas de Información Geográfica de la Dirección General de Recursos Naturales y de la Oficina de Programación y Política Agropecuaria. El mismo utilizó imágenes Sentinel 2 y Landsat 8 y diferenció las clases cultivo bajo riego, de secano, y rastrojo de este último entre otras. (Petraglia et al., 2019). Sin embargo, no existe para esta zona una clasificación reciente de varios años continuos y con una mediana resolución espacial donde se separen cultivos de servicios (CS) de cultivos de renta (CR).

Uno de los cambios más importante de la agricultura uruguaya de los últimos años ha sido la incorporación de cultivos de servicio (o cultivos de cobertura) en las rotaciones agrícolas. Los CS cumplen un rol importante sobre la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, en especial en suelos con una topografía con pendientes propensas a la erosión como es el caso de la zona de estudio. El efecto que producen estos cultivos puede variar dependiendo de la especie implantada y del método utilizado para finalizar el cultivo (Adetunji et al., 2021). Pero en general, los CS contribuyen a la diversidad, brindan numerosas funciones sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo y contribuyen con efectos biológicos benéficos (Adetunji et al., 2020), sin afectar la disponibilidad de agua para el posterior CR (Pinto et al., 2017). Esto explica su crecimiento en la participación de la superficie agrícola luego de la entrada en vigencia de la Ley de Uso y Conservación de los Suelos y de las Aguas en Uruguay en 2013. Los CS se implantan generalmente en invierno, de este modo durante el período entre dos cultivos de verano el suelo se encuentra protegido por esta cobertura. Este efecto es más importante luego de cultivos que dejan poco rastrojo, como la soja, y esto se refleja en el mayor uso de CS luego de dicho cultivo comparado por ejemplo con maíz, registrado por las encuestas agrícolas ((DIEA), 2017). Los múltiples servicios ecosistémicos que brindan los CS permiten una intensificación sostenible de la agricultura. Pero, a pesar de ello, no existen cuantificaciones precisas del área ocupada por los mismos, ni de sus cambios temporales.

Conocer las superficies ocupadas por CS, CR y barbecho es importante para analizar el manejo que reciben los suelos. A partir de las clasificaciones del uso del suelo se puede calcular la superficie de cada cobertura de interés y analizar así las tendencias en el tiempo tanto de las superficies ocupadas por cada clase, como la relación entre las mismas. Esto permite conocer el comportamiento de las distintas coberturas y comparar los resultados con otras fuentes de información. Dicha información sirve como base para conocer el funcionamiento del sistema. Podría utilizarse como insumo para inferir efectos sobre pérdidas de suelo relacionados a las tres clases: a) barbechos sin cobertura, b) CR con un breve periodo sin cobertura y c) CS con el menor tiempo sin cultivo. También para conocer

el efecto en esta zona específica sobre la población de malezas y plagas. Asimismo, podrían analizarse los rendimientos y evaluar su vinculación con el manejo, considerando el número de campañas en que se han incorporado CS a la rotación. Es importante considerar la variable temporal ya que los efectos positivos pueden no ser inmediatos. Conociendo los efectos a largo plazo se puede tener una referencia más certera sobre el impacto económico que generan los CS, es decir estimar su beneficio y no solo su costo de implantación.

Conocer las características fenológicas de cada cultivo permite identificar posibles momentos donde las diferencias entre los mismos sean máximas y resulte más sencillo diferenciarlos para su clasificación. Cada cobertura de suelo presenta particularidades que se traducen en reflectancia de distintas proporciones de las bandas del espectro electromagnético, lo que permite su identificación (firma espectral). Las coberturas vegetales fotosintéticamente activas presentan particularidades únicas debido a sus tejidos fotosintéticos. Las clorofilas absorben en longitudes de onda correspondientes al rojo, mientras que, la estructura del mesófilo de las hojas origina una alta reflectancia en la porción del infra rojo cercano. Esta característica de la vegetación es utilizada por el índice de diferencia de vegetación normalizado ($NDVI = (IRc-R)/(IRc+R)$), el cual presenta una alta correlación con el índice de área foliar del cultivo (Tucker et al., 1985). El análisis del NDVI durante el período de crecimiento permite conocer las particularidades de cada cultivo y dar una idea de su fenología (firma fenológica). Es esperable que los barbechos presenten una curva con valores muy bajos, pudiendo aumentarse los mismos ante la presencia de malezas. En los cultivos, los valores de NDVI comenzarán a incrementarse con la emergencia y caerán con el fin del cultivo. Por tal motivo, es esperable poder identificar a los CS por un crecimiento previo a los CR, y una finalización también previa a los CR. Por otra parte, es probable que, en los CR que reciben un manejo diferencial (por ejemplo: mayor fertilización, mayor densidad, etc.), el cultivo presente mayor desarrollo y actividad fotosintética, que se plasmarán en un valor máximo mayor de NDVI que los CS. En todos los casos puede existir variabilidad entre las especies utilizadas en cada cobertura y entre años para una misma cobertura, por lo que es importante caracterizarlas y contar con distintos cultivos en varios años y predios.

En este trabajo se presentan dos grandes objetivos. En primer lugar, realizar una clasificación con entrenamiento supervisado, utilizando información satelital de las imágenes LANDSAT con píxeles de 30 metros, para luego analizar la participación de los tipos de coberturas agrícolas de invierno (CS, CR, barbecho) a lo largo de las campañas 2014/15 a 2019/20. En segundo lugar, describir la fenología de las clases presentes con el uso de imágenes de NDVI del satélite MODIS. Si bien la resolución espacial de MODIS es de 250 metros, permite contar con un producto cada 16 días compuesto por los mejores píxeles disponibles en dicho periodo (Didan, 2015). Esta resolución temporal es clave para caracterizar el crecimiento de los cultivos.

Materiales y métodos

El área de estudio abarca el Litoral oeste de Uruguay, incluyendo los departamentos de Río Negro, Soriano y Colonia (Figura 1. Ubicación de los campos CREA utilizados como “verdad terrestre” en el litoral oeste de Uruguay.). En esta zona, la temperatura media anual es de 18°C, con riesgo de heladas entre junio y septiembre. La precipitación media varía entre 1000 y 1100mm anuales siendo su distribución homogénea a lo largo del año, pero muy irregular entre años (Durán et al., 1999). Los suelos son brunosoles y vertisoles profundos y moderadamente profundos que por su aptitud productiva, han llevado a la concentración de la superficie agrícola del país (Brazeiro and Gutierrez, 2012). Sin embargo, su topografía ondulada a levemente ondulada, sumado a la intensificación en el uso sin un manejo conservacionista, los hacen susceptibles a la erosión hídrica.



Figura 1. Ubicación de los campos CREA utilizados como “verdad terrestre” en el litoral oeste de Uruguay.

La información de terreno o “verdad terrestre” consistió en registros de usos del suelo de 41 establecimientos (un total de 950 lotes), suministrada por la Federación Uruguaya de

Grupos CREA (FUCREA). Entre ellos, los de interés para la clasificación realizada en este trabajo eran los usos o coberturas agrupados en las clases de CS, CR y Barbecho. Los CS pueden ser a su vez, de leguminosas o de gramíneas, y a su vez estas últimas pueden separarse en coberturas de avena, centeno y cultivo de gramíneas sin especificar (ver Tabla 1). Sin embargo, algunas de estas coberturas se encontraban en muy baja proporción e incluso algunas aparecían solo en determinados años. Este desbalance en el número de lotes que representa cada clase podría afectar los resultados de la clasificación con el método de Random Forest. Por tal motivo, se decidió reducir la resolución conceptual a través de la unificación de coberturas de similares características y trabajar únicamente con las clases de CS, CR y Barbecho. Del total de lotes con las coberturas de interés, se destinó el 50% para el entrenamiento de la clasificación, y el 50% restante para evaluación de los resultados.

Tabla 1. Número de lotes de campos CREA con coberturas herbáceas por campaña analizada.

Clase	Grupo de especies	Cobertura	2014/15	2015/16	2015/17	2017/18	2018/19	2019/20	Total
Cultivos de Servicios	Cultivos de Servicios (gramíneas)	Avena	118	125	159	189	145	157	893
		Centeno					3	2	5
		Gramínea sin especificar	13	21	22	21	28	18	123
	Cultivos de Servicios (leguminosas)		2		2	1		8	13
Cultivos de Renta	CR_Trigo_Cebada	Trigo	75	78	46	34	43	65	341
		Cebada	31	43	78	52	76	54	334
	CR_Avena_RG	Avena	29	29	25	11	15	9	118
		Raigras	24	22	29	42	23	24	164
	CR_Dicotiledóneas (leguminosas)		3	4	7	6	4	6	30
CR_Dicotiledóneas (brasicas)		4	8	11	29	40	52	144	
Barbecho			116	103	86	72	75	64	516
Pastizal Natural			208	225	242	238	223	225	1361
Pasturas			110	153	212	220	223	212	1130

En el marco de un trabajo final coordinado, se realizaron en forma paralela clasificaciones jerárquicas, con entrenamiento supervisado, a escala anual (Figura 1. Ubicación de los campos CREA utilizados como “verdad terrestre” en el litoral oeste de Uruguay. y Tabla 2). El trabajo final de Fernando Romero Rüsck, consistió en clasificaciones de mayor jerarquía para cada una de las 6 campañas analizadas, del 2014/15 al 2019/20. En el mismo, se separaron las clases leñosas de herbáceas dejando por fuera las coberturas de agua y ciudades con el uso de una máscara disponible en la página web oficial de IDEuy (Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay) (Nivel 1). Posteriormente, en el mismo trabajo, se diferenciaron subclases: “bosques nativos” y “forestaciones” (dentro de la clase leñosas) y “pastizal natural”, “pastura” y “cultivos” (dentro de la clase herbáceas) (Nivel 2). A partir de estas clasificaciones se contó con estimaciones de las superficies ocupadas por la clase “cultivos” que se utilizó como máscara para el Nivel 3. En el trabajo de Federico Ernst Godoy, dentro de “cultivos” se identificaron cultivos de verano (Nivel 3). En el

presente trabajo final se clasificó toda el área de “cultivos” en las distintas coberturas de invierno: “barbecho”, “cultivos de servicios” y “cultivos de renta” (Nivel 3). Por otra parte, Ignacio Barriola realizó clasificaciones con entrenamiento no supervisado con la misma base de datos, pero con procedimientos diferentes.

Tabla 2. Esquema de los niveles de clasificación

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Herbaceas	Cultivos	Maíz_1	
		Maíz_2	
		Soja_1	
		Soja_2	
		Sorgo_1	
		Sorgo_2	
	Barbecho	Barbecho	
	Cultivos de Servicio Inviernal	CS Inviernal	
	Cultivos de Renta Inviernal	CR Trigo_Cebada CR Avena_RG CR dicotiledóneas	
	Pastizal Natural		
Pasturas			
Leñosa	Bosques nativos		
	Forestaciones		
Urbano			
Agua			

El proceso de clasificación para obtener el mapa de Nivel 3 de invierno, se dividió en distintas etapas para no superar la capacidad de trabajo del GEE y se trabajó con cada campaña por separado (ver Figura 2). Los pasos seguidos fueron:

1. Generación de espacio de atributos.

Insumos: Imágenes Landsat 8 filtradas por nubes (reflectancia a tope de la atmósfera). Se consideraron las siguientes bandas: B2 (azul), B3 (verde), B4 (rojo), B5 (IRc), B6 (SWIR 1), B7 (SWIR 2), B10 (IRt 1), B11 (IRt2) y NDVI ((B5-B4)/(B5+B4)). Cada banda se compone de la mediana de un bimestre (julio-agosto, septiembre-octubre, noviembre-diciembre, enero-febrero, marzo-abril, mayo-junio). En los casos de los pixeles sin información debido a nubosidad, se completó con pixeles de imágenes disponibles 15 días antes y 15 días después; y de continuar habiendo faltantes, se usaron datos de 30 días antes y 30 días después.

Producto: 6 imágenes (1 asset por cada campaña) de 54 bandas cada una.

2. Consolidación de la información de 41 establecimientos en un shape con coberturas de suelo identificadas por números.

Insumos: base de datos de campos FUCREA.

Producto: shape único con identificación de lotes e información de las coberturas a clasificar para todos los años y todos los niveles.

