

Universidad de la República

Facultad de Ciencias

Tesina para la obtención del Título de Licenciado en Ciencias Biológicas

Caracterización del déficit de forraje en pastizales naturales de Uruguay



Foto: Msc. Camilo Pérez

Estudiante: Diego Salazar

Orientadores: Dr. Federico Gallego y Dr. Luis López Mársico
Grupo Ecología de Pastizales, IECA, Facultad de Ciencias

Tribunal: Dr. Santiago Baeza, Msc. Andrea Tommasino, Dr. Federico Gallego

Agradecimientos:

A mis Tutores. A Luis por rescatarme y abrir un espacio de trabajo con confianza desde el primer minuto. Por los aportes a la tesina, la guía en el desarrollo de la misma y la buena disposición para las correcciones y comentarios. A Federico por tanto conocimiento compartido, por la paciencia, la disposición y por mantenerme motivado con tu compromiso y dedicación. Por ejercer el rol de orientador en todo el sentido de la palabra siempre con aportes y comentarios positivos.

A Claudia Rodriguez por el tiempo, la palabra y la confianza.

A Yoel de la Noval por la ayuda con los datos.

A Santiago Baeza y Andrea Tommasino por aceptar ser parte del tribunal y por sus valiosos aportes para enriquecer este trabajo.

A la Universidad de la República y en especial a la Facultad de Ciencias por permitirme desarrollarme como profesional y brindarme un espacio educativo de calidad y acorde a mis necesidades. A los funcionarios de dicha institución por sostener esta casa de estudios, en especial a las y los funcionarios de bedelías por su disposición y amabilidad en todo momento.

A mis compañeras y compañeros de Carrera que fueron el pilar fundamental para transitar este proceso universitario. Hicieron que esos años de esfuerzo y dedicación también sean de disfrute, descubrimiento y pasión. En especial en el último tramo agradecer a Feli, Juan y Serrana por ser guía, ejemplo y mantenerme optimista y motivado aun en los momentos más complicados. A Camilo Perez por la foto que embellece la portada del trabajo.

A mis amigos de Legado Nativo, Mauro y Bruno. Por ser un motor de mi pasión por la ciencia y la naturaleza. Por abrirme la mente en los procesos de construcción colectiva para la conservación de la naturaleza. Por la confianza total en mis conocimientos y por darme lugar para desarrollarlos. Han sido las experiencias más gratas y reveladoras en mi camino de Biólogo.

A mis amigos de toda la vida y los que fueron apareciendo por el camino. En especial a Felipe "Tito" Cedres por ser guía y referente en las cuestiones ambientales y en el amor por la naturaleza, gracias a su ejemplo pude encontrar mi vocación en las Ciencias Biológicas.

A Raquel, mi compañera. Por estar a mi lado en todo momento, siempre estimulando crecimiento personal y profesional. Por el amor de todos estos años y por la familia que hemos construido.

A Nina y Felipe, mis hijos. Por respetar lo más posible mi espacio de trabajo, por ser la banda sonora de esta tesis y por las enseñanzas de estos años. Los amo incondicionalmente.

A mi familia en general por constantemente estimular mi curiosidad por las ciencias y la naturaleza. A mis viejos por el esfuerzo, la paciencia y el amor de todos estos años. Gracias por darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria, algo que ustedes no tuvieron, pero por lo que hicieron un gran esfuerzo para que yo pudiera lograrlo. A mi hermana Paola por educarme, darme tanto amor y sobre todo por abrirme las puertas de su casa para que yo pudiera iniciar mis estudios, aun en el año en que nació su primer hijo, algo que voy a agradecer y recordar siempre. A mi hermana Cristina por el amor y el apoyo en todos estos años, por la motivación a mis conocimientos de la naturaleza. A mi hermana Graciela por el entusiasmo y por compartir el amor por la Biología, se que también con este título estoy cumpliendo uno de sus sueños.

A mis suegros, Rafa y Rosana y a Ceci mi cuñada, por las horas cuidando a los niños para que pueda escribir o reunirme con mis tutores. También por el cariño de todos estos años.

Índice

- Resumen.....	4
- Introducción.....	5
- Materiales y Métodos.....	9
- Área de estudio.....	9
- Resolución espacial y temporal del trabajo.....	10
- Estimación de la PPNA.....	11
- Métricas para caracterizar el déficit de la PPNA.....	12
- Análisis de datos.....	14
- Resultados.....	15
- Correlación entre las métricas.....	15
- Caracterización y distribución espacial de los grupos.....	18
- Discusión.....	20
- Bibliografía.....	25
- Material suplementario.....	31

Resumen

Las perturbaciones son elementos clave y estructuradores de los ecosistemas. En pastizales naturales, las principales perturbaciones son el pastoreo, las quemas prescritas y los eventos de déficit hídrico, llamados comúnmente “sequías”. Uno de los atributos del funcionamiento ecosistémico de los pastizales más sensibles a las perturbaciones es la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA). En este sentido, el objetivo de este trabajo fue describir y caracterizar, a nivel país y durante 22 años (2001-2023), la respuesta de la PPNA (vinculado con el déficit) frente a perturbaciones de origen antrópico y ambiental, a partir de métricas vinculadas a dichos momentos de déficit. Para ello, fueron utilizados datos de sensores remotos para estimar la PPNA de pastizales naturales a nivel de Secciones Policiales (unidades administrativas del Ministerio del Interior). En base a la comparación del año promedio con el año corriente, se definieron siete métricas: proporción de fechas con déficit, duración del período más largo de déficit, fechas de inicio y finalización del período más largo, valor mínimo relativo al déficit, número de períodos con déficit y valor máximo de déficit registrado. Se realizó el análisis de correlación de Pearson entre las métricas para analizar la redundancia, así como también conocer el sentido y la magnitud de las relaciones. Asimismo, se realizó un análisis de agrupación jerárquico con el cual se identificaron grupos de Secciones Policiales con comportamientos similares en cuanto al déficit en la PPNA basado en las métricas seleccionadas. Los análisis permitieron identificar tres grupos de Secciones Policiales con comportamientos diferenciados frente a las perturbaciones. El Grupo 1, el más representativo a nivel espacial, se asoció a pastizales altos y densos con suelos profundos, mostrando estabilidad en la PPNA. Presentó una alta proporción de fechas con déficit acompañado por periodos que generalmente inician y finalizan en fechas similares. El Grupo 2, es el menos representado y se ubica mayormente en el Este del país. Está asociado a suelos de profundidad media a alta con presencia de pastizales densos. Debido a esto la estabilidad de la productividad fue relativa ya que presentó alta frecuencia de períodos con máximos valores y máxima diferencia relativa de déficit pero de corta duración. Finalmente, el Grupo 3, ubicado en las regiones Norte y Suroeste, se caracterizó por ubicarse sobre suelos superficiales y mayor sensibilidad a eventos extremos debido a la imposibilidad de dichos suelos para retener el agua. Presentó una máxima diferencia relativa de déficit y valores máximos de déficit. Los resultados reportados en este trabajo subrayan la importancia de factores edáficos y climáticos en la variabilidad de la PPNA y proporcionan una base para la gestión diferencial de los pastizales frente a eventos extremos, así como a perturbaciones de origen antrópico como el fuego y el pastoreo, contribuyendo al conocimiento científico y a la toma de decisiones en la gestión de recursos forrajeros en Uruguay.

Introducción:

Las perturbaciones presentan gran importancia para muchos ecosistemas (Chapin III et al. 2011). Se definen como procesos o eventos que ocurren en un momento dado, generando remociones o daños en la biomasa (Grime, 1979; Pickett y White, 1985). En pastizales naturales, su estructura y funcionamiento están modulados, entre otros factores, por perturbaciones de origen antrópico y ambiental (Oesterheld 1999; Bond 2019). Dentro de las perturbaciones de origen antrópico, el pastoreo y las quemaduras son los más importantes y más estudiados a nivel global (Noy-Meir, 1995; Gibson, 2009; Paruelo et al. 2022). Por su parte, dentro de las perturbaciones de origen ambiental, los eventos de déficit hídrico, o sequías, son relevantes en este tipo de ecosistemas, aunque han sido menos estudiados para el caso de los pastizales subhúmedos (Oesterheld et al. 1999). Las perturbaciones pueden actuar de manera independiente o simultánea. De hecho, algunos autores plantean que la interacción entre quema y pastoreo es más importante que la suma de estos por separado (Bond y Keeley, 2005; Fuhlendorf et al. 2009). Esta interacción promueve un aumento en la heterogeneidad de las comunidades vegetales y por tanto en la diversidad vegetal (Colins et al. 1995; Fuhlendorf y Engle, 2004). Sin embargo, si la intensidad de dichas perturbaciones es sostenida en el tiempo, puede generar modificaciones estructurales con implicancias sobre el funcionamiento de los pastizales tales como cambios en la composición de especies, transiciones a nuevos tipos de ecosistemas y modificaciones en la trayectoria sucesional (Chapin III et al. 2011).

Los Pastizales del Río de la Plata son una de las áreas de pastizales más importantes del mundo y, en Sudamérica, son muy relevantes por su extensión y estado de conservación (Oyarzabal et al. 2019; Paruelo et al. 2022). Ocupan aproximadamente 853.000 km² entre el centro-este argentino, el estado de Rio Grande do Sul en Brasil y la totalidad de Uruguay (Soriano et al. 1992; Paruelo et al. 2022). La temperatura promedio anual oscila entre 20 °C en el norte y 13 °C en el sur y en cuanto a la precipitación anual total, esta varía desde 1500 mm en el noreste hasta 400 mm en el suroeste, presentando poca variación estacional (Royo Pallarés et al. 2005; Paruelo et al. 2007). Se divide en dos sub-regiones en base a criterios edáficos, geomorfológicos y fisonómicos: Pampas y Campos (Soriano et al. 1992). Las Pampas se ubican exclusivamente en territorio Argentino y es la región más homogénea desde el punto de vista fisonómico, con la ausencia casi total de árboles. Los Campos están ubicados entre Brasil, Uruguay y una pequeña porción del Este de Argentina presentando algunos bosques de galería asociados a cursos fluviales y formaciones boscosas en zonas de serranías (Soriano et al. 1992). Existen, a su vez, subdivisiones basadas en composición florística que reúnen características fisonómicas, geomorfológicas e hidrológicas similares (Soriano et al. 1992; Oyarzabal et al. 2018). En las

Pampas se pueden identificar seis unidades de vegetación: Pampa Ondulada, Pampa Mesopotámica, Pampa Interior Plana, Pampa Interior Oeste, Pampa Inundable y Pampa Austral, mientras que en los Campos, se diferencian los Campos de Norte y del Sur (Soriano et al. 1992; Oyarzabal et al. 2018).

La mayoría de los estudios en la región de los pastizales del Río de la Plata han reportado los efectos del pastoreo y el fuego sobre variables estructurales de la vegetación (Paruelo et al. 2022). En los Campos Sulinos de Brasil (Campos del Norte), se ha observado que algunas especies resistentes al pastoreo incrementan su frecuencia bajo esta perturbación, promoviendo heterogeneidad en la distribución vertical de la vegetación en sitios con pastoreo de baja intensidad (Boavista et al. 2019; Fischer et al. 2019; Ferreira et al. 2020). En áreas quemadas, se incrementa la cobertura de hierbas arrosetadas y graminoides, lo que puede aumentar o mantener estable la riqueza de especies, mientras que la acumulación de biomasa seca, tras largos períodos sin fuego, reduce la riqueza por exclusión competitiva de las especies dominantes (Overbeck y Pfadenhauer, 2007; Fidelis et al. 2012). En la Pampa inundable (Argentina), el pastoreo promueve la vegetación con un porte bajo y una comunidad más diversa, dominada por hierbas exóticas (Rusch y Oesterheld 1997), mientras que el fuego en pajonales favorece cambios en la composición, mayor calidad forrajera y accesibilidad para el ganado, aunque puede facilitar la invasión de especies exóticas, dependiendo de la interacción entre fuego y pastoreo (Latterra et al. 1998). En Uruguay (Campos del Norte y Campos del Sur), el pastoreo por ganado doméstico genera una vegetación de porte bajo, dominada por gramíneas prostradas C_4 y hierbas arrosetadas, afectando la estructura y el funcionamiento mediante la remoción de biomasa, pisoteo y deposición (Altesor et al. 2005; Lezama y Paruelo, 2016). La supresión del pastoreo incrementa la cobertura y altura de especies leñosas, altera la composición del estrato basal hacia especies C_3 y reduce la riqueza y la productividad primaria neta (Altesor et al. 2006; López-Mársico et al. 2024). Respecto al fuego, aunque históricamente su uso ha sido puntual, recientes estudios destacan su bajo impacto en la conectividad vegetal debido al predominio del pastoreo como perturbación principal (Bernardi et al. 2019), y se han explorado los efectos del fuego en germinación, bancos de semillas y sucesión en sitios quemados (Cuello et al. 2020; López-Mársico et al. 2019, 2021, 2024b).

Los atributos estructurales de la vegetación presentan una respuesta más tardía frente a las perturbaciones en comparación con los atributos funcionales y, por lo tanto, son estos atributos funcionales considerados una herramienta importante para la detección y gestión temprana de perturbaciones en el territorio (Cabello et al. 2012). Varios antecedentes en la región de los Pastizales del Río de la Plata han reportado los efectos de diferentes tipos de perturbaciones (principalmente pastoreo y quemadas) sobre el funcionamiento de los pastizales (Paruelo et al. 2010; Lezama et al. 2014). Uno de los atributos del funcionamiento ecosistémico de los pastizales más sensibles a las

perturbaciones es la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA; McNaughton et al. 1986; Oesterheld et al. 2011). La PPNA es una variable de suma importancia en los ecosistemas de pastizales (Sala y Austin, 2000), sobre todo en los que son utilizados con fines productivos como en el caso de la ganadería extensiva ya que establece el límite superior de carga de ganado para evitar la degradación de la cobertura vegetal (Golluscio et al. 1998; Oesterheld, 2011; Allen et al. 2011). Está definida como la producción de nueva biomasa vegetal aérea por unidad de espacio y tiempo y define la cantidad de energía disponible para el resto de los niveles tróficos (McNaughton et al. 1986; Oesterheld et al. 2011).

La PPNA puede ser estimada en base a sensores remotos, lo cual brinda varias ventajas en relación a las dificultades generadas por los métodos tradicionales como las cosechas sucesivas, basadas en la exclusión parcial de herbívoros (Sala et al. 1981; Rusch y Oesterheld, 1997; Altessor et al. 2005; Pezzani et al. 2017). Estos métodos tradicionales de corte de biomasa arrastran imprecisiones derivadas de la metodología tales como la falta de estandarización en la altura de corte, riesgos de contaminación de muestras con suelo y posibles subestimaciones de PPNA por recambio de tejidos vegetales (Pezzani et al. 2017). En cambio los métodos de teledetección permiten obtener datos del funcionamiento de los ecosistemas de manera precisa, eficiente y a gran escala basados en métricas e índices matemáticos (Cabello et al 2012). Para la estimación de la PPNA basada en sensores remotos, se utiliza como base el modelo propuesto por Monteith en 1972, ya que es uno de los enfoques fundamentales en la investigación sobre la eficiencia del uso del agua y la producción primaria de los ecosistemas, particularmente en el contexto de la fotosíntesis y la evapotranspiración. Este modelo fue desarrollado por John L. Monteith y describe la relación entre la radiación solar, la evapotranspiración y la fotosíntesis de la vegetación (Monteith, 1972). Este modelo contempla la fracción de la radiación fotosintéticamente activa (fFRA por sus siglas en inglés), variable que explica la mayor proporción de la variación en la PPNA (Grigera y Oesterheld, 2020). La fFRA se puede estimar mediante la utilización de imágenes satelitales a través del Índice de Vegetación Normalizado (IVN) o mediante el EVI (Enhanced Vegetation Index; Liu y Huete, 1995) . Este índice es una medida indirecta de la cantidad de radiación absorbida ya que se basa en la capacidad de los tejidos vegetales de absorber la radiación solar (Sellers, 1985) captando la baja reflectancia del espectro luminoso correspondiente al rojo debido a la absorción por la clorofila y la alta reflectancia en la sección del infrarrojo cercano debido a la estructura del mesófilo de las hojas (Ecuación 1; Paruelo, 2008). El IVN proporciona una escala normalizada que va de 0 (sin vegetación) a 1 (máxima actividad de la vegetación). El tiempo de estimación de dicha variable es mínimo y aprovecha la gran cantidad de datos proporcionados por sensores remotos, permitiendo obtener información con una cobertura espacial y temporal amplia (Paruelo, 2008; Oesterheld et al. 2011).

$$\text{Ecuación 1: } IVN = (IR - R) / (IR + R)$$

Los efectos de los distintos tipos de perturbaciones sobre la PPNA son variables, por lo que conocer cuáles son sus mecanismos, o consecuencias, se torna de gran importancia. En un modelo conceptual propuesto por Oesterheld et al. (1999) se establecen las relaciones entre los efectos del pastoreo, el fuego y el clima sobre la PPNA en base a un gradiente de precipitación. El clima es el principal determinante en los pastizales semiáridos, mientras que su importancia se vuelve compartida con las perturbaciones en pastizales subhúmedos. Respecto al pastoreo, el modelo muestra que el efecto relativo sobre la PPNA se mantiene relativamente constante y el mismo depende del manejo que se aplique. Según algunos autores, el fuego es considerado como un “herbívoro” altamente efectivo ya que no discrimina entre especies (ejemplo palatables / no palatables; Bond y Keeley, 2005). Oesterheld et al. (1999) plantean que un aumento en las precipitaciones podría dar lugar a un aumento en la PPNA y favorecer los eventos de quemaduras. Por el contrario, podría disminuir la PPNA en años donde las precipitaciones sean menores a la media anual, y por lo tanto no habría acumulación de biomasa suficiente para propagar el fuego. En definitiva, para los pastizales templados-subhúmedos, como los que se desarrollan en la región de los pastizales del Río de la Plata, el efecto del fuego sobre la PPNA podría llegar a ser hasta cinco veces mayor que el del pastoreo (Oesterheld et al. 1999).

A nivel nacional, existen diversos antecedentes acerca del impacto de las perturbaciones sobre la PPNA. En la región centro-sur de Uruguay, se observó que las áreas pastoreadas presentaron mayor riqueza y diversidad de especies que las áreas excluidas lo que determinó una PPNA 51% mayor bajo pastoreo que en la exclusión (Altesor et al. 2005; 2006). Asimismo, en la zona de exclusión donde se simuló el pastoreo a través de cortes, fueron las más productivas, con un 29% más que las parcelas pastoreadas (Altesor et al. 2005). Por lo tanto, el trabajo de Altesor et al. (2005) concluye que el pastoreo tiene dos componentes de efecto: uno estructural que aumenta la PPNA y otro de composición de especies que la disminuye. Respecto a los efectos del fuego, Bruzzone et al. (2019), utilizando el IVN, el cual tiene una relación directa con la PPNA (Prince 1991), probaron que luego de un evento de fuego, los valores del IVN se recuperaron, y alcanzaron a los valores previos al incendio. El promedio de tiempo en recuperar los valores previos fue de 72 ± 37 días. Incluso, llegaron a superar los valores de parches adyacentes no quemados al cabo de una estación de crecimiento. En otro estudio, Tommasino et al. (2023) demostraron que las áreas donde el manejo ganadero es más intensivo, tienden a ser

menos resistentes y resilientes frente a eventos de sequías, viéndose esto amplificado si el evento se replica al año siguiente. Luego de dos años de déficit hídrico, la vegetación presentó valores de IVN por debajo del 55% del valor original y las áreas con manejos más intensivos estuvieron por debajo del 63%. Por tanto, en términos de PPNA, en los pastizales naturales analizados, los años de déficit hídrico provocaron una disminución de 13%; y al continuar el déficit al año siguiente, la productividad disminuyó hasta un 31%.

Todos estos estudios han evaluado diferentes aspectos de las respuestas a las perturbaciones ambientales y antrópicas sobre la PPNA de pastizales. A pesar de esto, aún resta por caracterizar, a nivel nacional, los efectos de las perturbaciones sobre la PPNA, considerando escalas espaciales y temporales extensas. En este contexto, el objetivo general de este trabajo fue describir y caracterizar, a nivel país y durante 22 años (2001-2023), la respuesta de la PPNA (vinculado con el déficit) frente a perturbaciones de origen antrópico y ambiental, a partir de métricas vinculadas a dichos momentos de déficit. Los objetivos específicos de este trabajo son, procesar datos de PPNA de pastizales naturales a nivel de Secciones Policiales (unidad administrativa de Uruguay), así como definir y estimar métricas para caracterizar el déficit en la PPNA para los 22 años en estudio. Debido a la escala a la cual se realiza el presente estudio (Nacional, por Secciones Policiales) es esperable que la principal perturbación responsable del déficit de PPNA y de la variabilidad interanual de la misma sea el déficit hídrico.

Materiales y Métodos:

Área de estudio:

El área de estudio comprende la totalidad del territorio de Uruguay, país que se encuentra al sudeste de Sudamérica, entre los 30° y 35° de latitud sur y los 53° y 58°, 30´ de longitud oeste, y tiene una extensión de 176.215 km² (IGM, 2023). La temperatura media anual, para el período 1991 y 2020, fue de 17.7°C con un rango entre 16°C en el sur y 19°C en el norte (INUMET, 2023). Las precipitaciones se distribuyen uniformemente a lo largo del año, con mayores valores en otoño. Los registros acumulados son de 1400 mm en el norte y 1100 mm en el sudoeste para el período 1991-2020 (INUMET, 2023). En cuanto al relieve, Uruguay se caracteriza por ser una penillanura debido a que presenta un terreno suavemente ondulado. La altitud media es de 117 msnm y el punto máximo está ubicado en el cerro cathedral con 513 msnm (IGM, s.f).