3. Prueba de diferentes combinaciones de bandas del espacio de atributo en clasificación con entrenamiento supervisado utilizando el clasificador Classification and Regression Tree (CART). Selección en función de exactitud general y matriz de confusión fijando el proceso de aleatorización para cada campaña (“seed”).
Insumos: productos obtenidos en los pasos 1 y 2; e información adicional para delimitar área de estudio y enmascarar ciudades y cuerpos de agua.
Producto: Clasificaciones del Nivel 3 utilizando las bandas B3 (verde), B6 (SWIR 1) y B10 (IRt 1) de los bimestres julio-agosto, septiembre-octubre y noviembre-diciembre y NDVI de julio-agosto y noviembre-diciembre. Dichas combinaciones se mantuvieron para todas las campañas, a fin de estandarizar el procedimiento.
4. Clasificación con los parámetros seleccionados en el punto anterior usando el clasificador Random Forest (RF) (Se utilizaron 100 árboles, excepto en las campañas 2014/15: 97 árboles y la 2016/17: 84, por verse superada la capacidad de GEE).
Insumos: Idem paso 3, más la información surgida en dicho punto respecto a bandas y “seed” a utilizar.
Producto: clasificaciones de Nivel 3 de invierno, exportadas como imagen (una por cada campaña).
5. Evaluación de la clasificación de RF. Se utilizó la información del centroide de cada lote.
Insumos: Imagen de cada clasificación obtenida en el paso 4.
Producto: Matriz de confusión y datos de exactitud. (ver Figura 3 y en Anexo Figura A 1 a Figura A 6).
6. Integración de los Niveles 2 y 3 en GEE. Se utilizó como máscara el área correspondiente a la clase “cultivos” del Nivel 2, dentro de la cual se circunscribió la clasificación de las coberturas de Nivel 3 (barbecho, CS y CR).
Insumos: Clasificación de Nivel 2, obtenida en otro trabajo final y de Nivel 3 obtenida en punto 4 del presente trabajo.
Producto: Mapa de Nivel 3 de invierno. Se exportó una imagen por cada año.
7. Cálculo de superficies de cada clase para el total del área de estudio y para cada departamento. Corrección de superficies por el método de Olofsson et al., 2014.
Insumos: Clasificaciones obtenidas en el punto 6 y datos de lotes CREA para la corrección.
Producto: planilla de cálculo con información de superficie de cada cobertura para cada año, en cada departamento y del total de área de estudio.

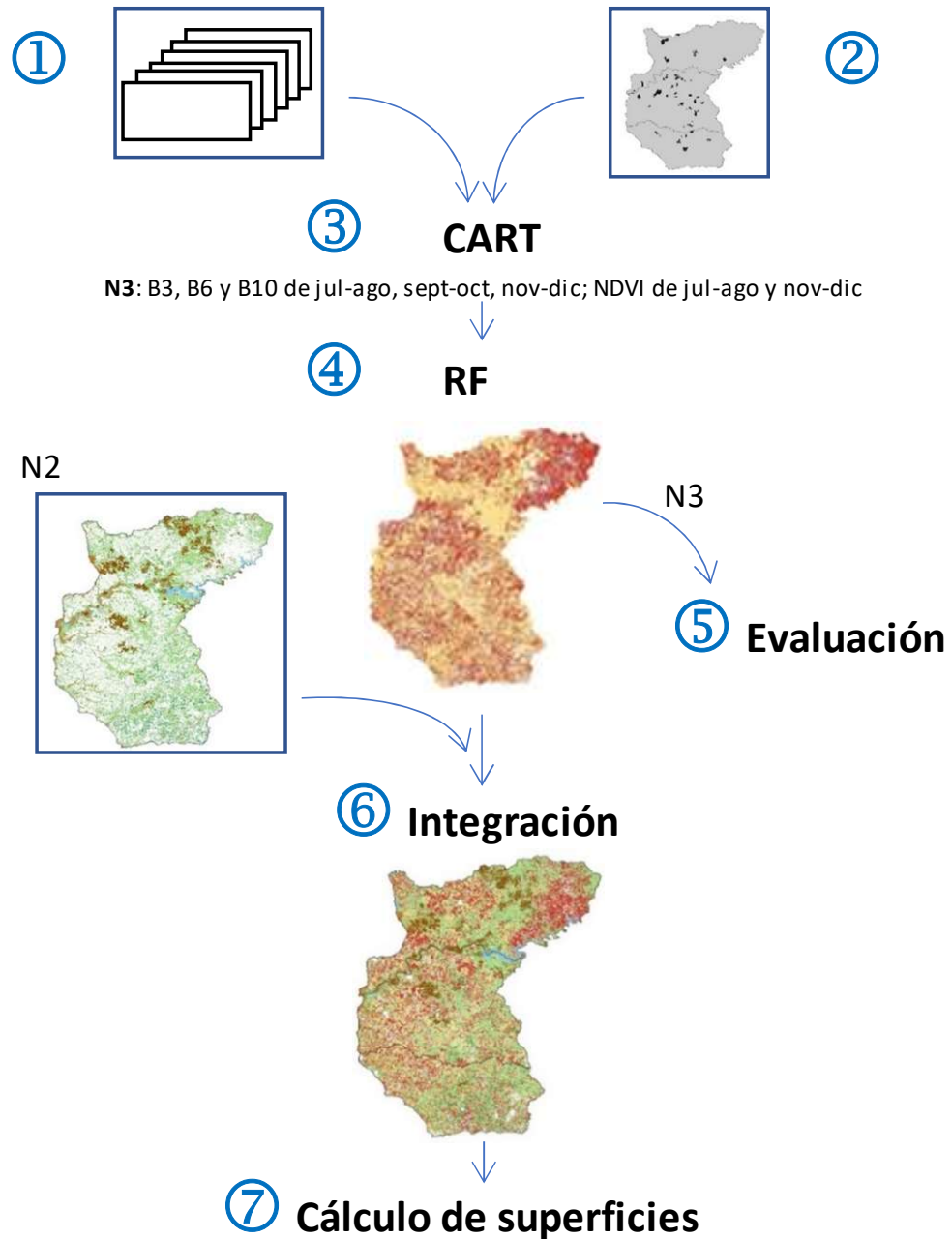


Figura 2. Esquema de los pasos seguidos en el desarrollo del trabajo (descripción de los pasos en el texto).

Finalmente, luego de obtener las superficies de cada clase (paso 7) se compararon los valores obtenidos con información de las encuestas agrícolas del MGAyP. Para algunos años se contó con información completa de las encuestas de DIEA, mientras que para otros años se estimaron los datos de coberturas para los departamentos estudiados, a partir de información a nivel país. Así, en la serie correspondiente a invierno 2019 se informa la

superficie de CR total, tanto para los 3 departamentos analizados como para el total del país, y a su vez, a nivel país se detalla el total por cultivo. En las series de años de 2016, 2017 y 2018 la información suministrada por departamento corresponde únicamente a la superficie de trigo y cebada. Finalmente, en las encuestas de 2014 y 2015 la información se limita al total de CR a nivel país. En los años en que la información era parcial, para estimar la superficie faltante, se tomó como referencia la encuesta de 2019. Se calculó para dicho año el porcentaje de CR de cada departamento sobre el total país, y luego el porcentaje de cada cultivo en cada departamento respecto al total del departamento. Es decir que para los cálculos se asumió que las proporciones de cada cultivo y departamento se mantenían constantes. Con todos estos datos de distintas fuentes se pudo construir una serie de datos de la superficie ocupada por los distintos usos del suelo para varios años en la zona de estudio.

Finalmente, para caracterizar a los distintos CS y CR y a los barbechos, por sus firmas fenológicas, se extrajeron datos de NDVI del producto MOD13Q1 versión 6 desde GEE. Para evitar píxeles que incluyeran distintas coberturas, se utilizó un buffer negativo sobre los lotes de los predios evaluados. El número de píxeles para cada año dependió tanto de las coberturas existentes como del tamaño de los lotes. Se graficaron las coberturas de Nivel 3 (CS, CR, Barbecho) y Nivel 4 (considerando dentro de CR las coberturas de avena-raigras, trigo-cebada y dicotiledóneas, esta última abarca tanto leguminosas como brasicas). Se realizaron promedios generales de todas las campañas, por cada campaña para las distintas coberturas los cuales reflejan la variabilidad temporal y también un promedio de todos los años para cada departamento donde se aprecia la variabilidad espacial (más información en Anexo Figura A 7 a Figura A 12).

Resultados y Discusión

Clasificaciones de coberturas agrícolas en invierno

A partir de las clasificaciones realizadas se lograron identificar las tres coberturas agrícolas de invierno con una muy buena exactitud general, de entre 75 y 82 % según campaña. Los 6 mapas de las clasificaciones obtenidas, uno de cada campaña analizada, corresponden a la integración de los niveles 2 y 3 (ver Figura 3, mapas del primer y último año analizado, mapas restantes ver en el Anexo Figura A 1 a Figura A 6). La mayor parte de los errores de clasificación fueron entre las clases de barbecho y cultivos de servicios (ver Figura 3 y Figura 4, y en Anexo Figura A 1 a Figura A 6). Para los cultivos de renta, la campaña 2017/18 presentó los mayores errores en la clasificación, igualmente con una exactitud del usuario bastante alta, del 77%.

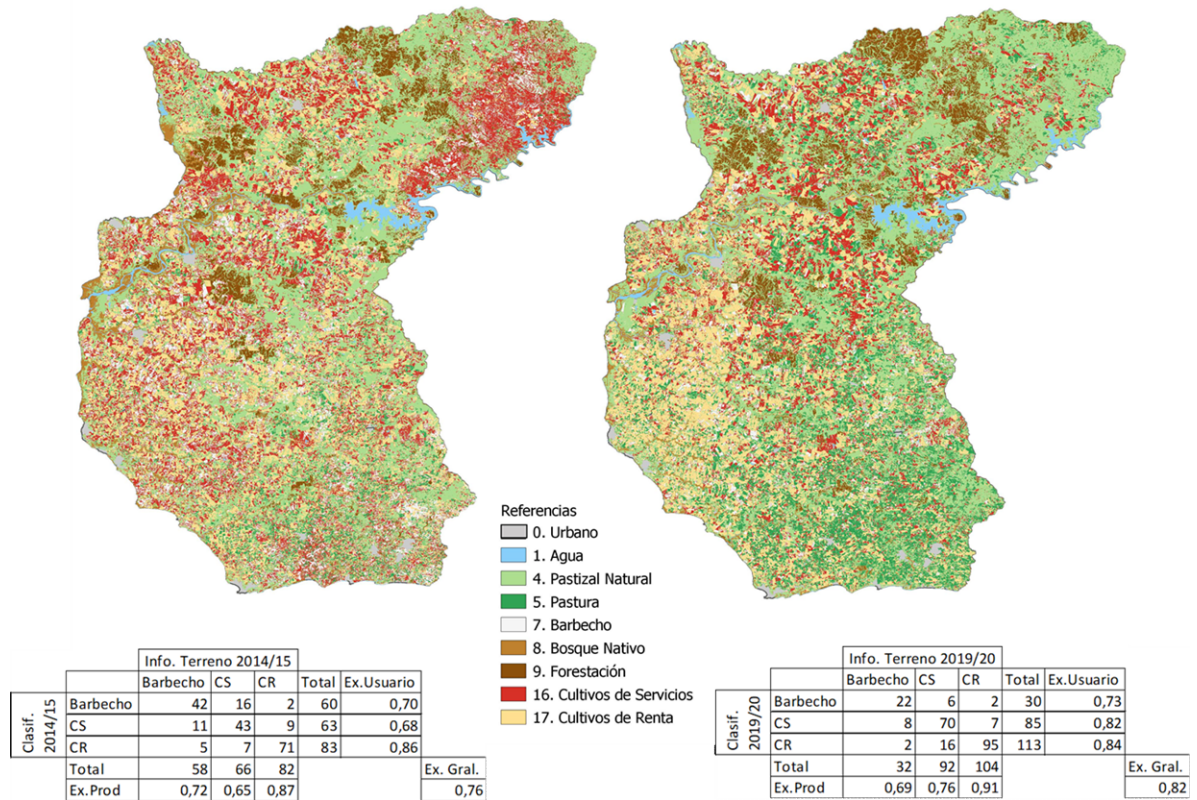


Figura 3. Mapas con clasificación final de las campañas 2014/15 y 2019/20 acompañados por la matriz de confusión correspondiente donde se analizan las clases del Nivel 3 de invierno.

La asignación de cada pixel a una clase depende de los atributos considerados y los errores observados pueden estar asociados a diferencias en el comportamiento de cada cobertura dentro de los lotes. En estas clasificaciones se utilizó un espacio de atributos con muchas bandas, una de ellas el NDVI, que permite relacionar directamente con la fenología de los cultivos y comprender posibles errores. En el caso de los barbechos clasificados como CS podría deberse a que se encontraran enmalezados, presentando un crecimiento previo a la aparición de los CR y con máximos valores de NDVI no muy altos (Figura 4). Con respecto a los CR clasificados como CS podrían ser lotes que presentan un inicio de crecimiento más temprano o alcanzan máximos de NDVI menores a los generales para esa clase durante ese año ya sea por características del lote o de la especie (ver descripción fenológica más adelante). Por el contrario, es correcta la heterogeneidad en la clasificación observada dentro de algunos lotes como en el caso de bordes de lotes, zonas de desagüe o curvas de nivel, ya que efectivamente corresponde a coberturas diferentes. Una posibilidad para reducir este error podría ser evaluar la clasificación incorporando una banda con un modelo

digital de elevación (DEM). Para todas las clases, se debe tener presente que también existen píxeles que pueden abarcar más de una cobertura, a pesar de tener una resolución espacial mayor que en otros sensores como MODIS.

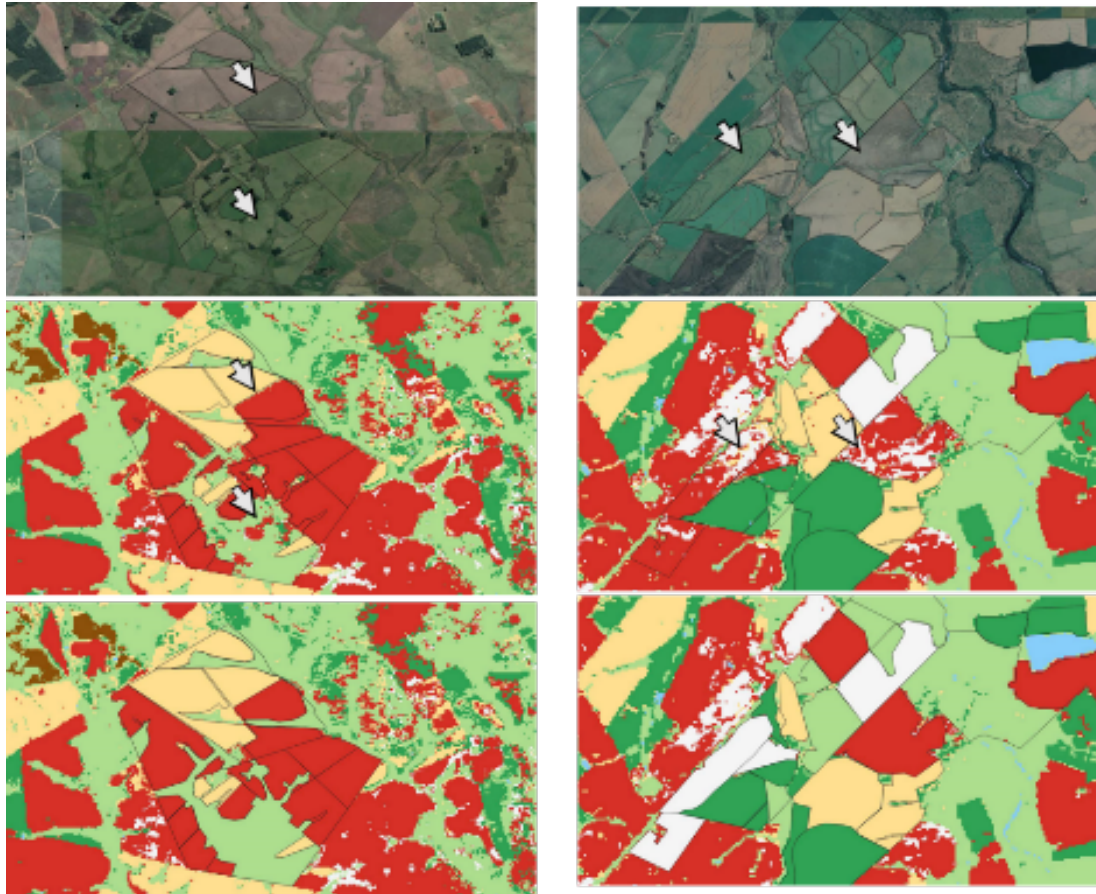


Figura 4. Ejemplos de errores de clasificación observados. En cada columna se observa de arriba hacia abajo: imagen de alta resolución, clasificación obtenida y lotes con la cobertura informada para esa campaña. Las coberturas de Nivel 3 son: CS en rojo, CR amarillo, barbecho en blanco. Las flechas señalan ejemplos de errores citados en el texto.

Nuestras clasificaciones muestran una disminución en el área de agricultura de invierno (cultivos de renta, de servicios y barbechos) en toda el área de estudio (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y también en cada uno de los tres departamentos estudiados (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Tendencias similares fueron reportadas por las encuestas de la Dirección de Investigaciones Económicas y Agropecuarias (DIEA) del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay a nivel país, como se detalla más adelante (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Río Negro presenta la mayor reducción en superficie en el periodo analizado

(ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por otra parte, al analizar las tres clases individualmente (barbecho, CS, CR) en el total del área de estudio, también disminuyen las superficies de barbecho y CS, mientras que CR se mantiene estable con algunas fluctuaciones (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El comportamiento es similar dentro de cada departamento para las dos primeras coberturas, pero es levemente diferente para CR en Soriano y Colonia, donde se observa un leve en aumento con fluctuaciones entre campañas. (Tabla 3 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

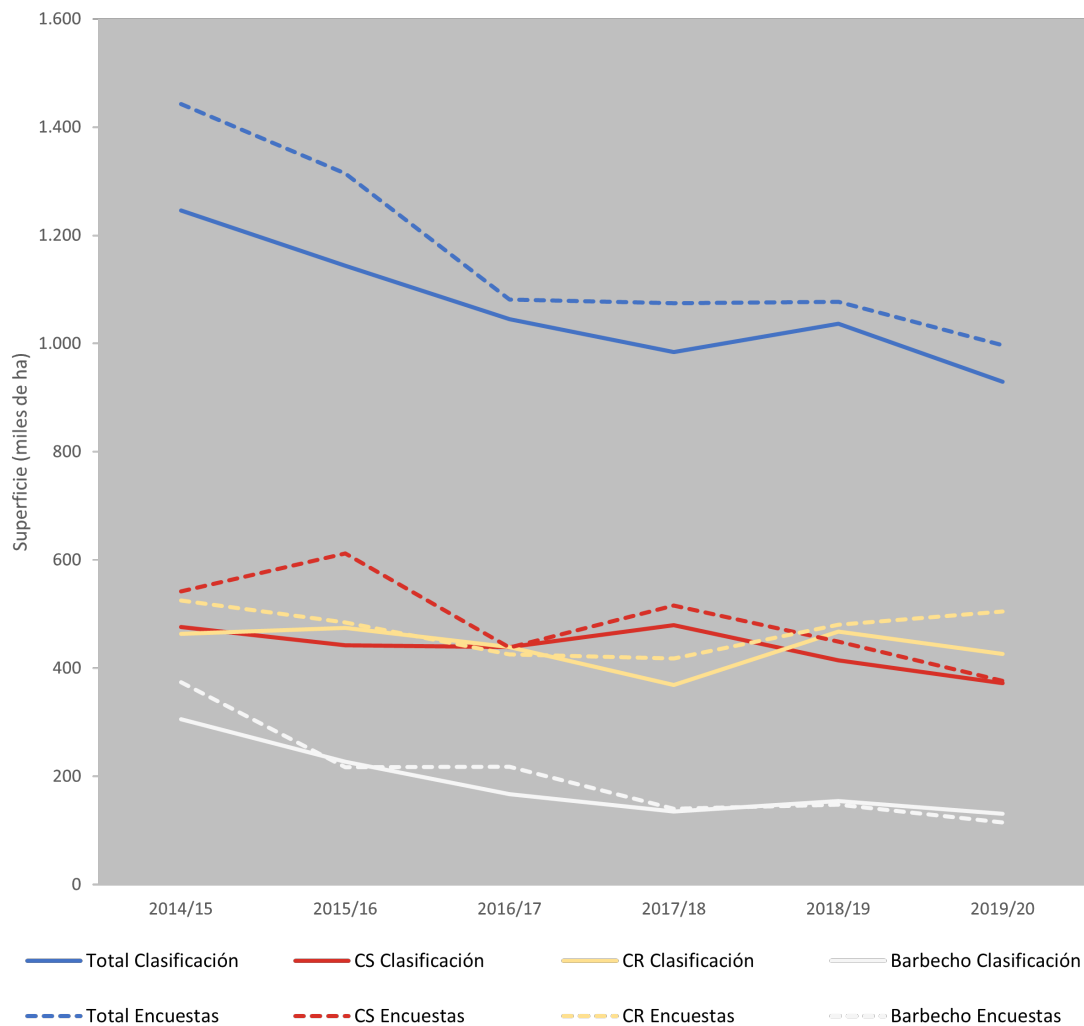


Figura 5. Comparación entre las superficies obtenidas en la clasificación para el área de estudio (línea entera) y la información de las encuestas a nivel país (línea punteada).

A pesar de los beneficios que aportan en el mediano y largo plazo los CS, la participación de estos tanto en porcentaje como en superficie presenta en valores relativamente estables, con tendencia a la baja en el área de estudio (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Esto podría deberse a que su implantación responde a los requerimientos legales, pero el productor prioriza los resultados inmediatos de los CR eligiendo estos últimos cuando puede hacerlo. Asimismo, el porcentaje de lotes en barbecho, es decir sin cultivos de invierno, ha ido en descenso (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

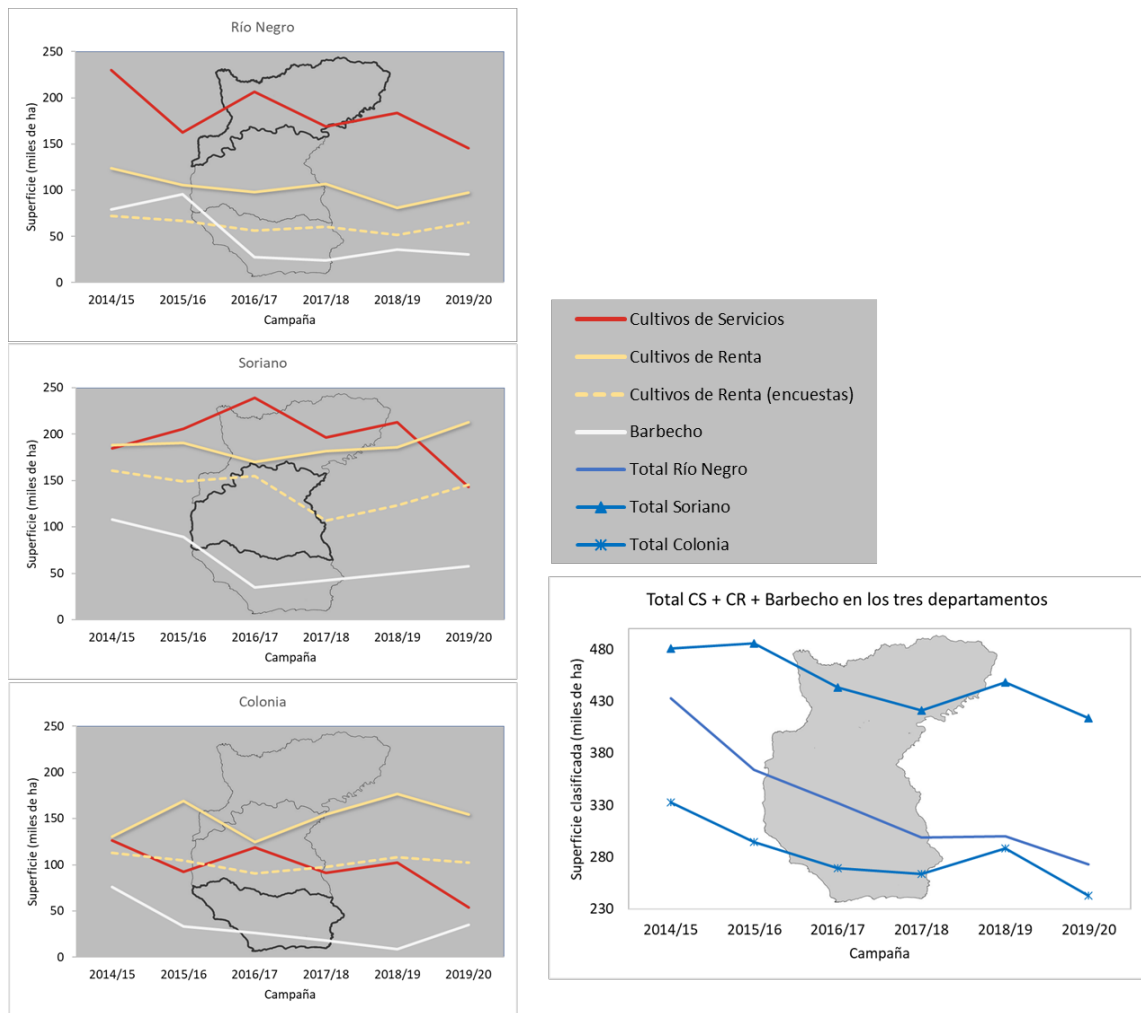


Figura 6. Evolución de la superficie obtenida en la clasificación (líneas enteras) y en encuestas (línea punteada). Izquierda: detalle de cada cobertura, derecha: superficie total agrícola ocupada con barbecho, CS y CR para cada departamento.

Tabla 3. Evolución de la superficie obtenida en la clasificación y comparación con CR en encuestas. * Superficie estimada: Se calcularon los porcentajes que representó cada departamento en la campaña 2019/20; se tomaron los mismos como constantes para aplicar sobre los totales del país en las encuestas de invierno en las demás campañas.