Los pastizales naturales son el uso/cobertura del suelo con mayor superficie ocupando el 60% del territorio nacional (Baeza et al. 2022). Lezama et al. (2019) y Ríos et al. (2024) clasificaron a los pastizales de Uruguay en siete comunidades principales. Dos de las comunidades, definidas por Lezama et al. (2019), están delimitadas a la Cuesta

Basáltica y se denominan Comunidad I y Comunidad III de la Cuesta Basáltica. La Comunidad I, está caracterizada por especies xero y mesofíticas, donde predominan las gramíneas estivales y se destaca la ausencia de arbustos. La comunidad III, dominada por gramíneas con alto valor forrajero, mayoritariamente gramíneas estivales, está asociada a condiciones méxicas. Las otras tres comunidades, definidas por Lezama et al. (2019), se distribuyen dentro de las regiones de Sierras del Este, Cuenca Sedimentaria del Noreste y Centro Sur y se denominaron Comunidad II, IV y V. La Comunidad II, caracterizada por especies meso y xerofíticas, está dominada por gramíneas estivales y hierbas. Posee una cobertura vegetal generalmente en el entorno del 80% y se la encuentra asociada a suelos superficiales, gravillosos o arenosos con una amplia distribución en el territorio. La Comunidad IV, está caracterizada por la presencia de especies mesofíticas, con una elevada predominancia de gramíneas estivales seguida por gramíneas invernales. Esta comunidad es muy similar a la Comunidad III pero difieren en sus especies indicadoras (en el caso de la comunidad IV se trata de dos especies no gramíneas) y en la alta cobertura de subarbustos y hierbas presentes en la comunidad IV. La Comunidad V, con una fisonomía de pastizal denso alto, está caracterizada por especies meso-higrofiticas siendo las principales especies indicadoras las gramíneas, con ocurrencia de pastos de alto porte. En esta comunidad, dominan las gramíneas estivales seguidas por las graminoides. Recientemente el trabajo realizado por Ríos et al. (2024) reveló la existencia de dos comunidades ubicadas en las Planicies del Este: pastizales hidrófilos y pastizales bien drenados. Ambas comunidades están dominadas principalmente por gramíneas perennes nativas C_4 , con una presencia muy baja de especies exóticas. Los pastizales hidrófilos se caracterizan por estar compuestos de especies hidrófilas lo que refleja la adaptación a las condiciones de inundación del suelo. Incluye stands pequeños y medianos (desde 0.05-0.5 ha hasta 3-7 ha), ubicados en pequeñas concavidades del terreno con suelos húmedos o temporalmente inundados y su fisonomía de la vegetación se define por un solo estrato con una altura modal de 5 a 10 cm. La segunda comunidad, pastizales bien drenados, se caracterizan por la presencia de especies mesófilas comunes en los pastizales uruguayos, incluye stands de tamaño mediano y grande (desde 3-7 ha hasta 30-300 ha), ubicados en áreas planas y amplias del campo. La vegetación presenta una fisonomía definida por un solo estrato de menos de 5 cm de altura.

Resolución espacial y temporal del trabajo

Se consideraron 22 estaciones de crecimiento desde 2001 hasta 2023, comprendidas entre los meses de julio a junio. Dentro de cada estación de crecimiento se registraron 23 observaciones (una cada 16 días), las cuales corresponden a la frecuencia de visita del sensor MODIS (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>). La resolución espacial se corresponde a una división administrativa de Uruguay, denominada Sección Policial. La

misma está definida por el Ministerio del Interior y, en promedio, tienen un superficie de 63.199 hectáreas, con un rango entre 179 y 228.511 hectáreas. Existen en total 279 Secciones Policiales, de las cuales 90 fueron desestimadas debido a la falta de cobertura de pastizales naturales (asociadas a zonas urbanas o con usos agrícolas, ver cartografía disponible en Baeza et al. 2019 y Ríos et al 2024), quedando así un total de 189 Secciones Policiales utilizadas en este trabajo.

Estimación de la PPNA:

Los datos fueron extraídos de la aplicación Pastizales ROU ([Link a la app](#)), la cual disponibiliza estimaciones de PPNA para pastizales de Uruguay basados en el modelo de Monteith (1972). Es decir, para cada una de las secciones policiales con presencia de pastizales, se obtuvieron y procesaron los registros de PPNA para la serie temporal establecida. En este modelo se plantea que la PPNA (expresada en kilogramos de materia seca por hectárea cada 16 días, KgMS/ha.16d) es el producto entre la radiación fotosintéticamente activa (RFA) que incide sobre las plantas, la fracción de esta radiación

$$\text{Ecuación 2: } PPNA [KgMS/ha.16d] = RFA [Mj/m^2.16d] \times fRFA \times EUR [KgMS/Mj]$$

(fRFA) que es absorbida por las mismas y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) (Ecuación 2).

La RFA es la radiación fotosintéticamente activa incidente y se expresa en Megajoules por metro cuadrado cada 16 días (Mj/m².16d). Para este caso, los datos fueron tomados de Global Land Data Assimilation System (GLDAS-2.1; Li et al. 2019). Este producto toma datos satelitales y terrestres. La EUR representa la eficiencia de la transformación de la energía en biomasa (Oyarzabal y Paruelo, 2019). La EUR varía por diversos motivos, entre ellos, las vías metabólicas de las plantas (C₃ o C₄), formas de vida y adaptaciones morfológicas o condiciones ambientales tales como la disponibilidad de agua o la temperatura (Oosterheld et al. 2011). Sin embargo, la eficiencia con la cual se produce nueva biomasa a partir de la energía absorbida solo explica una parte menor de la variabilidad espacial y temporal de la PPNA (Paruelo et al. 2011). En el caso de Pastizales ROU, los datos de EUR provienen de calibraciones en base a datos satelitales y muestreos de campo. El valor para pastizales naturales de Uruguay es de 0,4227 g MS/Mj (Oyarzabal et al. 2011; Druille et al. 2019). La fRFA es la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación verde y es la que explica en mayor medida la variación de la PPNA (Grigera y Oosterheld, 2020). La fRFA es estimada mediante la utilización de imágenes satelitales a través del Índice Verde Mejorado (IVM o EVI por sus siglas en inglés, Enhanced Vegetation Index; Liu y Huete, 1995). Este índice es una medida indirecta de la

cantidad de radiación absorbida ya que se basa en la capacidad de los tejidos vegetales de absorber la radiación solar (Sellers, 1985). Considera la radiación reflejada en tres longitudes de onda (azul, rojo e infrarrojo) y coeficientes de corrección permitiendo tener mayor sensibilidad en condiciones de vegetación densa y minimizando las variaciones del dosel.

Métricas para caracterizar el déficit de la PPNA

Para el análisis de los datos, se obtuvo el año promedio de la PPNA para cada fecha (frecuencia de 16 días) y en cada Sección Policial. El año promedio se calculó en base a los valores de PPNA registrados en toda la serie temporal (2001-2023) y fue utilizado como valor de referencia para contrastar con los valores en cada uno de los años registrados de la serie temporal. Es decir, para cada Sección Policial y para cada año se comparó la curva estacional del año corriente con la curva estacional del año promedio para identificar momentos con superávit o déficit en la PPNA (momento del año con PPNA por arriba o por debajo de la curva correspondiente al año promedio). Se identificaron los períodos que presentaron, al menos, dos valores de déficit consecutivos, los cuales conformaron un “período de déficit”, determinado como la ocurrencia de dos fechas consecutivas con valores de PPNA por debajo del año promedio. Para esto fue utilizado el software R Core Team (2021), donde se creó un código capaz de identificar cada periodo de déficit y asignar valores 1 para el inicio del periodo y valores -1 para el fin del periodo. El resto de las fechas tomaron el valor 0. Esto permitió determinar de manera más simple las fechas y la duración que tuvieron dichos períodos de déficit. Cabe destacar que se tomaron todos los valores de magnitud negativa y no se profundizó en la posibilidad de la existencia de falsos positivos.

Con la información previamente generada (matriz de -1, 0 y 1 para cada Sección Policial y para cada año) se definieron y estimaron 7 métricas vinculadas con el déficit (momentos por debajo de la curva estacional promedio de la PPNA) y que permitieron caracterizar las Secciones Policiales. Las métricas utilizadas fueron las siguientes (Tabla 1 y Figura 1): a) La proporción de fechas que presentaron déficit (fd). Se calculó dividiendo la cantidad de fechas que registraron valores negativos (déficit) por 23 (número total de registros en el año) ; b) La duración, en número de fechas (registros), del periodo más largo de déficit (dl). Este valor indica el número de fechas que quedaron comprendidas dentro del periodo de déficit, tomando valores a partir de 2 fechas consecutivas; c) El momento de finalización del periodo más largo de déficit (fl); d) El momento de inicio del periodo más largo de déficit (il); e) El valor mínimo relativo al déficit (mpd). Este valor se obtuvo a partir de identificar la mayor proporción relativa de déficit para cada fecha. f) El número de periodos con déficit registrado (np). Indica la cantidad de períodos de déficit que ocurrieron

en cada año para la serie temporal evaluada, siendo cada período de al menos dos fechas consecutivas; y g) El valor máximo de déficit registrado (vm). Para cada métrica se calculó, mediante el paquete “doBy” de R (Halekoh y Højsgaard 2024), la media, desvío estándar y percentiles 1, 25, 50, 75 y 99 con el fin integrar la información temporal (22 años) de cada una de ellas. Posteriormente fueron utilizados los datos del percentil 50 (mediana) para ejecutar los análisis correspondientes a cada métrica.

Tabla 1. Nomenclatura y descripción de las métricas utilizadas en el estudio.

Métrica	Nomenclatura	Descripción
Proporción de fechas que presentaron déficit	fd	Número de fechas que presentan déficit dividido el total de registros anuales (23)
Periodo más largo de déficit	dl	Número de fechas comprendidas dentro del periodo más largo de déficit
Fecha final del máximo periodo de déficit	fl	Indica en qué fecha finalizó el periodo más largo de déficit
Fecha de inicio del periodo más largo de déficit	il	Indica en qué fecha inició el periodo más largo de déficit
Mayor proporción relativa de déficit o máxima diferencia relativa	mpd	Indica que tan alejado está el valor del año actual en relación a la curva histórica de productividad (año promedio). Se calcula multiplicando la proporción de déficit por 100 y dividiéndolo entre el valor promedio histórico para esa fecha.
Número de periodos con déficit registrado	np	Indica la cantidad de periodos de déficit que se presentaron, siendo estos siempre de al menos dos fechas consecutivas
Máximo valor de déficit registrado	vm	Valor máximo de déficit registrado

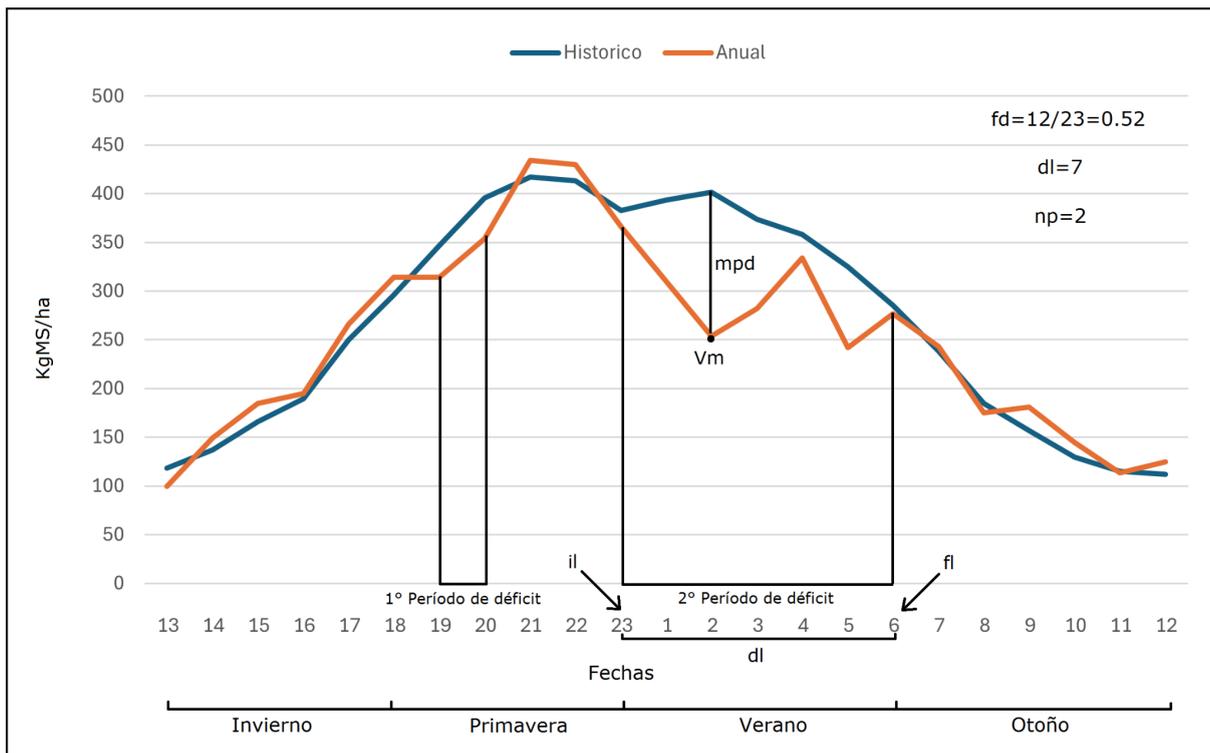


Fig. 1. Gráfico de dinámica estacional de la PPNA para un año agrícola. Se ilustra cómo son tomadas las diferentes métricas desde la curva estacional de PPNA. En naranja se observa la curva de PPNA anual de una sección policial y en azul la curva histórica de PPNA (año promedio). fd : proporción de fechas que presentaron déficit; dl : periodo más largo de déficit; fl : fecha final del máximo periodo de déficit; il : fecha de inicio del periodo más largo de déficit; mpd : valor mínimo de la proporción de déficit o máxima diferencia relativa; np : número de periodos con déficit registrado; vm : máximo déficit registrado.