Clasificación (ha)	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20
Cultivos de Renta RN	123.622	105.499	97.785	106.541	80.637	97.112
CR RN encuestas	71.942 *	66.793 *	56.255 *	60.555 *	51.327 *	65.238
Cultivos de Servicios RN	229.711	162.721	206.764	168.780	183.503	145.544
Barbecho RN	79.314	95.606	27.692	23.785	35.721	30.535
Total Río Negro	432.647	363.825	332.241	299.105	299.861	273.192
Cultivos de Renta Sor	187.851	190.673	169.724	181.887	185.526	212.722
CR Sor encuestas	160.367 *	148.891 *	154.636 *	106.853 *	123.341 *	145.424
Cultivos de Servicios Sor	184.766	205.944	239.042	196.515	212.707	143.053
Barbecho Sor	108.000	89.304	34.705	42.619	50.212	57.677
Total Soriano	480.618	485.921	443.471	421.021	448.445	413.451
Cultivos de Renta Col	130.258	169.032	124.427	154.672	176.885	154.185
CR Col encuestas	112.698 *	104.633 *	90.717 *	97.739 *	108.410 *	102.197
Cultivos de Servicios Col	126.239	92.161	118.696	91.414	102.253	53.875
Barbecho Col	76.066	33.120	26.288	17.926	8.924	34.914
Total Colonia	332.563	294.314	269.412	264.013	288.062	242.973
Total anual clasificado	1.245.828	1.144.060	1.045.124	984.139	1.036.368	929.616

Las superficies de las coberturas analizadas presentan similitudes con otras fuentes de información en cuanto a tendencias y proporciones, pero las áreas absolutas estimadas por nuestra calificación son mayores a las reportadas por las distintas fuentes de datos oficiales. En coincidencia con las encuestas nacionales, la superficie clasificada total disminuye entre las campañas 2014/15 y 2019/20 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** líneas azules). El comportamiento del total de cada cobertura también es coincidente entre nuestra clasificación y las encuestas, siendo mejor el ajuste considerando los valores corregidos por el método de Olofsson (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** líneas rojas, amarillas y blancas) (ver Tabla A 1. Superficie obtenida en la clasificación (ha) y corregida por el método de Olofsson (ha) e intervalo de confianza Tabla A 1 en Anexo). Asimismo, se mantienen las proporciones entre coberturas de las clasificaciones al comparar los datos crudos y corregidos (nivel regional), respecto de las encuestas (datos totales a nivel país) e información de campos CREA (datos a nivel local con una superficie reducida) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En general el porcentaje de barbecho es mayor en las clasificaciones, lo cual se revierte con la corrección de Olofsson obteniendo una distribución similar a la de las encuestas. Los datos de campo presentan una distribución similar a las encuestas a excepción de los dos primeros años. (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Sin embargo, la clasificación como superficie agrícola invernal en hectáreas, representa valores tan altos como 86 a 96% del

total del país. Por otra parte, las superficies clasificadas como CR superan a las encuestas (dato en la última campaña y estimación en campañas previas). (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

La sobreestimación de las áreas clasificadas respecto de las estimaciones oficiales también ha sido reportada con anterioridad en otros trabajos. Se han mencionado inconsistencias en las estimaciones oficiales que podrían originarse en la “subestimación de la superficie sembrada y/o cosechada y sean producto de las dificultades impuestas por la metodología” (Castagna and García, 2020; Hoffman and Castro, 2013).

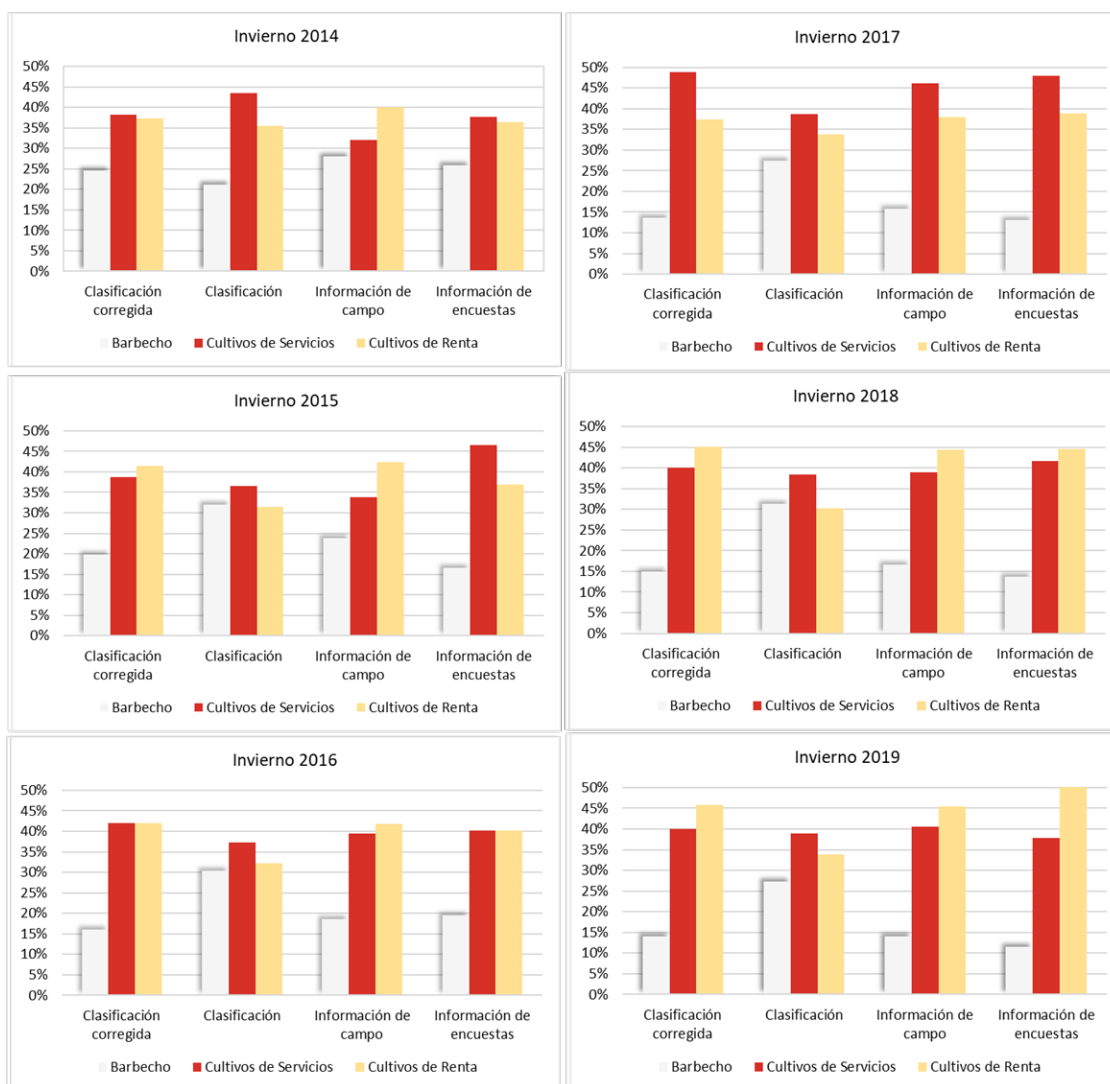


Figura 7. Comparación de los porcentajes de cada cobertura (barbecho, CS, CR) correspondientes a distintas fuentes de información: a) clasificación (datos corregidos por método de Olofsson et al., 2014 y sin corregir), b) datos de los campos FUCREA y c) información de encuestas (a nivel país). Se presenta un gráfico por cada año analizado.

Descripción fenológica de las distintas coberturas de invierno

Al caracterizar cada clase de cobertura de invierno según su firma fenológica se observa que presentan características que permiten diferenciarlas entre sí a pesar de la variabilidad dentro de cada una (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en Anexo Figura A 7 a Figura A 12). En general, los CS aumentan sus valores de NDVI antes que los CR, solo en los dos primeros años los CR de Avena presentan un crecimiento adelantado similar a los CS. Asimismo, los CS alcanzan su valor máximo de NDVI alrededor de dos meses antes que los CR y siendo el mismo de menor magnitud. De este modo, la firma fenológica de los CS muestra cómo esta cobertura colabora a reducir el lapso de tiempo con suelo descubierto entre la cosecha de un cultivo de verano y el cultivo siguiente. Dentro de los CR, las dicotiledóneas presentan los valores de NDVI máximos más bajos. La mayor variabilidad dentro de los CR corresponde en general a la cobertura que incluye avena y raigras. En contraposición a las coberturas anuales, los pastizales naturales y pasturas perennes presentan valores de NDVI más estables a lo largo del año. Los barbechos presentan los menores valores de NDVI pero una alta variabilidad, probablemente asociados a su grado de enmalezamiento.

La dispersión observada en las curvas fenológicas de las distintas coberturas puede obedecer a distintos factores, entre ellos, que los píxeles seleccionados incluyan no solo la cobertura modal del lote, sino también otras coberturas menores. Por ejemplo, en algunos campos existen desagües incluidos dentro de los lotes que en años secos se cultivan, pero no así en años húmedos. De este modo un píxel MODIS puede incluir más de una cobertura dependiendo del año. Por otra parte, pueden existir barbechos muy enmalezados y otros que no, lo que se traduce en un comportamiento espectral diferente. Otra fuente de heterogeneidad se relaciona con el manejo, por ejemplo, un lote fertilizado o con un suelo con menos limitantes permitirá un mayor desarrollo de un mismo cultivo que si se encontrara en condiciones diferentes. También influye la magnitud de las precipitaciones, así por ejemplo en una campaña como la 2017/2018 en la cual las precipitaciones fueron mucho más importantes en el norte de la zona de estudio que en el sur y por lo tanto es esperable que una misma cobertura presente un desarrollo diferente entre ambas subregiones.

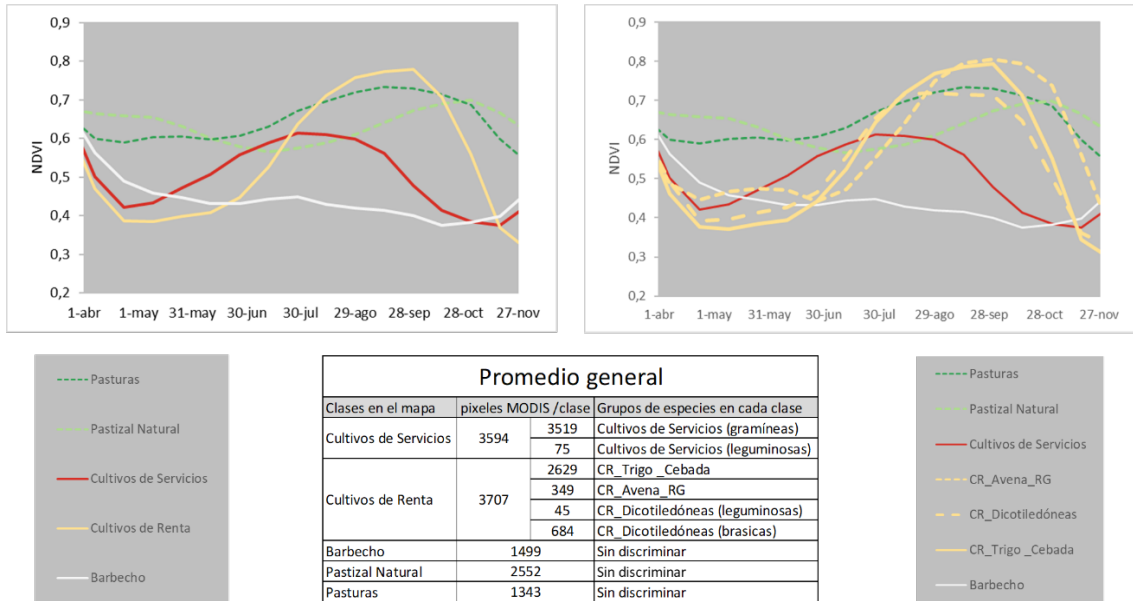


Figura 8. Firma fenológica promedio de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura. Las curvas correspondientes a cada año se encuentran en el Anexo, Figura A 7 a Figura A 12

Las clases de coberturas identificadas en el Nivel 3 se componen de distintas especies de cultivos que pueden diferir en su comportamiento fenológico. Los CS se componen casi exclusivamente de gramíneas, solo en algunos años y más recientemente aparecen especies leguminosas de modo no significativo por lo que no fueron tenidas en cuenta para su análisis por separado (Tabla 1). Dentro de los CR se consideraron de modo agrupado algunas especies de similar comportamiento: a) trigo y cebada, b) avena y raigrás, c) leguminosas y d) brasicas. El primer grupo es el más representativo, razón por la cual la curva promedio de CR se asemeja mayormente a la de trigo-cebada (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en Anexo Figura A 7 a Figura A 12).

Conclusión

Las clasificaciones de imágenes satelitales LANDSAT mediante Random Forest resultaron una metodología económica y precisa (exactitud general de entre 75 y 82 % según campaña) para conocer el cambio en el uso del suelo a lo largo del tiempo en la región agrícola del Litoral uruguayo. Las clasificaciones obtenidas permitieron mapear las distintas coberturas invernales con una buena exactitud general, resultando de utilidad

como información regional, pero requiriendo mayor precisión para un análisis a nivel más detallado. En la zona de estudio se observa heterogeneidad debida al relieve, asociadas a zonas bajas de desagüe que al ser más húmedas permiten un desarrollo diferencial de la vegetación en años secos o húmedos, lo cual genera errores menores en las clasificaciones entre años. Otro factor que genera dificultades en las clasificaciones es la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones que modifica el comportamiento espectral de las coberturas.

Nuestras clasificaciones sugieren que existe una mayor área de cultivos agrícolas que la estimada mediante otras fuentes como las encuestas agropecuarias. A su vez, nuestros resultados muestran, en concordancia con las encuestas agropecuarias, que el área agrícola de invierno está disminuyendo en la región (la suma de los cultivos de renta, de servicios y barbechos) y también en cada uno de los tres departamentos estudiados, entre el 2014 y el 2019. Los barbechos son la cobertura que más han disminuido, pero aún se encuentran unas 120 mil ha bajo este uso en la región. Los cultivos de servicio también disminuyen y los cultivos de renta se mantienen relativamente estables en su área durante el periodo analizado.

El análisis de las firmas fenológicas de cada cobertura estudiada sugiere que existen diferencias en las curvas de cultivos de renta y cultivos de servicios que permiten diferenciarlos y que, por lo tanto, la dinámica de sus tasas de crecimiento (estimadas a partir de NDVI) serían distintas. En este sentido, los CS muestran un período de crecimiento anterior a los cultivos de renta (empiezan antes y terminan antes) y presentan valores máximos de NDVI menores. Sin embargo, se observó una heterogeneidad importante en las firmas fenológicas de las distintas coberturas dentro de un mismo año, tal vez originadas en condiciones ambientales diferentes (precipitaciones, suelos, relieve, manejo) y también entre años, probablemente originadas en las características intrínsecas a cada año en particular (año seco/lluvioso que pudieran afectar tanto el desarrollo del cultivo como cuestiones de manejo como fecha de siembra).

El presente trabajo se encuentra determinado por los datos de entrenamiento, información satelital y métodos de clasificación que pueden significar limitaciones para ser evaluadas o mejoradas en otros trabajos. La base de datos está formada por información de productores, no existe un diseño experimental con datos distribuidos al azar, sin embargo, quedan representadas todas las clases y cubren la mayor parte de la superficie. También existe un desbalance en la representación de las clases, habiendo por ejemplo más datos de los cultivos mayoritarios (Random Forest es sensible a dichos desbalances). Una alternativa a analizar podría ser utilizar alguna técnica para equilibrar las muestras como oversampling, undersampling o asignación de distinto peso a cada clase. Por otra parte, se podría sumar al análisis otras bandas con información sobre relieve y precipitaciones, o utilizar bandas con otras métricas estadísticas además de la mediana, como por ejemplo la amplitud del NDVI,

y/o métricas temporales como el momento del máximo NDVI. También podrían probarse clasificaciones difusas o por objeto en lugar de las clasificaciones a nivel de píxeles realizadas en el presente trabajo.

Bibliografía

- (DIEA), E.A., 2017. Encuesta agrícola “Invierno 2017” Serie Encuestas N°348.
- Abella-Miravet, B., 2021. Mejora de las predicciones en muestras desbalanceadas 35.
- Adetunji, A.T., Ncube, B., Meyer, A.H., Olatunji, O.S., Mulidzi, R., Lewu, F.B., 2021. Soil pH, nitrogen, phosphatase and urease activities in response to cover crop species, termination stage and termination method. *Heliyon* 7, e05980.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05980>
- Adetunji, A.T., Ncube, B., Mulidzi, R., Lewu, F.B., 2020. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. *Soil Tillage Res.* 204, 104717.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104717>
- Alcaraz, D., Paruelo, J., Cabello, J., 2006. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 200–212.
<https://doi.org/10.1111/j.1466-822x.2006.00215.x>
- Arbeletche, P., Ernst, O., Hoffman, E., 2010. La Agricultura en Uruguay y su Evolución, in: *Intensificación Agrícola: Oportunidades y Amenazas Para Un País Productivo y Natural*. Capítulo 1. p. 16.
- Baeza, S., Baldassini, P., Bagnato, C., Pinto, P., Paruelo, J.M., 2014. Caracterización del uso / cobertura del suelo en Uruguay a partir de series temporales de imágenes MODIS Land Use / Land Cover Classification in Uruguay Using Time Series of MODIS Images. *Agrociencia Uruguay* 18, 95–105.
- 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 Sens.* 12, 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs12030381>
- Brazeiro, A., Gutierrez, O., 2012. ECO-REGIONES DE URUGUAY.
- Castagna, A., García, F., 2020. Análisis de los cambios en el uso de la tierra a partir de una serie temporal de relevamientos remotos. *Anu. OPYPA* 28, 621–634.
- Clark, M.L., Aide, T.M., Grau, H.R., Riner, G., 2010. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. *Remote Sens. Environ.* 114, 2816–2832.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.001>
- Didan, K., 2015. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. DAAC, NASA EOSDIS L. Process.
<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>
- Durán, A., Califra, A., Molfino, J.H., 1999. Suelos del uruguay según soil taxonomy [Uruguayan soils classified using USDA soil Taxonomy] 1–14.

- Hansen, M.C., Sohlberg, R., Defries, R.S., Townshend, J.R.G., 2000. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *Int. J. Remote Sens.* 21, 1331–1364. <https://doi.org/10.1080/014311600210209>
- Hoffman, E., Castro, A., 2013. Área agrícola y superficie cultivada anualmente en Uruguay : implicancias de las diferencias en los números oficiales . *Agrociencia* 12–18.
- Ministerio de Agroindustria, n.d. Método de Segmentos Aleatorios - Metodología Para La Estimación De La Superficie Sembrada Con Cultivos Extensivos.
- MVOTMA-DINOT, 2015. Atlas de Cobertura del Suelo de Uruguay. Cobertura de Suelo y Cambios 2000-2011.
- Olofsson, P., Foody, G.M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C.E., Wulder, M.A., 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sens. Environ.* 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Orellana Alvear, J., n.d. Arboles de decision y Random Forest [WWW Document]. URL <https://bookdown.org/content/2031/>
- Paruelo, J.M., Jobbágy, E.G., Sala, O.E., 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems* 4, 683–698. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0037-9>
- Petraglia, C., Dell’Acqua, M., Pereira, G., Yussim, E., 2019. Mapa integrado de cobertura/ uso del suelo del Uruguay, año 2018. *Anu. OPYPA* 27, 523–531.
- Pinto, P., Fernández Long, M.E., Piñeiro, G., 2017. Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of Southern South America? *Agric. Ecosyst. Environ.* 248, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.028>
- Tucker, C.J., Townshend, J.R.G., Goff, T.E., 1985. African land-cover classification using satellite data. *Science* (80-.). 227, 369–375. <https://doi.org/10.1126/science.227.4685.369>
- Weiss, M., Jacob, F., Duveiller, G., 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sens. Environ.* 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>