Análisis de datos:

Se realizó el análisis de correlación de Pearson entre las métricas para analizar la redundancia, así como también conocer el sentido y la magnitud de las relaciones. Adicionalmente, se realizó un análisis de agrupación jerárquico mediante el método Ward.D2 (Murtagh y Legendre, 2014) con el objetivo de identificar grupos de Secciones Policiales con comportamientos similares en cuanto al déficit en la PPNA basado en las métricas seleccionadas. Para ello, se estandarizaron las variables restando el valor de la media de dicha variable y luego dividiendo por la desviación estándar. Se calculó la distancia euclidiana (Legendre y Legendre 1998), procesamiento que se realizó a partir del paquete "vegan" de R (Oksanen et al. 2019). El número de clusters óptimo (niveles de corte del dendrograma) se definió mediante el paquete "NbClust" de R (Charrad 2022). Este paquete está diseñado para determinar el número óptimo de clusters en un conjunto de

datos. Ofrece una colección completa de 30 índices de validación de clusters, los cuales permiten evaluar varios esquemas de clustering simultáneamente, considerando variaciones en: el número de clusters, las medidas de distancia y los métodos de agrupamiento. En base al testeo de esos 30 índices recomienda la medida de corte que más veces fue comprobada por dichos índices (Charrad 2014). Asimismo, se realizó un Análisis de Componentes Principales con el objetivo de disminuir la dimensionalidad así como también para identificar patrones en los clusters generados en el análisis de agrupación jerárquica. Para dicho análisis se utilizó el paquete “vegan” de R (Oksanen et al. 2019). Finalmente, se realizó, para cada grupo, un diagrama de flor o flower plot en Rstudio mediante los paquetes “ggplot2” (Wickham, 2016), “ggord” (Marcus, 2024) y “devtools” (Wickham, 2022). Este tipo de gráficos muestra el aporte de cada métrica a cada uno de los grupos y se visualiza en función del largo del pétalo.

Resultados:

Correlación entre las métricas

En términos generales, el coeficiente de correlación de Pearson fue bajo para el conjunto de métricas analizadas (Fig. 2). La proporción de fechas que presentaron déficit (fd) no mostró correlaciones significativas con ninguna de las otras métricas analizadas. En relación a las métricas que mostraron correlaciones de Pearson significativas, el periodo más largo de déficit (dl) se correlacionó positivamente con la fecha final de dicho periodo (fl, $r=0.28$) y negativamente con la mínima proporción de déficit (mpd, $r=-0.41$), el np ($r=-0.23$) y vm ($r=-0.18$). La fecha final del periodo más largo de déficit (fl) se correlacionó positivamente con el inicio de dicho periodo (il, $r=0.62$) y negativamente con la máxima diferencia relativa (mpd, $r=-0.16$) y con el número de períodos (np, $r=-0.23$). Finalmente, la máxima proporción de déficit (mpd) se correlacionó positivamente con el máximo valor de déficit (vm, $r=0.44$).

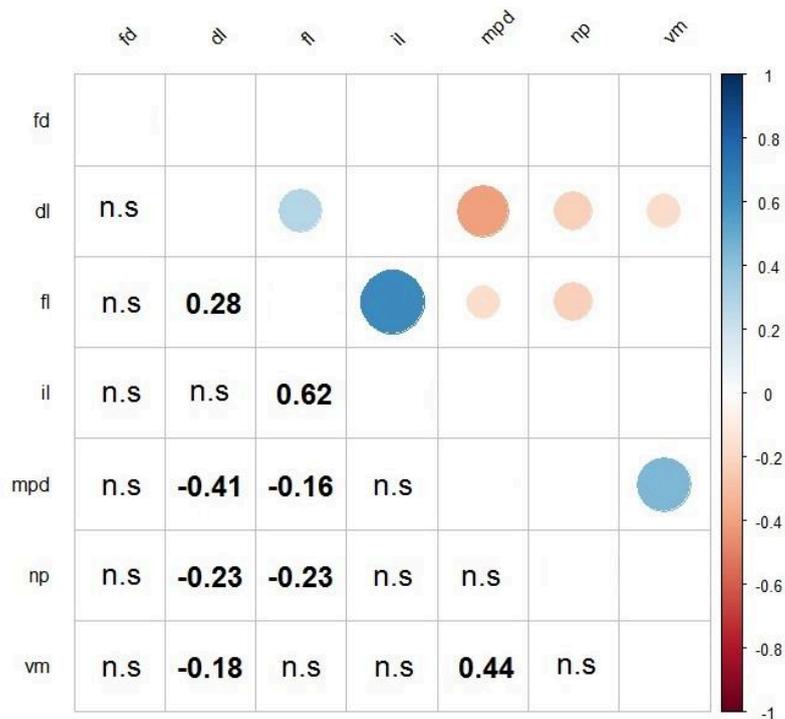


Fig.2 - Matriz de correlación entre las métricas utilizadas. Se muestran las correlaciones de Pearson significativas ($p < 0,05$). Los valores no significativos fueron representados mediante "n.s.". fd= proporción de fechas que presentaron déficit. dl= periodo más largo de déficit. fl= fecha final del máximo periodo de déficit. il= fecha de inicio del periodo más largo de déficit. mpd= valor mínimo de la proporción de déficit o máxima diferencia relativa. np= número de periodos con déficit registrado. vm= máximo déficit registrado.

El análisis de agrupación jerárquico permitió identificar un corte óptimo con un nivel de similitud de 15, dando como resultado 3 grupos (Fig. 3). Dichos grupos fueron nombrados por orden numérico: 1, 2 y 3, asignándoles los colores Verde, Rojo y Azul, respectivamente. El Grupo 1 fue el que agrupó a más Secciones Policiales, presentando un total de 111 (59% del territorio analizado). El Grupo 3 estuvo comprendido por 61 Secciones Policiales (32% del territorio analizado), mientras que, el Grupo 2, fue el menos abundante con 17 Secciones Policiales (9% del territorio analizado).

Agrupamiento Jerárquico

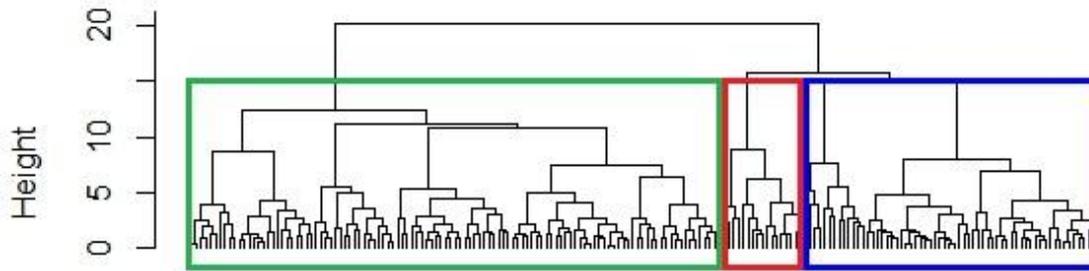


Fig. 3- Análisis de agrupación jerárquico mediante el método Ward.D2 para la determinación de grupos. Se consideraron todas las Secciones Policiales con presencia de pastizal natural y las 7 métricas seleccionadas. Se marca el nivel de similitud a partir de los cuales se determinó el corte. En verde, rojo y azul se marcan los Grupos 1, 2 y 3, respectivamente.

El Análisis de Componentes Principales no permitió reducir sustancialmente la dimensionalidad ya que se necesitaron 5 componentes para explicar el 90% de la variabilidad (Fig. 3 y Tabla 2). Este análisis mostró que el Grupo 1 está mayormente asociado a las variables il, fl y dl, mientras que el grupo 2 y 3 a las variables mpd, vm y np.

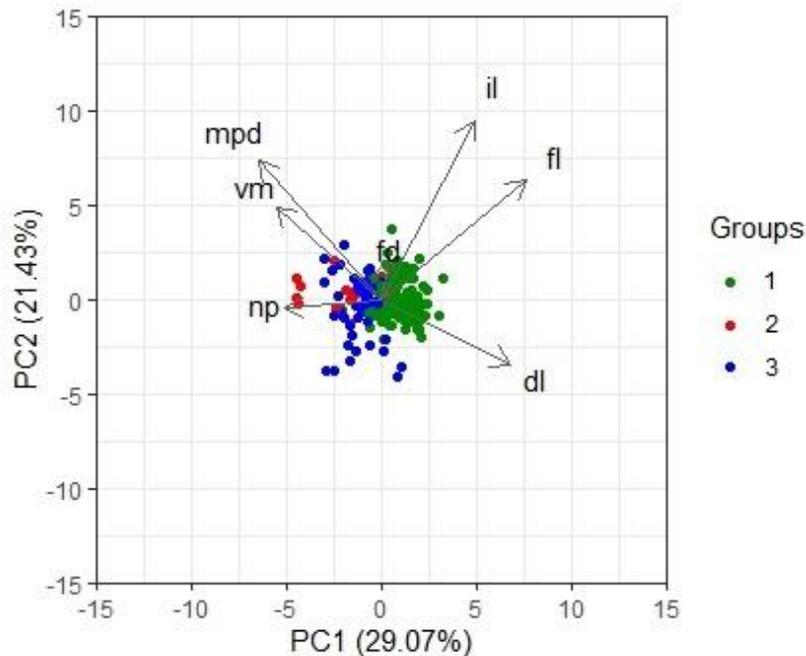


Fig. 3 - Análisis de Componentes Principales en el que se muestra cada métrica con su eigenvector correspondiente. fd= proporción de fechas que presentaron déficit. dl=periodo más largo de déficit. fl= fecha final del máximo periodo de déficit. il= fecha de inicio del periodo más largo de déficit. mpd= valor mínimo de la proporción de déficit o

máxima diferencia relativa. np= número de periodos con déficit registrado. vm= máximo déficit registrado.

Tabla 2. Proporción de la varianza explicada y acumulada para los componentes principales derivados del Análisis de Componentes Principales.

importancia de los componentes:

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Desvio estandar	1.4264	1.2248	1.0468	0.9406	0.8779	0.64054	0.55096
Proporción de la varianza	0.2907	0.2143	0.1565	0.1264	0.1101	0.05861	0.04337
Proporción acumulativa	0.2907	0.5050	0.6615	0.7879	0.8980	0.95663	1.00000

Caracterización y distribución espacial de los grupos

Grupo 1: fue el más representativo, reflejándose en un mayor número de Secciones Policiales con 111 (10.304.812 has, 59% de la superficie nacional), teniendo representatividad en todas las regiones geomorfológicas con pastizales del territorio nacional (Fig. 4). Este grupo presentó una alta contribución relativa de la proporción de fechas que presentaron déficit (fd), el periodo más largo de déficit (dl), la fecha final del máximo periodo de déficit, promedialmente sobre mediados de Noviembre (fl) y la fecha de inicio del periodo más largo de déficit, promedialmente a inicios de Febrero (il ; Fig. 4).

Grupo 2: está integrado por 17 Secciones Policiales (1.185.661 has, 9% de la superficie analizada), ubicadas mayormente en el Este del país. Este grupo presentó alta contribución relativa del número de periodos (np), valores máximos de déficit (vm), máxima diferencia relativa (mpd) y, en menor medida, la proporción de fechas que presentaron déficit (fd; Fig.4).

Grupo 3: está integrado por 61 Secciones Policiales (4.394.840 has, 32% de la superficie analizada), ubicadas mayormente en las regiones Norte y Suroeste. Está mayormente caracterizado por presentar una máxima diferencia relativa de déficit (mpd) y valores máximos de déficit (vm).

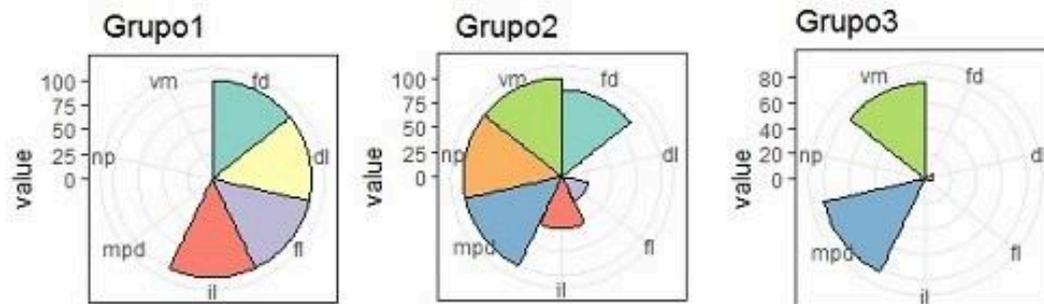
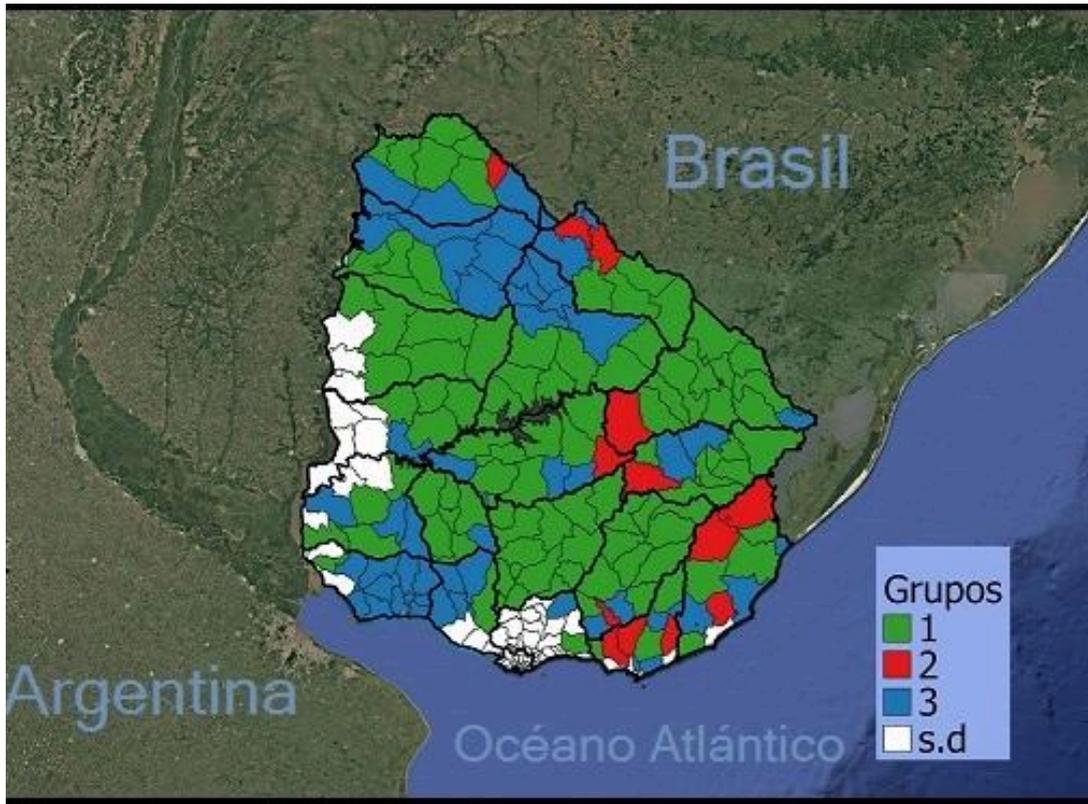


Fig. 4 - Distribución espacial de los grupos por Sección Policial y contribución relativa de las métricas a cada grupo. fd= proporción de fechas que presentaron déficit. dl=periodo más largo de déficit. fl= fecha final del máximo periodo de déficit. il= fecha de inicio del periodo más largo de déficit. mpd= valor mínimo de la proporción de déficit o máxima diferencia relativa. np= número de periodos con déficit registrado. vm= máximo déficit registrado. Las Secciones Policiales en blanco no presentan datos debido a la baja o nula presencia de pastizales naturales.

Discusión:

En este trabajo se analizó la PPNA de pastizales naturales a nivel de Sección Policial en todo el territorio nacional para el periodo 2001-2023 y se generaron, por primera vez, siete métricas que permiten caracterizar y mapear el déficit de PPNA asociado a diferentes perturbaciones (fuego, pastoreo y sequías). Este trabajo da un paso más en relación a las estimaciones de PPNA reportadas en la literatura científica (Guido et al. 2014, Gallego et al. 2017, Baeza y Paruelo 2018), permitiendo una caracterización del comportamiento de los pastizales basado en el déficit de PPNA. Las métricas seleccionadas mostraron ser buenas estimadoras del déficit en la PPNA dado que carecieron de redundancia ($r < 0,7$; Dorman et al. 2012). La aproximación metodológica permitió diferenciar tres grupos de Secciones Policiales con características contrastantes en términos del comportamiento (respuesta de las perturbaciones) y de la distribución espacial en el territorio nacional. Asimismo, este trabajo plantea posibles factores ambientales y antrópicos con incidencia en cada métrica y, por lo tanto, en la definición de los grupos.

Las métricas utilizadas en este trabajo no han sido previamente reportadas en la literatura, pero existen paralelismos que pueden ser realizados, por ejemplo, con los Tipos Funcionales de Ecosistemas (TFE), definidos por Paruelo et al. (2001). Para su definición, estos autores utilizaron imágenes satelitales y, basados en la dinámica del IVN, caracterizaron los ecosistemas templados de América del Sur. Para ello, utilizaron tres “fenométricas”: a) la Integral anual del IVN (IVN-I, representa la cantidad total de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación a lo largo del año), b) el rango anual relativo del IVN (describe la variabilidad estacional de la actividad fotosintética) y, c) la fecha del IVN máximo, (indica el mes en el que se produce el pico de actividad fotosintética). Estos TFE han sido aplicados para distintas circunstancias, desde modelación climática hasta aspectos de conservación de la naturaleza (Alcaraz-Segura et al. 2006, Alcaraz-Segura et al. 2013, Muller et al. 2014, Cazorla et al. 2021). Incluso, recientemente, Paruelo et al. (2024), utilizaron la diversidad de TFE como un indicador del desempeño ambiental de los sistemas productivos de Uruguay.

Si bien las métricas utilizadas en este trabajo representan en gran medida distintos aspectos del déficit de PPNA, es un conjunto incompleto. Por ejemplo, algunos estudios incluyen otras variables tales como la pendiente de ascenso y descenso de la PPNA (Staiano, 2016, Pengfei et al. 2023; Wenrui et al. 2023), brindando información acerca de la tasa de aumento o decrecimiento en la PPNA. La inclusión de este tipo de métricas permitiría complementar y mejorar la caracterización realizada en este trabajo. Incluso, podría resultar de especial interés generar otras métricas que consideren la resistencia o la resiliencia de los pastizales, o bien, las anomalías en periodos de déficit más cortos. A modo de ejemplo, durante los últimos tres años de este estudio (2021-2023), el territorio

nacional estuvo sometido a un periodo de sequía importante, catalogado como uno de los cinco eventos más severos del sureste de América del Sur desde la década del 50 (Toreti et al. 2023). Respecto a esto, Dogliotti et al. (2023) observaron que en el periodo comprendido entre los años 2020 y 2023, el crecimiento de pasto, es decir la PPNA, se redujo gradualmente hasta alcanzar un 15% menos en el último año. Al observar la época crítica de crecimiento, como es la primavera y verano, la reducción de la PPNA fue entre 9% y 13% para los dos primeros años y alcanzó un 26% en el último año (Dogliotti et al. 2023). Entonces, teniendo en cuenta que en este trabajo se usó la media de la serie temporal (2001-2023), puede que, el efecto acumulativo de los registros de tantos años, haga perder detalles de estos eventos (M.S.1). Sería interesante poder aplicar las métricas en series temporales más acotadas para poder abordar estos periodos o eventos climáticamente contrastantes.

La PPNA de los pastizales de Uruguay está determinada por una combinación de factores edáficos, climáticos, biológicos y de manejo, que interactúan de manera compleja (Chapin III et al. 2011, Paruelo et al. 2022). Por ejemplo, Dogliotti et al. (2023) plantean que el agua disponible en el suelo es el factor de mayor importancia para explicar la variabilidad de producción de forraje interanual, por tanto esta variable podría estar dando pistas acerca de los factores importantes para los grupos, en conjunto con otros factores como la profundidad del suelo. En este sentido Pagnanini et al. (2019) y Guido et al. (2014) concuerdan en que la profundidad del suelo es un factor clave en la PPNA ya que los suelos más profundos tienen una mayor capacidad para retener agua, lo que es esencial para el crecimiento de las plantas, especialmente durante períodos secos. La conjunción de estos factores determinó, en este trabajo, características particulares en los grupos de respuesta y en la distribución de los mismos en el territorio nacional.