Anexo

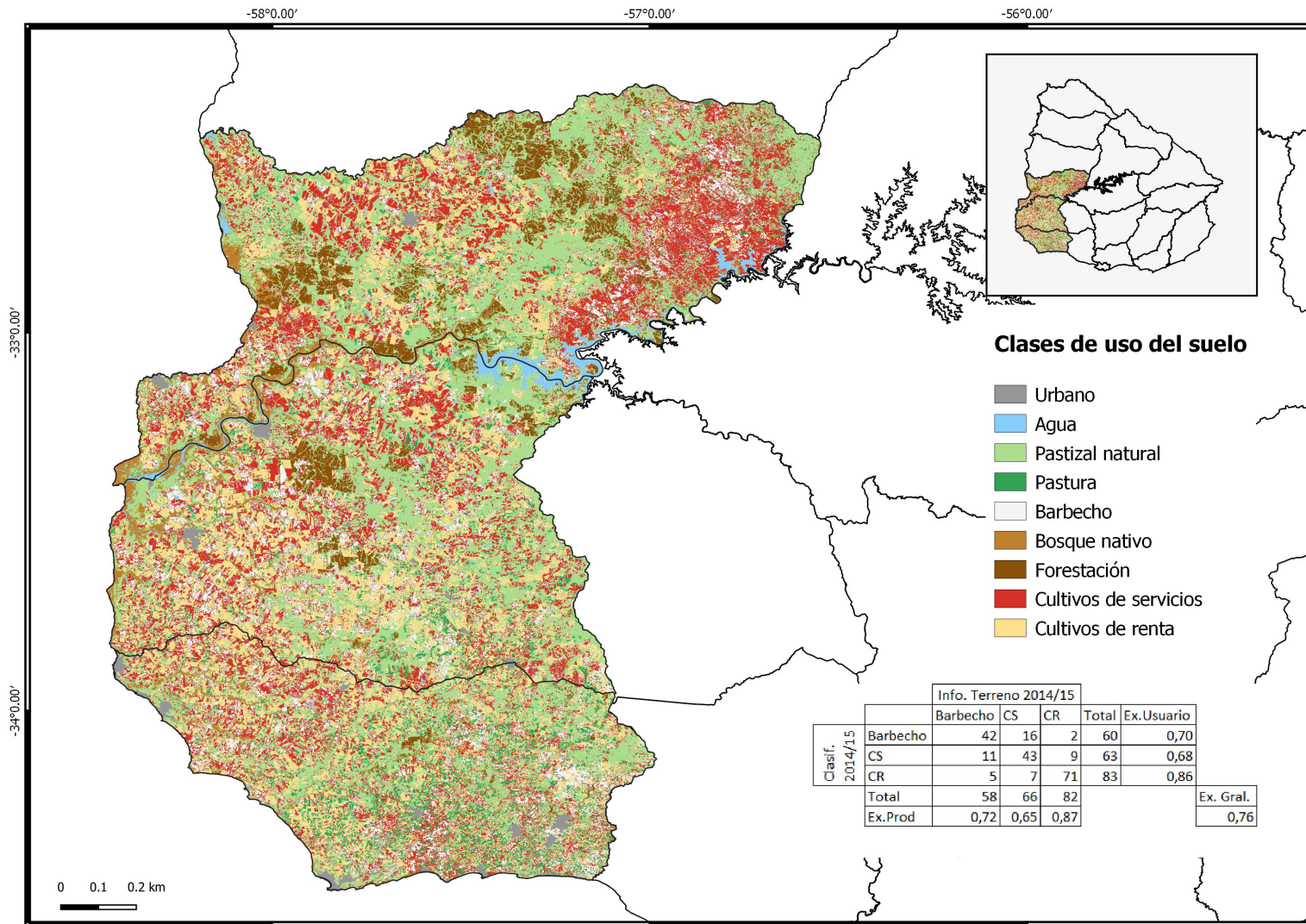


Figura A 1. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2014/15

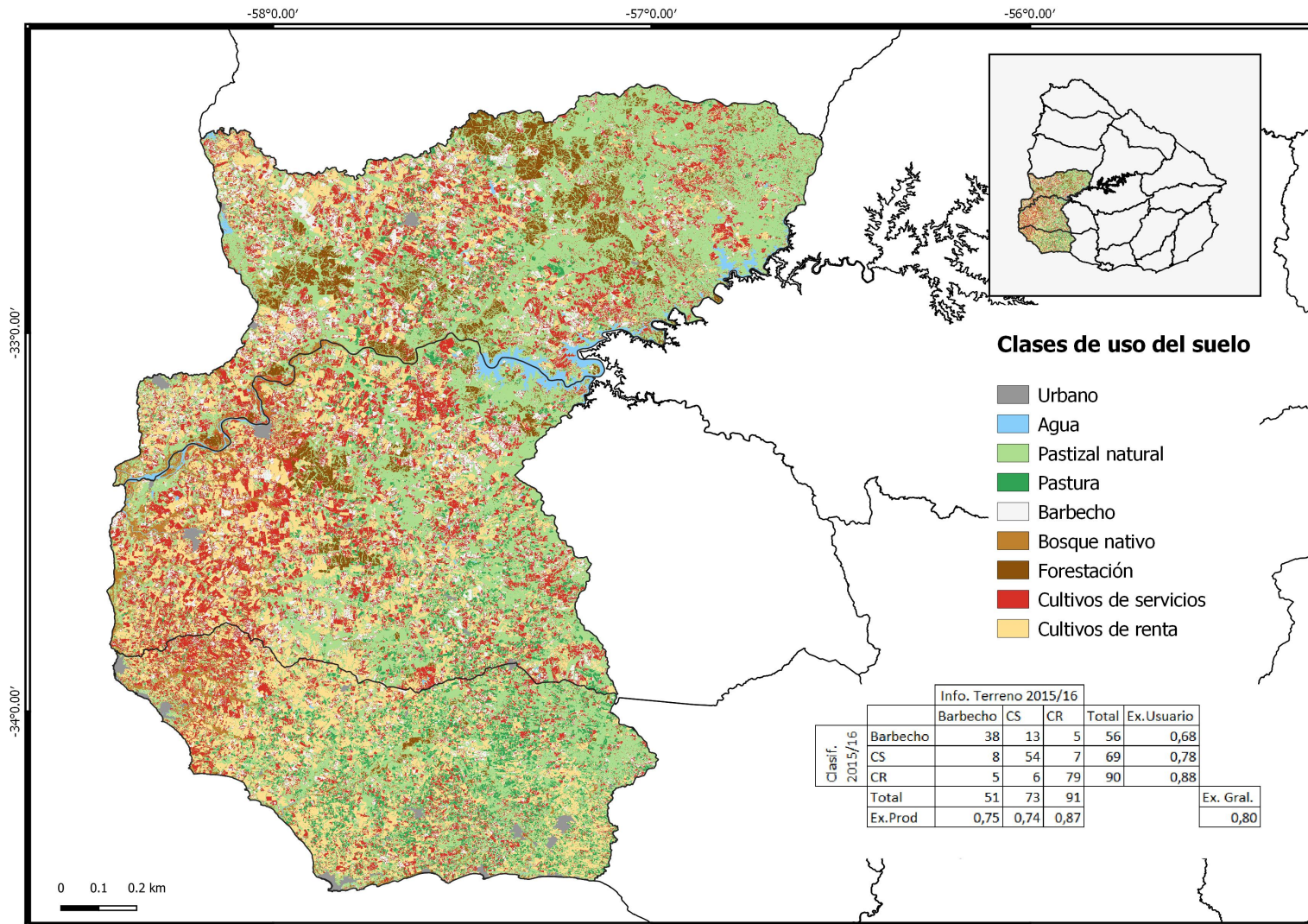


Figura A 2. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2015/16

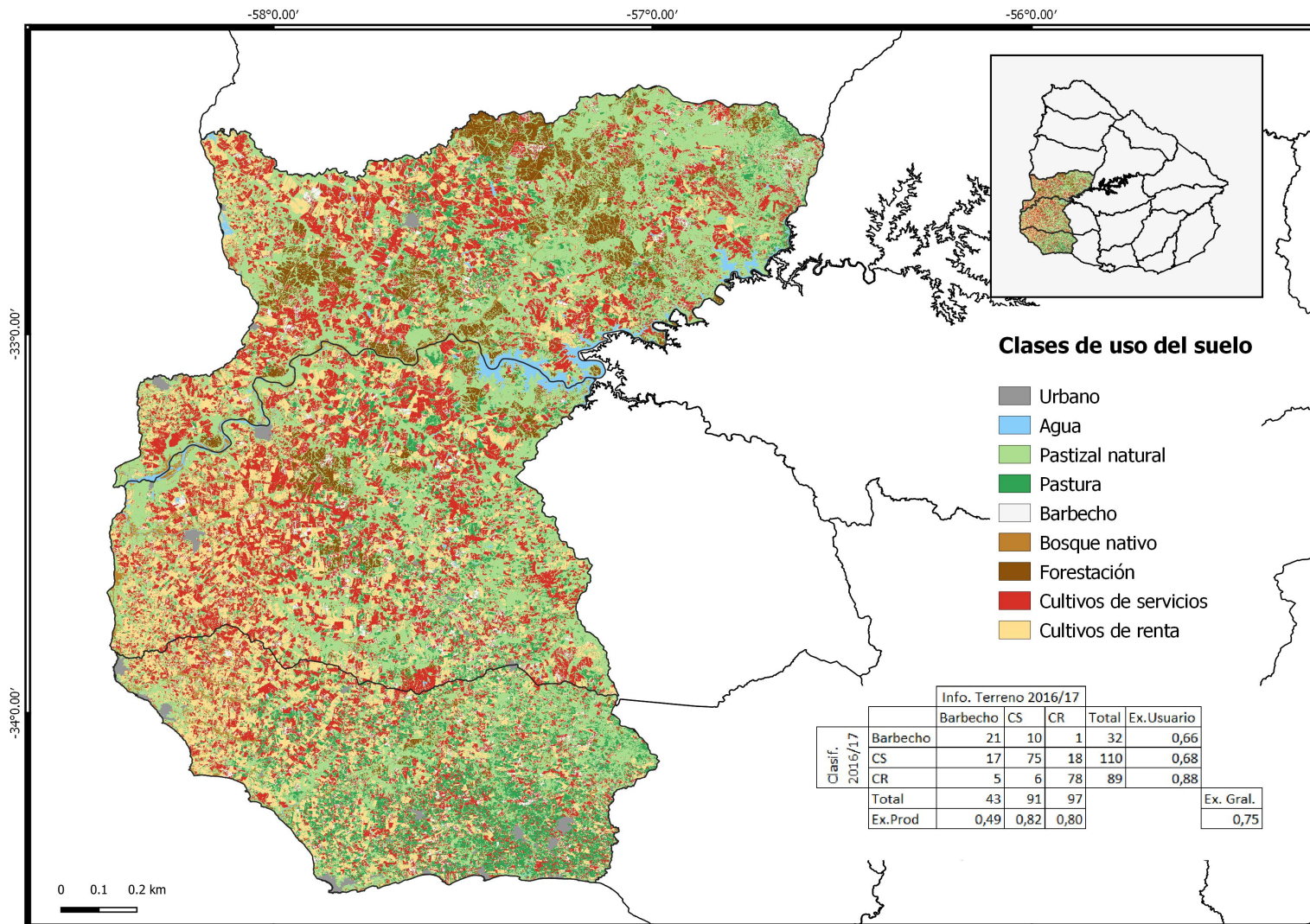


Figura A 3. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2016/17

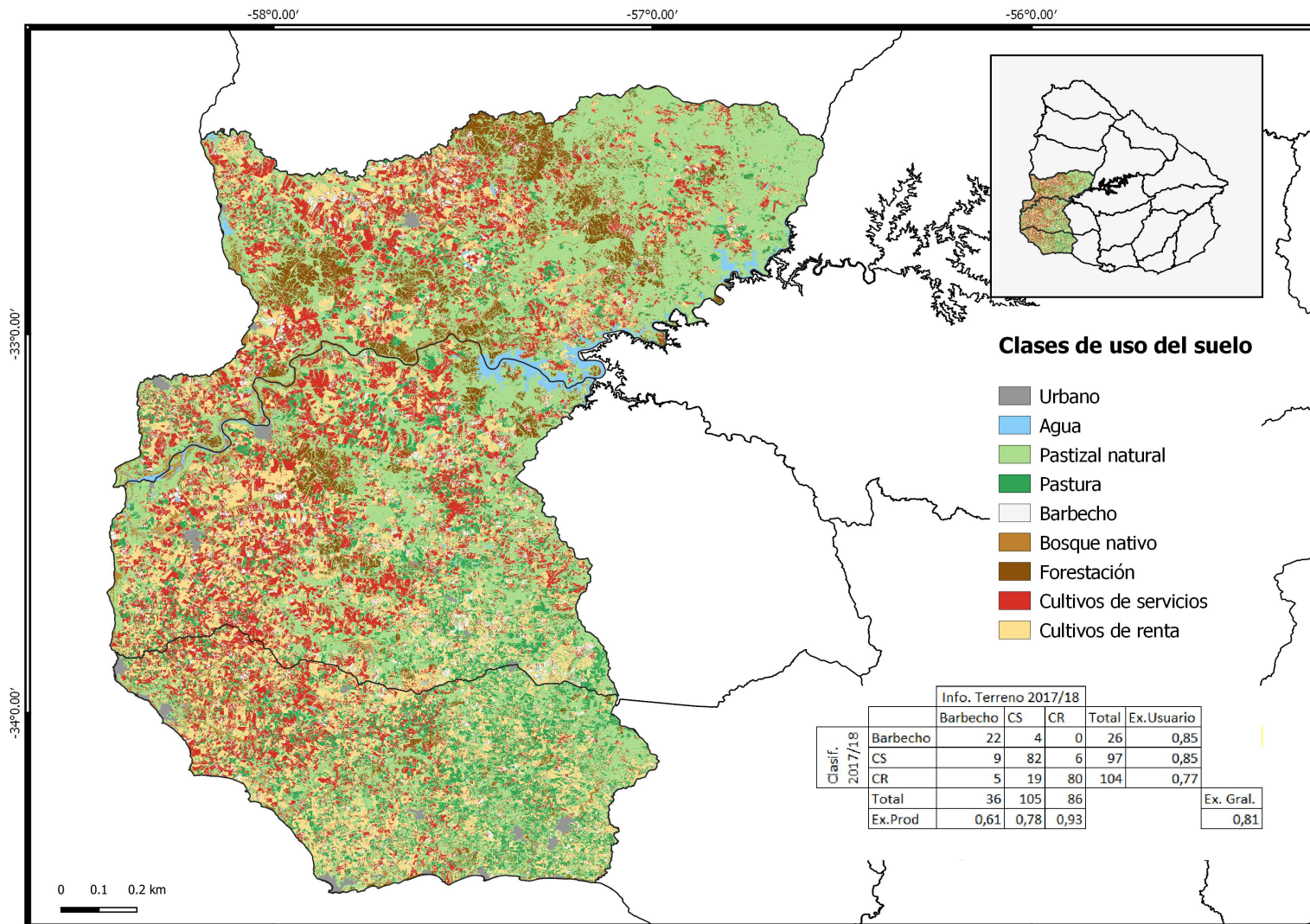


Figura A 4. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2017/18

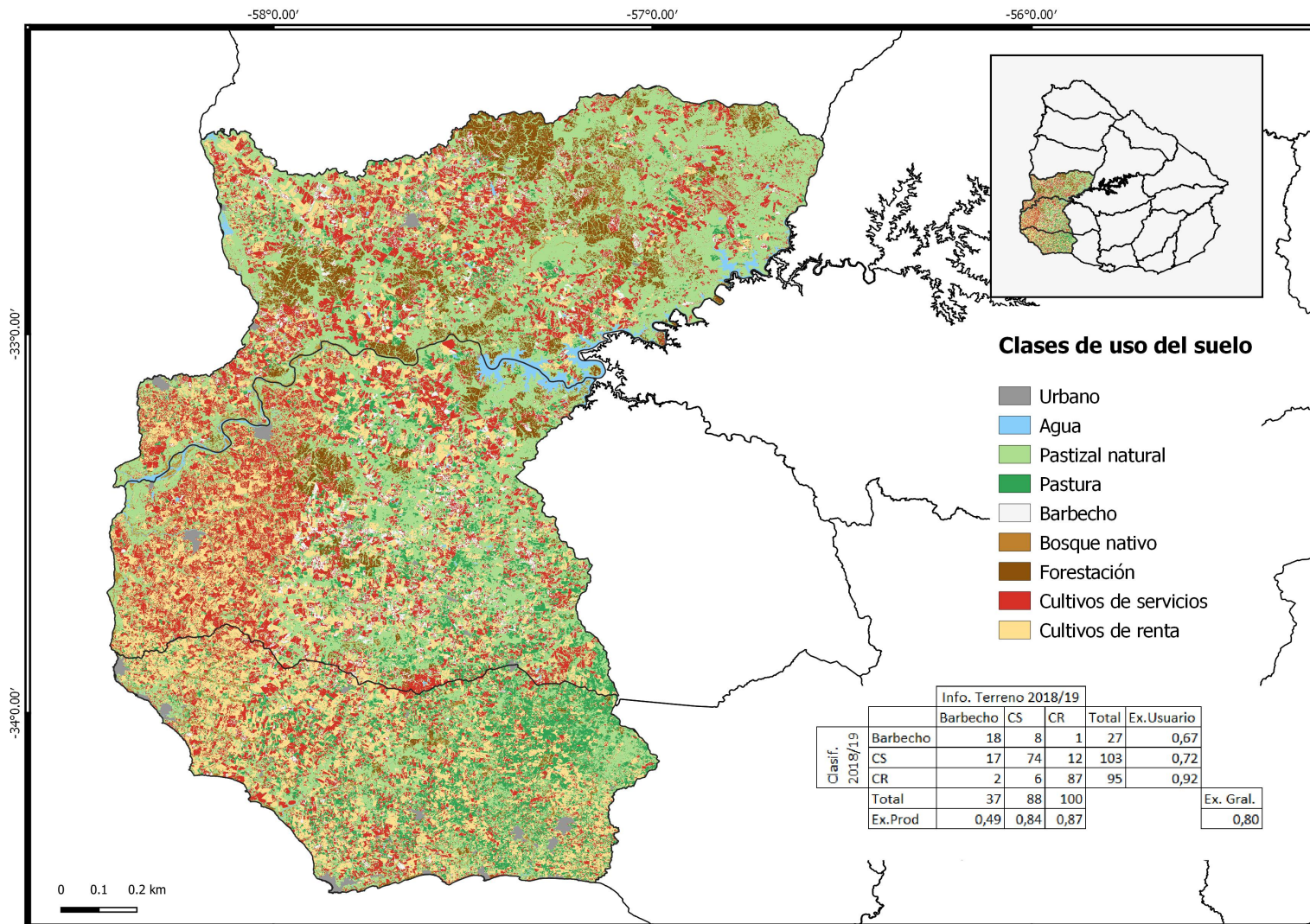


Figura A 5. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2018/19

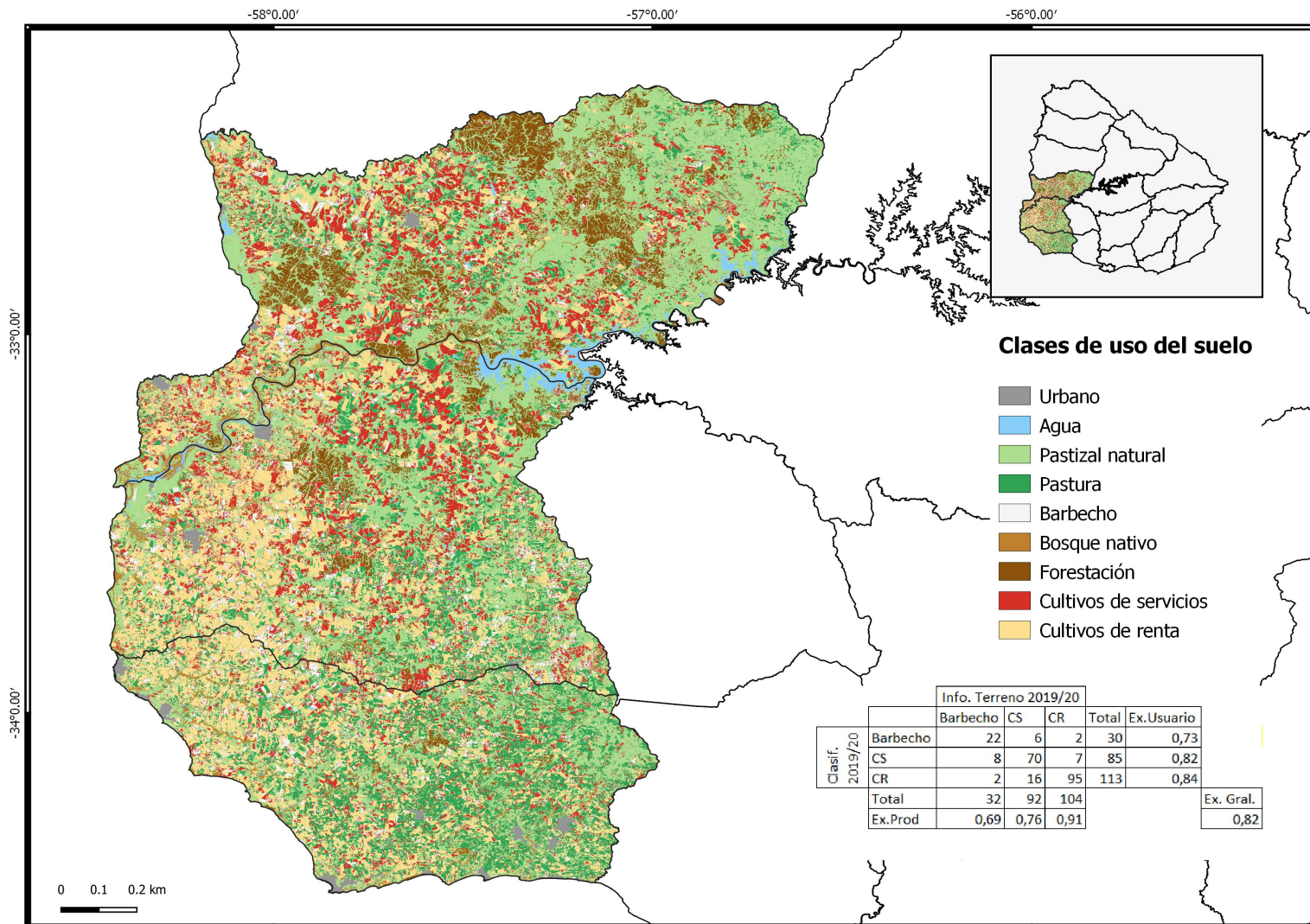


Figura A 6. Mapa de clasificación y matriz de confusión, campaña 2019/20

Clase	Olofsson		Superficie clasificada (ha)	
	Area (ha)	± 95% CI		
Barbecho	305.387	63.850	263.380	2014
Cultivos de Servicios	476.550	74.260	540.716	
Cultivos de Renta	463.891	59.113	441.732	
Barbecho	227.222	49.437	218.029	2015
Cultivos de Servicios	442.274	56.694	460.826	
Cultivos de Renta	474.563	48.639	465.204	
Barbecho	167.461	45.198	88.687	2016
Cultivos de Servicios	439.025	55.385	564.503	
Cultivos de Renta	438.638	47.885	391.935	