El Grupo 1 se encuentra asociado a zonas con un índice de productividad medio, bajo porcentaje de arena en suelo y relativa disponibilidad de agua en el suelo (CONEAT, M.S.2). En adición, este es el grupo con mayor porcentaje de pastizales naturales (45.9%; M.S.3) y está asociado mayormente a comunidades de pastizales altos y densos de las regiones Centro Sur, Sierras y Lomas del Este y Cuenca Sedimentaria del Noreste y Pastizales densos de la Región Cuesta Basáltica (36.7% del área ocupada por estas comunidades; M.S.3). Los pastizales altos y densos están caracterizados por la presencia de pastos de alto porte con especies generalmente mesohigrofiticas y se distribuye sobre suelos profundos sobre laderas cóncavas de colinas y lomadas, así como valles de arroyos y cañadas (Lezama et al. 2019). Estas condiciones, sumadas al tipo y productividad del suelo, podrían propiciar cierta estabilidad de la PPNA en los períodos de déficit hídrico y explicar la baja cantidad de períodos con déficit. El Grupo 2, el cual tiene la menor representatividad espacial de los tres, se concentra mayormente en el Este del país y se encuentra muy asociado a suelos de profundidad media pero con bajo índice de

productividad, alto porcentaje de arena en suelo y por tanto menor disponibilidad de agua en suelo (Agua Potencialmente Neta Disonible; M.S.2). Debido a estas características del suelo, este grupo está reflejando alto número de períodos (np) con máximos valores de déficit (vm) y máxima diferencia relativa (mpd) pero de poca duración (dl) y con una relativa proporción de fechas con déficit (fd; ver Fig.4). Es probable que estos últimos atributos (dl y fd) sean debido a que la predominancia de pastizales densos (26.8%; M.S.3) y la profundidad del suelo le permita mantener relativamente estable la productividad. Es decir, la recuperación puede ser rápida debido a la profundidad del suelo y la presencia de especies más adaptadas a condiciones de alta humedad. Knapp (2001) por ejemplo, para pastizales de Estados Unidos, propone que la PPNA aumenta de manera más notable en años húmedos frente a años secos donde existen mecanismos de amortiguación que reducen el impacto de la sequía en la productividad. Las respuestas asimétricas propuestas por Knapp (2001) sugieren que los pulsos en PPNA durante años húmedos son más acentuados que las disminuciones durante años secos.

Respecto al Grupo 3, este grupo presenta una productividad media con alta disponibilidad de agua en suelo y es el grupo con menor cantidad de arena en suelo (M.S.2). Sin embargo frente a la respuesta de las métricas presenta valores máximos (vm) y máximas diferencias relativas de déficit de productividad (mpd). Esto podría deberse a que está constituido por dos agrupaciones de Secciones Policiales. Unas que se encuentran al Norte del Rio Negro entre los departamentos de Artigas, Salto, Tacuarembó y Rivera, y otras que se ubican entre Soriano, Flores, San José y Colonia. Ambas agrupaciones de Secciones Policiales presentan diferentes características, aunque podrían estar respondiendo de la misma forma frente al déficit de PPNA. En el caso de la primera agrupación, la presencia de suelos superficiales de la Cuesta basáltica podría acompañar la relación con el comportamiento de las métricas debido a que los suelos poco profundos tienen menos capacidad de retención de agua y por lo tanto suelen ser más sensibles a eventos extremos como sequías. Según Oyarzabal y Paruelo (2019), la variabilidad interanual de la PPNA está altamente correlacionada con la precipitación y las diferencias en las características del suelo, como la capacidad de retención de agua. En adición, existen reportes de una disminución del 10% de la cobertura de pastizales en la región de la Cuesta Basáltica (Rama et al. 2018; Baeza et al. 2019) la cual podría estar afectando un porcentaje de los suelos más profundos de la región. Respecto a esto último, para el caso de la segunda agrupación, está ubicada en la región Centro-Sur donde Baeza et al. (2019) reportaron que al año 2016 la cobertura de pastizales naturales dejó de ser la cobertura dominante (38.8%) viéndose desplazada por el Uso Agrícola intensivo (52%). En adición, MapBiomass Uruguay (2024) reporta para la región del Escudo Cristalino una pérdida del 26% de la vegetación natural y un aumento del 22% de la cobertura de cultivos anuales, pasturas y forestación. Dichos cambios en el uso del suelo pueden tener implicancias

indirectas en la productividad de nuestros grupos debido a la afectación en componentes del ciclo hidrológico tales como la infiltración, temperatura superficial, escorrentía y evapotranspiración, traduciéndose en una menor capacidad de retención de agua en el suelo (Galicia, 2014). En efecto, el grupo 3 presentó respecto al grupo 1 un 10% menos de pastizales densos (26.6%) y es el grupo con el mayor porcentaje de otros usos del suelo (64%, M.S.3).

Los cambios en la PPNA no asociados a la precipitación tienen importancia en este tipo de ecosistema (Texeira et al. 2019). En este orden, las perturbaciones de origen antrópico son importantes modeladores de la variación interanual de la PPNA. El pastoreo y las quemas controladas son las dos perturbaciones de origen antrópico con mayor incidencia en la estructuración y funcionamiento de los pastizales en Uruguay (Paruelo et al. 2022; Lopez-Marsico et al. 2024b). Ciertamente, estas perturbaciones de origen antrópico podrían tener implicancias en la distribución espacial y características de los Grupos caracterizados en este estudio. Altesor et al. (2005) encontraron que la PPNA fue 51% mayor en situaciones pastoreadas en relación a sitios excluidos del ganado doméstico. Estos autores plantean que el pastoreo incrementa la PPNA al eliminar la biomasa muerta en pie. Asimismo el pastoreo puede favorecer la dominancia de gramíneas postradas de crecimiento estival, en lugar de las gramíneas erectas de crecimiento invernal que predominan en áreas no pastoreadas (Altesor et al. 2006). La presencia de especies postradas y con crecimiento estival (C_4) pueden no ser tan eficientes en la producción de biomasa como las especies erectas y con crecimiento invernal (C_3), especialmente en ciertas condiciones ambientales como la disponibilidad de agua y nutrientes, lo que determinaría una mayor variabilidad en la PPNA. Por ejemplo, en años con alta precipitación, las especies C_3 pueden contribuir más significativamente a la PPNA, mientras que en años secos, las especies C_4 pueden mantener la productividad (Altesor et al. 2005). En el caso de la quema de pastizales, Lopez-Marsico et al. (2024) plantea que el fuego tiene efectos significativos sobre la PPNA. Más concretamente en el contexto de los pastizales de Sierras del Este, una región abarcada en mayor medida por el Grupo 1, el fuego actúa como una perturbación que remueve la biomasa aérea, lo que puede llevar a un incremento en la PPNA a corto plazo (Bruzzone 2019), debido a la remoción de materia seca y la reducción de la competencia por luz y espacio. Sin embargo, la respuesta a largo plazo puede variar dependiendo de la frecuencia de las quemas y la interacción con el pastoreo. Más allá de la importancia de esta evidencia, es importante aclarar que estos procesos tienen relevancia en la modulación de la PPNA pero a menor escala de la que se plantea en este trabajo ya que casi el 100% de área de estudio se encuentra bajo pastoreo y las quemas prescritas ocupan un área muy pequeña en comparación con la superficie total de pastizales naturales en Uruguay. Podemos suponer que las variables más influyentes en la distribución de nuestros grupos fueron las características edáficas ya que

éstas regulan en gran parte la disponibilidad de agua en el suelo (Oyarzabal y Paruelo, 2019).

El presente trabajo tiene una serie de aplicaciones directas sobre la gestión de los pastizales de Uruguay. En primer lugar, la información generada sienta las bases para la gestión diferencial del territorio, utilizado por la actividad pecuaria, frente a eventos ambientales como sequías, y antrópicos (principalmente el pastoreo) facilitando la toma de decisiones y la implementación de medidas de emergencia. Esto podría ser de utilidad al momento de direccionar de manera más precisa las ayudas técnicas o económicas a los productores, diferenciando cada caso según la zona o región que ocupan. En segundo lugar, se propone una metodología innovadora ya que utiliza métricas derivadas de la curva estacional de la PPNA y técnicas de análisis multivariado para identificar y mapear áreas con diferentes comportamientos de déficit de forraje. En adición, evalúa el déficit de forraje a nivel nacional y en un período extenso (2001-2023), proporcionando una visión a largo plazo de las tendencias y variaciones en la PPNA. Claramente, esto contribuye al conocimiento científico ya que aporta un marco metodológico que puede ser aplicado para futuras investigaciones, ya sea en el territorio nacional como también en regiones dominadas por pastizales como en La Pampa y Campos del Norte (Soriano et al. 1992).

Este estudio representa una primera aproximación a la caracterización del déficit de la PPNA a nivel nacional en respuesta a distintas perturbaciones. Por un lado, se logró obtener y procesar la PPNA de pastizales naturales a nivel de Secciones Policiales en todo el territorio uruguayo para el período 2001-2023, generando métricas efectivas para caracterizar y mapear el déficit de la PPNA. La metodología aplicada permitió diferenciar tres grupos de Secciones Policiales con características diferentes en términos del comportamiento y respuesta de la PPNA frente a las perturbaciones, lo que brinda información sumamente útil para la gestión diferencial frente a eventos ambientales extremos, entre otras cosas. Si bien el trabajo reafirma que las perturbaciones ambientales (como los eventos de déficit hídrico) y antrópicas (principalmente el pastoreo y en menor medida las quemadas), tienen efectos significativos y variados sobre la PPNA de los pastizales, sería de interés poder avanzar en mejorar la resolución del impacto de dichas perturbaciones sobre los grupos presentados. Incluso, este trabajo resume 22 años y potencialmente sería interesante analizar por separado años climáticamente contrastantes. Un aspecto clave, no considerado en este trabajo, se vincula con la resiliencia de los pastizales. Los datos generados en este trabajo podrían aportar a cuantificar la resiliencia de estos ecosistemas, elemento clave en el actual contexto de cambio climático, donde se espera mayor intensidad de los eventos climáticos extremos.

Bibliografía:

- Alcaraz-Segura, D., & Paruelo, J. M., & Cabello, J. (2006). Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography*, 15, 200–212.
- Alcaraz-Segura, D., Paruelo, J. M., Epstein, H. E., & Cabello, J. (2013). Environmental and human controls of ecosystem functional diversity in temperate South America. *Remote Sensing*, 5(1), 127–154. <https://doi.org/10.3390/rs5010127>
- Allen, V. G., Batello, C., Berretta, E. J., Hodgson, J., Kothmann, M., Li, X., Sanderson, M. (2011). An international terminology for grazing lands and grazing animals. *Grass and Forage Science*, 66(1), 2.
- Altesor, A., Piñeiro, G., Lezama, F., Jackson, R. B., Sarasola, M., & Paruelo, J. M. (2006). Ecosystem changes associated with grazing in subhumid South American grasslands. *Journal of Vegetation Science*, 17(3), 323–332. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2006.tb02452.x>
- Altesor, A., Oesterheld, M., Leoni, E., Lezama, F., & Rodríguez, C. (2005). Effect of grazing on community structure and productivity of a Uruguayan grassland. *Plant Ecology*, 179(1), 83–91. <https://doi.org/10.1007/s11258-004-5800-5>
- Baeza, S., & Paruelo, J. M., & Lezama, F. (2011). Caracterización funcional en pastizales y sus aplicaciones en Uruguay. En A. Altesor, W. Ayala, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (Serie FPTA N°26, pp. 163–182). INIA, Montevideo.
- Baeza, S., & Paruelo, J. M. (2018). Spatial and temporal variation of human appropriation of net primary production in the Rio de la Plata grasslands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 145, 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.014>
- Baeza, S., Rama, G., & Lezama, F. (2019). Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. En A. Altesor, L. López-Mársico, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II* (Serie FPTA N° 69, pp. 27–47). INIA, Montevideo.
- Baeza, S., Vélez-Martin, E., De Abelleira, D., Banchemo, S., Gallego, F., Schirmbeck, J., et al. (2022). Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: the MapBiomass Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>
- Bernardi, R. E., Holmgren, M., Arim, M., & Scheffer, M. (2016). Why are forests so scarce in subtropical South America? The shaping roles of climate, fire and livestock. *Forest Ecology and Management*, 363, 212–217.
- Boavista, L. D. R., Trindade, J. P. P., Overbeck, G. E., & Müller, S. C. (2019). Effects of grazing regimes on the temporal dynamics of grassland communities. *Applied Vegetation Science*, 22(2), 326–335.
- Bond, W. J., & Keeley, J. E. (2005). Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(7), 387–394.
- Bond, W. J. (2019). *Open ecosystems: ecology and evolution beyond the forest edge*. Oxford University Press.

- Bruzzone, L. (2019). *Evento de quemas en pastizales de Sierras del Este: una caracterización basada en sensores* (Tesis de grado). Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Cabello, J., Fernández, N., Alcaraz-Segura, D., Oyonarte, C., Piñeiro, G., Altesor, A., Delibes, M., & Paruelo, J. M. (2012). The ecosystem functioning dimension in conservation: insights from remote sensing. *Biodiversity and Conservation*, *21*, 3287–3305. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0370-7>
- Cazorla, B. P., Cabello, J., Peñas, J., Alcaraz-Segura, D., & Paruelo, J. M. (2021). Incorporating Ecosystem Functional Diversity into Geographic Conservation Priorities Using Remotely Sensed Ecosystem Functional Types. *Ecosystems*, *24*, 548–564. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00533-4>
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2014). NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, *61*(6), 1–36. <https://doi.org/10.18637/jss.v061.i06>
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2022). *Determining the Best Number of Clusters in a Data Set. NbClust* (Version 3.0.1) [Software]. <https://sites.google.com/site/malikacharrad/research/nbclust-package>
- Chapin III, F. S., Matson, P. A., & Mooney, H. A. (2011). *El concepto de ecosistema*. En *Principios de ecología de ecosistemas terrestres* (pp. 4-17). Springer.
- Cuello, N., López-Mársico, L., & Rodríguez, C. (2020). Field burn versus fire-related cues: germination from the soil seed bank of a South American temperate grassland. *Seed Science Research*, *30*(3), 206-214. <https://doi.org/10.1017/S0960258520000288>
- Collins, S. L., Glenn, S. M., & Gibson, D. J. (1995). Experimental analysis of intermediate disturbance and initial floristic composition: decoupling cause and effect. *Ecology*, *76*(2), 486-492.
- Dogliotti, S., Piñeiro, G., Soca, P., ... Sanchez, A. (2023). *Entregable 35. Informe final analizando el impacto del proyecto en los 60 predios en las dimensiones económico productiva, sociales y de género, y ambientales medidas en los 60 predios. Proyecto GCP/URU/034/GFF "Producción ganadera climáticamente inteligente y restauración del suelo en pastizales uruguayos"*.
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., García Marquèz, J. R., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., & Lautenbach, S. (2012). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, *36*(1), 27-46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Druille, M., Oyarzabal, M., & Oesterheld, M. (2019). Radiation use efficiency of forage resources: A meta-analysis. *Agronomy Journal*, *111*(3), 1770-1778. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0645>
- Ferreira, P. M. A., Andrade, B. O., Podgaiski, L. R., Dias, A. C., Pillar, V. D., Overbeck, G. E., Milton, S. M., & Boldrini, I. I. (2020). Long-term ecological research in southern Brazil grasslands: Effects of grazing exclusion and deferred grazing on plant and arthropod communities. *PLoS ONE*, *15*(1), e0227706.
- Fidelis, A., Blanco, C. C., Müller, S. C., Pillar, V. D., & Pfadenhauer, J. (2012). Short-term changes caused by fire and mowing in Brazilian Campos grasslands with different long-term fire histories. *Journal of Vegetation Science*, *23*(3), 552-562.

- Fischer, F. M., Bonnet, O. J., Cezimbra, I. M., & Pillar, V. D. (2019). Long-term effects of grazing intensity on strategies and spatial components of functional diversity in subtropical grassland. *Applied Vegetation Science*, 22(1), 39-47.
- Fuhlendorf, S. D., Engle, D. M., Kerby, J. A. Y., & Hamilton, R. (2009). Pyric herbivory: rewilding landscapes through the recoupling of fire and grazing. *Conservation Biology*, 23(3), 588-598.
- Galicia, L. (2014). *El cambio de uso de suelo: Consecuencias en el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua*. Revista de Educación y Cultura en México. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/263845334>
- Gallego, F., Lezama, F., Pezzani, F., López-Mársico, L., Leoni, E., Mello, A. L., & Costa, B. (2017). Estimación de la productividad primaria neta aérea y capacidad de carga ganadera: un estudio de caso en Sierras del Este, Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 21(1), 120-130.
- Gibson, D. J. (2009). *Grasses and grassland ecology*. Oxford University Press.
- Golluscio, R. (2009). Receptividad ganadera: marco teórico y aplicaciones prácticas. *Ecología Austral*, 19, 215-232.
- Grigera, G., & Oesterheld, M. (2020). Variability of radiation use efficiency in mixed pastures under varying resource availability, defoliation and time scale. *Grassland Science*, 00, 1-11. <https://doi.org/10.1111/grs.12302>
- Grime, J. P. (1979). *Plant strategies and vegetation processes*. John Wiley and Sons.
- Guido, A., Diaz Varela, R., Baldassini, P., & Paruelo, J. (2014). Spatial and Temporal Variability in Aboveground Net Primary Production of Uruguayan Grasslands. *Rangeland Ecology & Management*, 67(1), 30-38. <https://doi.org/10.2111/REM-D-12-00125.1>
- Halekoh, U., & Højsgaard, S. (2024). *doBy: Groupwise Statistics, LSmeans, Linear Estimates, Utilities* (R package version 4.6.24). <https://CRAN.R-project.org/package=doBy>
- Instituto Geografico Militar. (2023). *Situación Geográfica*. <https://igm.gub.uy/situacion-geografica/>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). (s.f.). *Pastizales R.O.U.* <https://idea-agro-app-167243929089.us-central1.run.app/zones>
- Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET). (2023). *Características Climáticas*. <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/caracteristicas-climaticas>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC.
- Knapp, A., & Smith, M. (2001). Variation Among Biomes in Temporal Dynamics of Aboveground Primary Production. *Science*, 291(5503), 481-484. <https://doi.org/10.1126/science.291.5503.481>
- Laterra, P., Vignolio, O. R., Hidalgo, L., Fernández, O. N., Cauhépé, M. A., & Maceira, N. (1998). Dinámica de pajonales de paja colorada (*Paspalum* spp.) manejados con fuego y pastoreo en la Pampa deprimida argentina. *Ecotropicos*, 11(2), 141-149.
- Legendre, P., & Legendre, L. (1998). *Numerical ecology* (2nd ed.). Elsevier.
- Lezama, F., & Paruelo, J. M. (2016). Disentangling grazing effects : trampling, defoliation and urine deposition. *Applied Vegetation Science*, 19(4), 557–566.

- Lezama, F., Altesor, A., Pereira, M., & Paruelo, J. M. (2019). Grasslands of Uruguay: classification based on vegetation plots. *Phytocoenologia*. <https://doi.org/10.1127/phyto/2019/0215>
- Liu, H. Q., & Huete, A. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 457–465.
- Lopez-Marsico, L. (2020). *Efectos del fuego sobre la vegetación y variables ambientales en pastizales de sierras del este, Uruguay* (Tesis de Doctorado). Facultad de Agronomía, Universidad de la República.
- López-Mársico, L., Lezama, F., & Altesor, A. (2019). ¿Qué sabemos sobre los efectos del fuego en pastizales?. En A. Altesor, L. López-Mársico, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II* (Serie FPTA N° 69, pp. 97-107). INIA, Montevideo.
- López-Mársico, L., Lezama, F., & Altesor, A. (2021). Heterogeneity decreases as time since fire increases in a South American grassland. *Applied Vegetation Science*, 24(1), e12521. <https://doi.org/10.1111/avsc.12521>
- López-Mársico, L., Lezama, F., & Altesor, A. (2024). Fire and grazing interaction in a subhumid grassland: Effects on a dominant tussock grass. *Applied Vegetation Science*, 27(3), e12795.
- MapBiomass Uruguay. (2024). *Colección 2 de mapas anuales de cobertura y uso del suelo en Uruguay entre 1985 y 2023*. Consultada el 23 de marzo de 2025, de chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcgclclefindmkaj/https://uruguay.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/6/2024/12/Factsheet_Uruguai_2.0_09.12.2024.pdf
- Marcus W. Beck. (2024). *ggord: Diagramas de ordenación con ggplot2* (R package version 1.1.8). <https://zenodo.org/badge/latestdoi/35334615>
- Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP). (2021). *Actualización de Cobertura y Uso del Suelo del Uruguay al año 2020/2021*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/noticias/actualizacion-cobertura-uso-del-suelo-del-uruguay-ano-20202021>
- Monteith, G. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9(3), 747–766.
- Müller, O. V., Berbery, E. H., Alcaraz-Segura, D., & Ek, M. B. (2014). Regional model simulations of the 2008 drought in southern South America using a consistent set of land surface properties. *Journal of Climate*, 27(18), 6754–6778. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00463.1>
- Noy-Meir, I. (1995). Interactive effects of fire and grazing on structure and diversity of Mediterranean grasslands. *Journal of Vegetation Science*, 6(5), 701-710.
- O'Connor, T. G. (1995). Transformation of a savanna grassland by drought and grazing. *African Journal of Range & Forage Science*, 12(2), 53–60.
- Oesterheld, M., Sala, O. E., & McNaughton, S. J. (1992). Effect of animal husbandry on herbivore-carrying capacity at a regional scale. *Nature*, 356(6366), 234-236.
- Oesterheld, M., Loreti, M., Semmartin, M., & Paruelo, J. M. (1999). La heterogeneidad espacial de la productividad primaria en pastizales: causas y consecuencias. *Ecología Austral*, 9(2), 217-230.
- Oesterheld, M., Paruelo, J. M., & Oyarzabal, M. (2011). Estimación de la productividad primaria neta aérea a partir de diferencias de biomasa y de integración de la radiación absorbida. En A. Altesor, W. Ayala, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (Serie FPTA N°26, pp. 113-119). INIA, Montevideo.

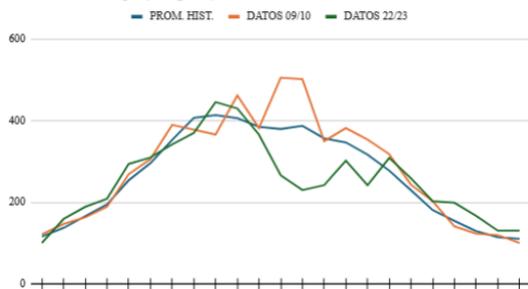
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, G., & Wagner, H. (2019). *vegan: Community Ecology Package* (R package version 2.6-8). <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Overbeck, G. E., & Pfadenhauer, J. (2007). Adaptive strategies in burned subtropical grassland in southern Brazil. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 202(1), 27-49.
- Oyarzabal, M., Oesterheld, M., & Grigera, M. (2011). ¿Cómo estimar la eficiencia en el uso de la radiación mediante sensores remotos y cosechas de biomasa?. En A. Altesor, W. Ayala, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (Serie FPTA N°26, pp. 121-133). INIA, Montevideo.
- Oyarzabal, M., Clavijo, J., Oakley, L., Biganzoli, F., Tognetti, P., Barberis, I., Maturo, H. M., Aragón, R., Campanello, P. I., Prado, D., Oesterheld, M., & León, R. (2018). Unidades de Vegetación de la Argentina. *Ecología Austral*, 28(1), 040–063.
- Oyarzabal, M., Andrade, B., Pillar, V. D., & Paruelo, J. (2019). Temperate subhumid grasslands of southern South America. In *Encyclopedia of the World's Biomes* (pp. 577–593). Elsevier.
- Oyarzabal, M., & Paruelo, J. M. (2019). Dinámica de la productividad primaria de las comunidades de pastizal del Uruguay. En A. Altesor, L. López-Mársico, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II* (Serie FPTA N° 69, pp. 111-122). INIA, Montevideo.
- Oyarzabal, M., Gallego, F., & Paruelo, J. M. (2023). Indicadores de recursos forrajeros: mapas, productividad, huella ambiental y estado de conservación. Su evaluación mediante sensores remotos. En *Indicadores Ambientales para la producción animal* (Capítulo 7). Editorial Asociación Argentina de Producción Animal. https://www.researchgate.net/publication/368873717_Indicadores_de_recursos_forrajeros_mapas_productividad_huella_ambiental_y_estado_de_conservacion_Su_evaluacion_mediante sensores_remos
- Pagnanini, F., Oyarzabal, M., Paruelo, J. M., & Pereira, M. (2019). Productividad primaria neta aérea de pastizales de Uruguay: Variación entre años y entre sitios. En A. Altesor, L. López-Mársico, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II* (Serie FPTA N° 69, pp. 139-153). INIA, Montevideo.
- Panario, D. (1988). *Geomorfología del Uruguay*. Publicación de la Facultad de Humanidades y Ciencias, Uruguay.
- Panario, D., Gutiérrez, O., Achkar, M., Bartesaghi, L., & Ceroni, M. (2011). *Clasificación y mapeo de ambientes de Uruguay* (Informe Técnico). Convenio MGAP/PPR – Facultad de Ciencias/Vida Silvestre/ Sociedad Zoológica del Uruguay/CIEDUR.
- Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., & Sala, O. E. (2001). Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems*, 4(8), 683–698. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0037-9>
- Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 17(3), 4-22.
- Paruelo, J. M., Piñeiro, G., Baldi, G., Baeza, S., Lezama, F., Altesor, A., & Oesterheld, M. (2010). Carbon stocks and fluxes in rangelands of the Rio de la Plata basin. *Rangeland Ecology and Management*, 63(1), 94-108. <https://doi.org/10.2111/08-055.1>

- Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Oesterheld, M., Golluscio, R. A., & Aguiar, M. R. (2007). The grasslands and steppes of Patagonia and the Río de la Plata plains. In T. T. Veblen, K. R. Young, & A. R. Orme (Eds.), *The physical geography of South America* (1st ed., pp. 232–248). Oxford University Press.
- Paruelo, J. M., Oyarzabal, M., & Oesterheld, M. (2011). El seguimiento de los recursos forrajeros mediante sensores remotos: bases y aplicaciones. En A. Altesor, W. Ayala, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (Serie FPTA N°26, pp. 135-145). INIA, Montevideo.
- Paruelo, J. M., Oesterheld, M., Altesor, A., Piñeiro, G., Rodríguez, C., Baldassini, P., Irisarri, G., López-Mársico, L., & Pillar, V. D. (2022). Herbívoros y fuegos: Su rol en la configuración de la estructura y el funcionamiento de los pastizales del Río de la Plata. *Ecología Austral*, 32(2bis), 784–805. <https://doi.org/10.25260/EA.22.32.2.1.1880>
- Pengfei Ma, Jingxue Zhao, Haoze Zhang, Lin Zhang, & Tianxiang Luo. (2023). Increased precipitation leads to earlier green-up and later senescence in Tibetan alpine grassland regardless of warming. *Science of The Total Environment*, 871, 162000. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162000>
- Pezzani, F., Lezama, F., Gallego, F., López-Mársico, L., Leoni, E., Costa, B., Parodi, G., & Mello, A. L. (2017). El método de corte de biomasa genera mayores diferencias en la estimación de la productividad de pastizales que el tipo de pastizal. *Revista Argentina de Producción Animal*, 37(1), 21-32.
- Piñeiro, G. (2011). Impactos de la ganadería sobre la dinámica del C y N en los pastizales del Río de la Plata. En A. Altesor, W. Ayala, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (Serie FPTA N°26, pp. 79-95). INIA, Montevideo.
- Pickett, S. T., & White, P. S. (1985). *The Ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press INC.
- Prince, S. D. (1991). A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), 1313-1330.
- Ríos, C. F., Lezama, F., & Altesor, A. (2024). Floristic heterogeneity of the last grassland remnants in an agricultural landscape: a phytosociological study in the Uruguayan Eastern Plains. *Phytocoenologia*. <https://doi.org/10.1127/phyto/2020/0417>
- Royo Pallarés, O., Berretta, E. J., & Maraschin, G. E. (2005). The South American Campos ecosystem. In J. M. Suttie, S. G. Reynolds, & C. Batello (Eds.), *Grasslands of the world* (Plant Production and Protection Series 34, pp. 171–219). FAO.
- Rodríguez, C., & Cayssials, V. (2011). Cambios estructurales en los pastizales asociados a la ganadería. En A. Altesor, W. Ayala, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales* (Serie FPTA N°26, pp. 69-78). INIA, Montevideo.
- Rusch, G. M., & Oesterheld, M. (1997). Relationship between productivity, and species and functional group diversity in grazed and non-grazed Pampas grassland. *Oikos*, 78(3), 519-526.
- Sala, O., Deregibus, V. A., Schlichter, T., & Alippe, H. (1981). Productivity dynamics of a native temperate grassland in Argentina. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 34(1), 48-51.
- Sellers, P. J. (1985). Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), 1335-1372.
- Soriano, A., León, R. J. C., Sala, O. E., Lavado, R. S., Deregibus, V. A., Cauhépé, M. A., Scaglia, O. A., Velázquez, C. A., & Lemcoff, J. H. (1992). Río de la Plata

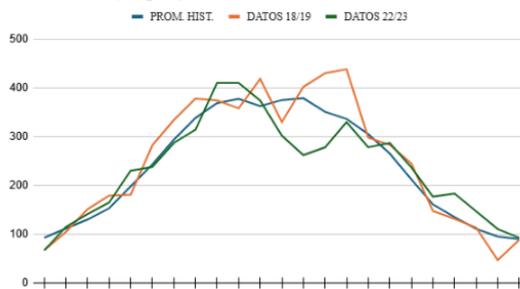
- grasslands. In R. Coupland (Ed.), *Natural grasslands: introduction and western hemisphere* (pp. 367-407). Elsevier.
- Staiano, L. (2016). *Una caracterización de los cambios funcionales de la vegetación asociados a la transformación del territorio en el noroeste argentino* (Tesis de Licenciatura en Ciencias Ambientales). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
 - Staiano, L., Camba Sans, G. H., Baldassini, P., Gallego, F., Texeira, M. A., & Paruelo, J. M. (2021). Putting the Ecosystem Services idea at work: Applications on impact assessment and territorial planning. *Environmental Development*, 38, 100570. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100570>
 - Texeira, M., Oyarzabal, M., & Paruelo, J. M. (2019). Relación entre la productividad primaria anual y las precipitaciones en pastizales de la Cuesta Basáltica y de las Sierras del Este (1981-2015). En A. Altesor, L. López-Mársico, & J. M. Paruelo (Eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II* (Serie FPTA N° 69, pp. 155-167). INIA, Montevideo.
 - Tommasino, A., Lezama, F., Gallego, F., Camba Sans, G., & Paruelo, J. M. (2023). Rangeland resilience to droughts: Changes across an intensification gradient. *Applied Vegetation Science*, 26, e12722. <https://doi.org/10.1111/avsc.12722>
 - Toreti, A., Bavera, D., et al. (2023). *Drought in South America April 2023* (Publications Office of the European Union, JRC133788). <https://doi.org/10.2760/873366>
 - Valbuena, F. (2019). *Efecto de un periodo de extrema sequía sobre las propiedades bioquímicas de pastizales mediterráneos en el término municipal de Las Rozas, Comunidad de Madrid*.
 - Wenrui Bai, Huanjiong Wang, & Shaozhi Lin. (2023). Magnitude and direction of green-up date in response to drought depend on background climate over Mongolian grassland. *Science of The Total Environment*, 902, 166051. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166051>
 - Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
 - Wickham, H., Hester, J., Chang, W., & Bryan, J. (2022). *devtools: Tools to Make Developing R Packages Easier* (R package). <https://github.com/r-lib/devtools>

Material Suplementario:

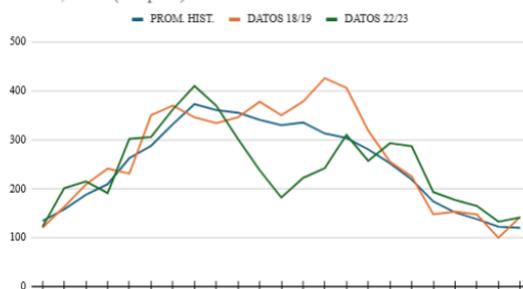
S.P. 10, Lavalleja (Grupo 1)



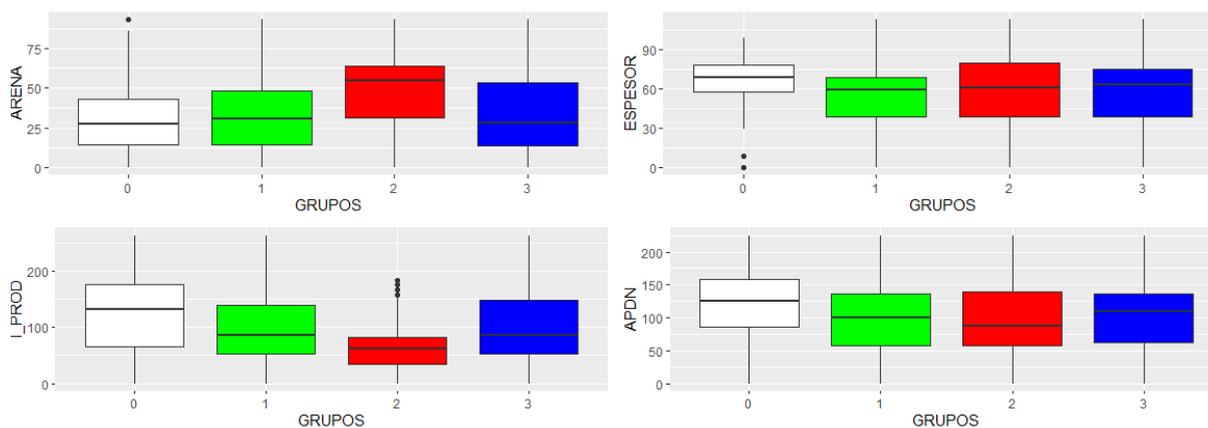
S.P. 6, Rocha (Grupo 2)



S.P. 14, Salto (Grupo 3)



M.S. 1. Gráficos de dinámica estacional de la PPNA para dos años agrícolas para cada grupo. Se toma para cada Sección Policial ejemplar, un año con precipitaciones promedio vs un año con déficit hídrico. El año de déficit hídrico seleccionado fue el 22/23 y el año con precipitación promedio varió dependiendo de cada Sección Policial.



M.S. 2. Gráficos Box Plot de índices o variables Coneat para cada Grupo. Arena: porcentaje de arena en suelo. Espesor: Profundidad del suelo (cm). I_Prod: Índice de productividad CONEAT; APDN: Agua Potencialmente Disponible Neta. Por Grupo 0 se incluyen las Secciones Policiales que no cuentan con presencia de pastizales naturales.

Grupos	P. ralos	P. densos	Comunidades Planicies del Este	Otros usos del suelo	Total P.N
Grupo 1	8,1	36,7	1,1	53,1	45,9
Grupo 2	9,8	26,9	2,11	61,2	38,8
Grupo 3	8,8	26,6	0,5	64,1	35,9

M.S. 3. Tabla con porcentajes de cobertura de suelo. P. ralos = pastizales ralos; P. densos = Pastizales densos (Baeza et al 2019); Comunidades Planicies del Este (Ríos et al. 2024); Otros usos del suelo; Total P.N= porcentaje total de cobertura de pastizales naturales.