Barbecho	135.034	34.351	84.330	2017
Cultivos de Servicios	480.009	48.237	456.709	
Cultivos de Renta	369.096	42.241	443.100	
Barbecho	154.836	41.837	94.857	2018
Cultivos de Servicios	414.207	51.427	498.463	
Cultivos de Renta	467.325	40.364	443.048	
Barbecho	130.738	31.280	123.126	2019
Cultivos de Servicios	372.362	44.704	342.471	
Cultivos de Renta	426.517	38.979	464.019	

Tabla A 1. Superficie obtenida en la clasificación (ha) y corregida por el método de Olofsson (ha) e intervalo de confianza

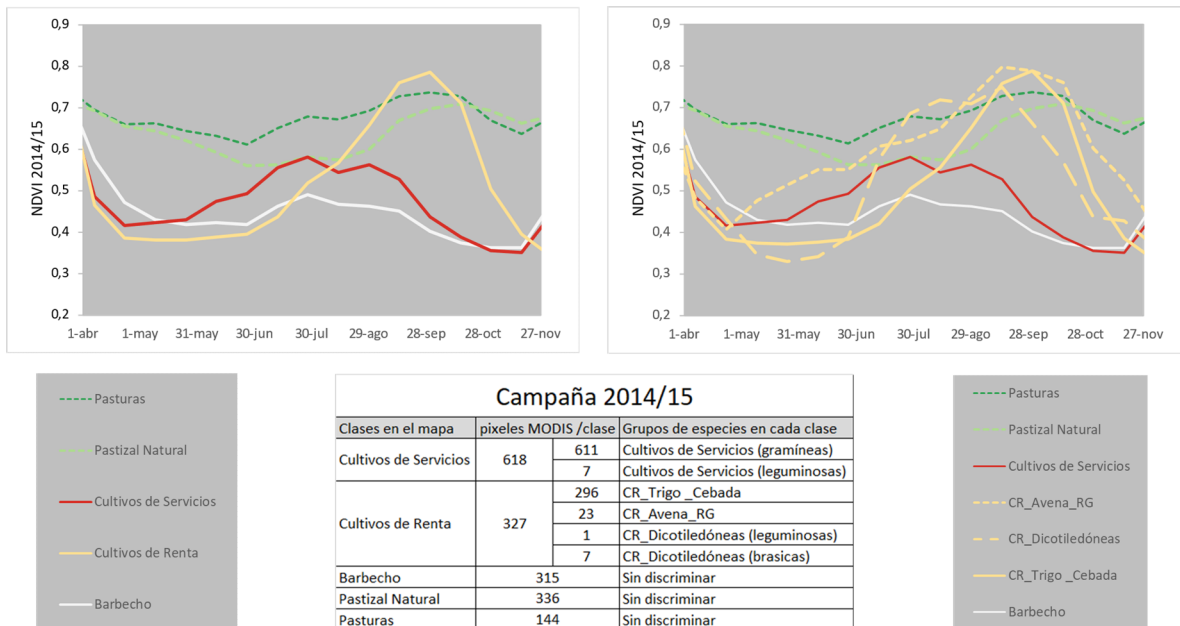


Figura A 7. Firma fenológica promedio para la campaña 2014/15, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.

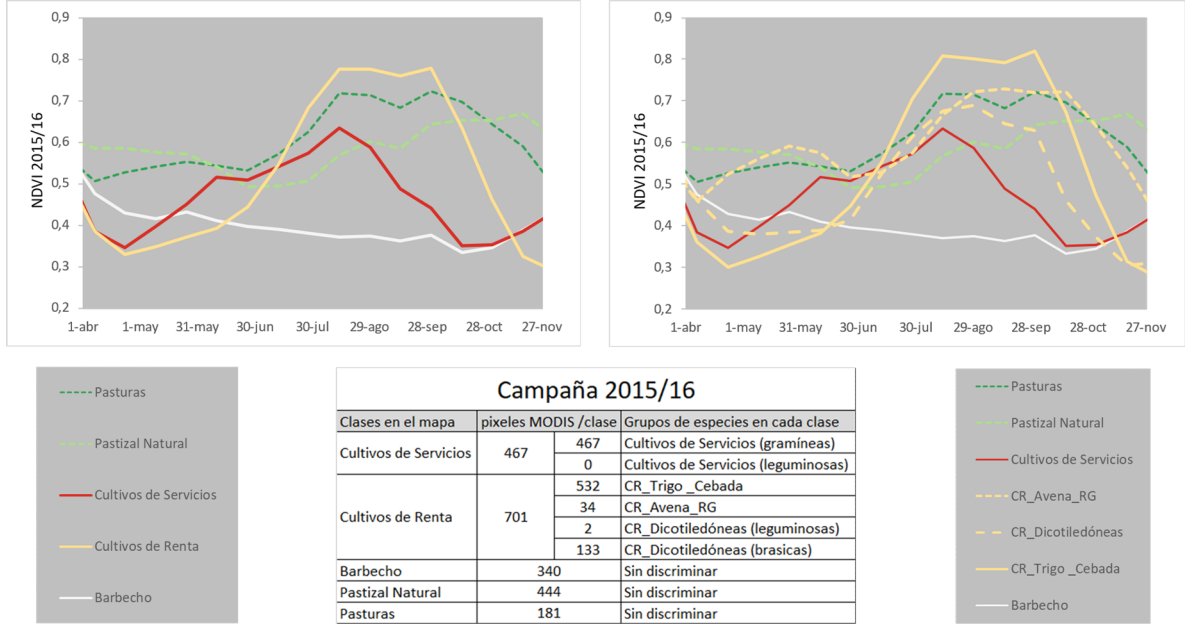


Figura A 8. Firma fenológica promedio para la campaña 2015/16, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.

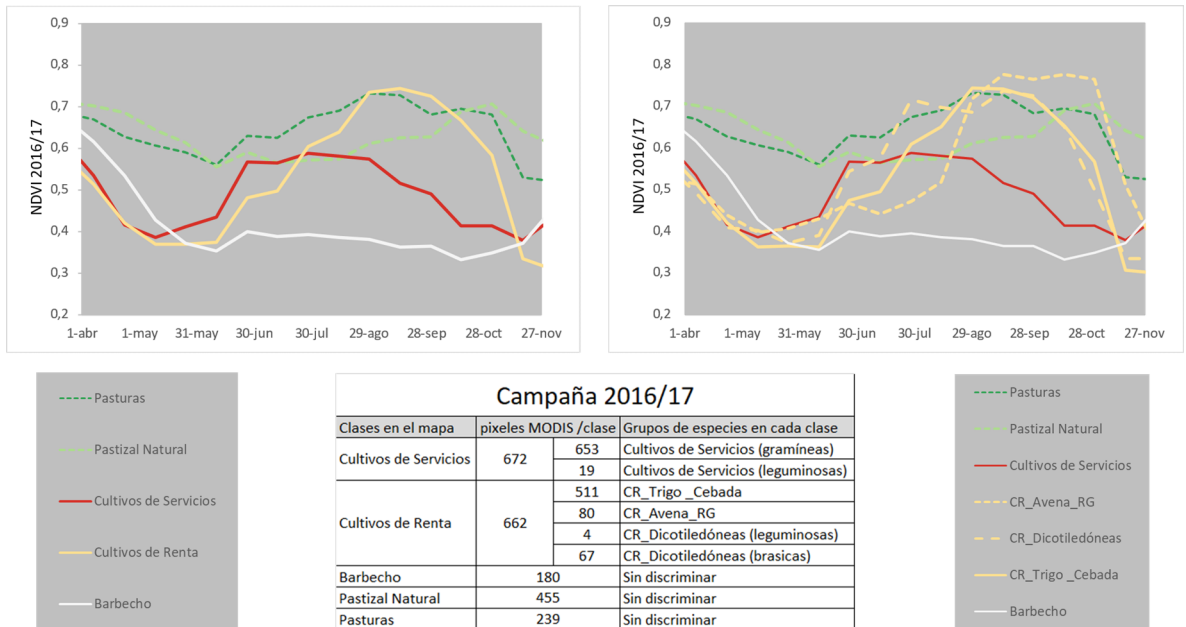


Figura A 9. Firma fenológica promedio para la campaña 2016/17, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.

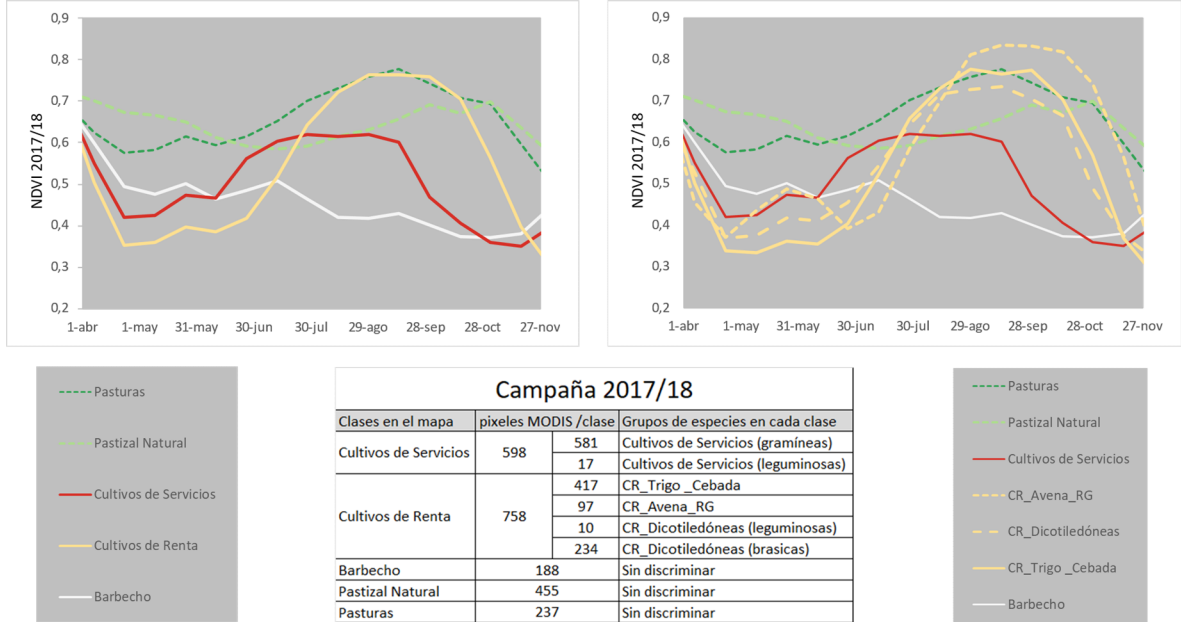


Figura A 10. Firma fenológica promedio para la campaña 2017/18, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.

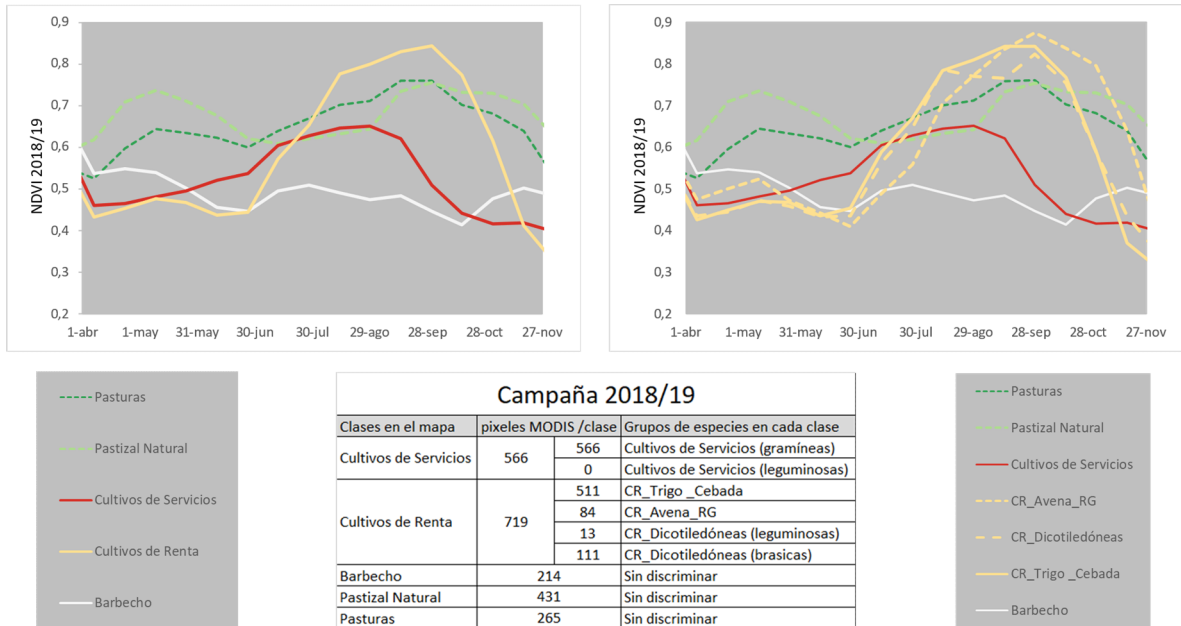


Figura A 11. Firma fenológica promedio para la campaña 2018/19, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.

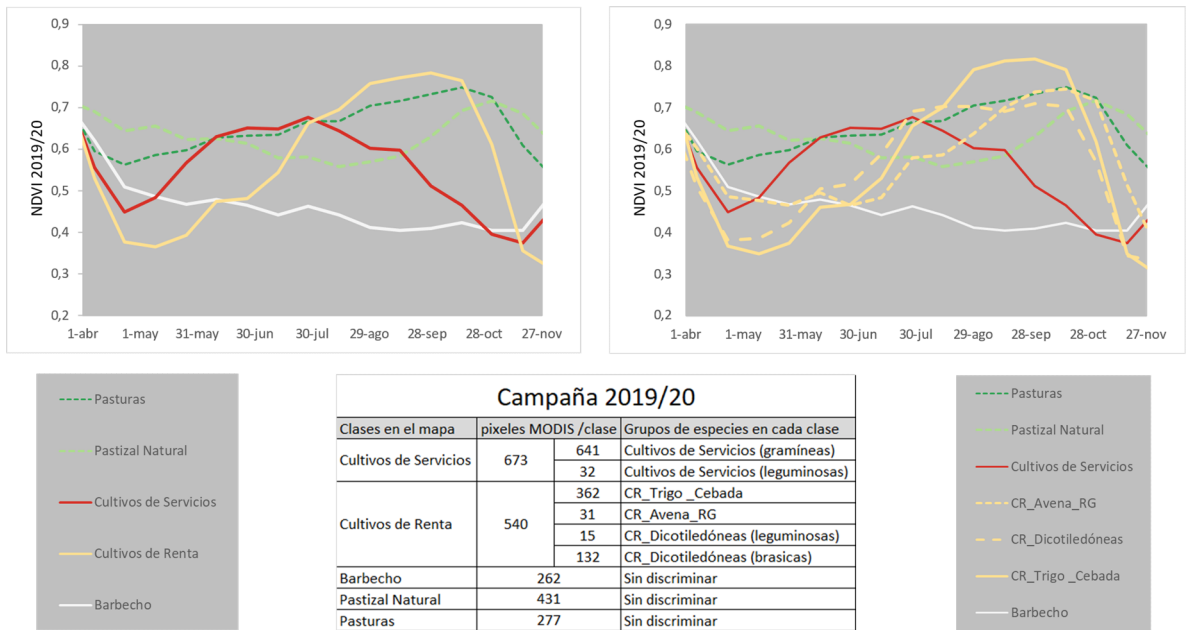


Figura A 12. Firma fenológica promedio para la campaña 2019/20, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.

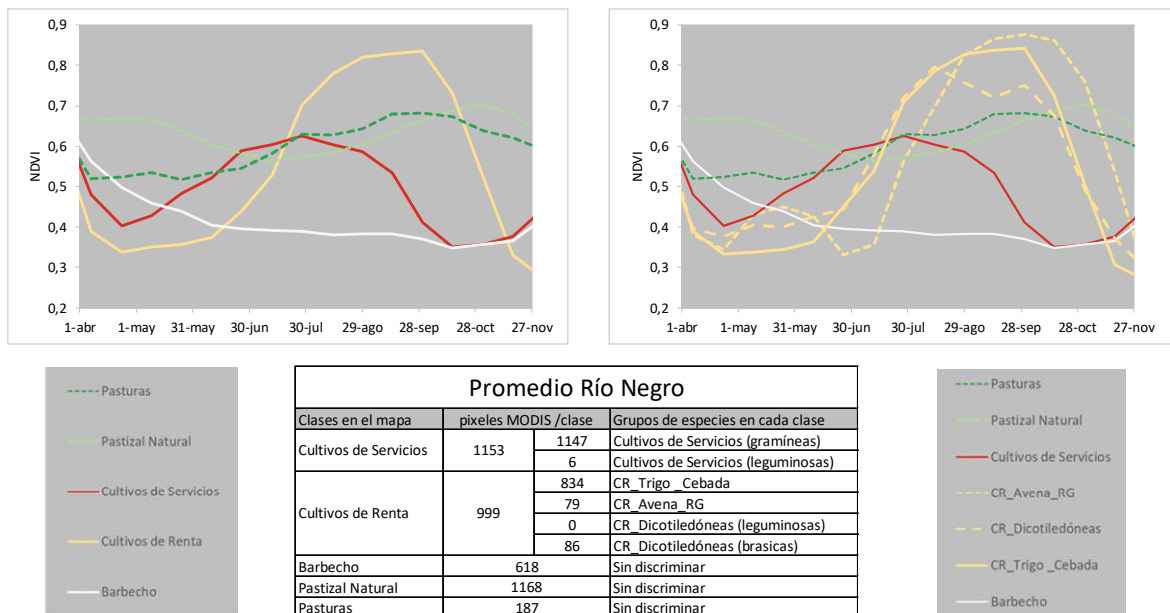


Figura A 13. Firma fenológica promedio de todas las campañas para el departamento de Río Negro, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de píxeles considerados en cada cobertura.

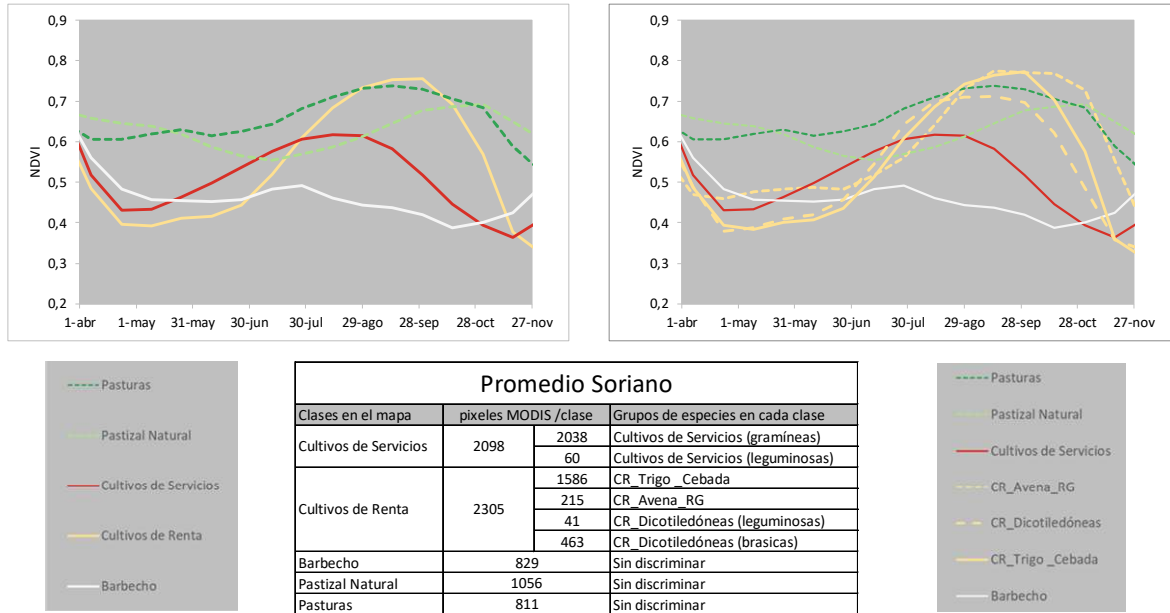


Figura A 14. Firma fenológica promedio de todas las campañas para el departamento de Soriano, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de pixeles considerados en cada cobertura

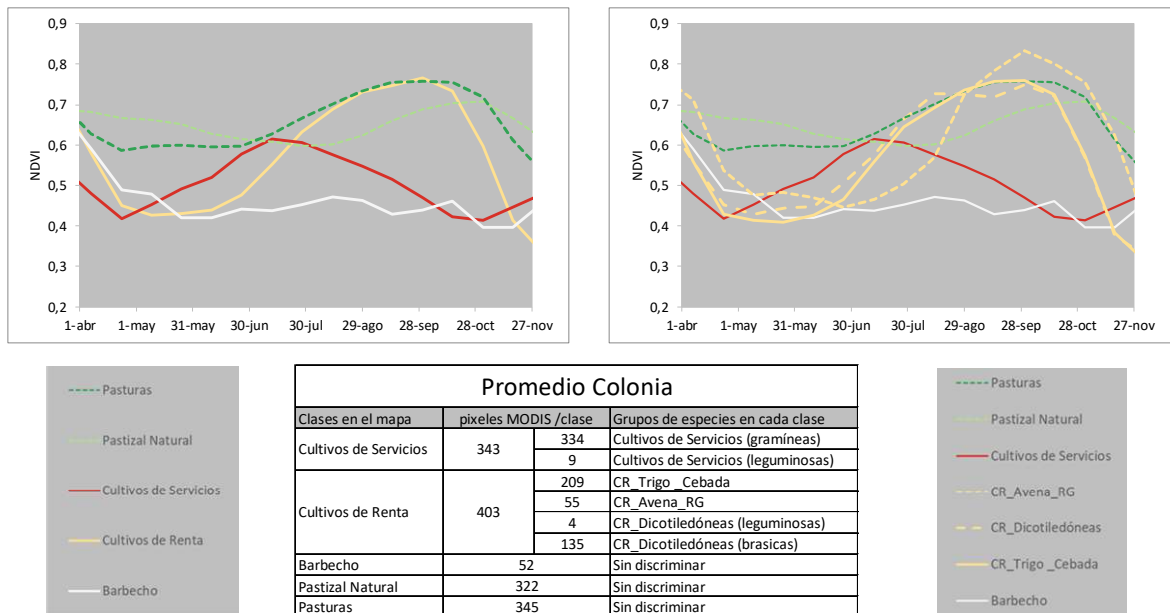


Figura A 15. Firma fenológica promedio de todas las campañas para el departamento de Colonia, de las clases observadas en el mapa Nivel 3 (izq.) y detalle dividiendo los CR en tres grupos (der.). En el cuadro se indica el número de pixeles considerados en cada cobertura