

Sistemas de pronóstico de la productividad forrajera y el balance hídrico para la región de los pastizales del Río de la Plata

Investigador Titular: Marcos Texeira.

Resumen del proyecto

La ganadería en la región de los pastizales del Río de la Plata es mayoritariamente de base pastoril. Como tal, el ganado depende principalmente de la producción forrajera de pasturas y pastizales. En las últimas tres décadas se ha avanzado significativamente en entender los controles de la variación espacial y temporal de la productividad primaria neta aérea (PPNA), el principal determinante de la producción forrajera. La PPNA y la producción forrajera dependen en gran medida del agua disponible en el suelo. Recientemente, se ha desarrollado un sistema de seguimiento de la PPNA en tiempo casi real a partir de datos provistos por sensores remotos y estaciones meteorológicas. Pero no se dispone aún de un sistema de pronóstico de la PPNA ni de su control más importante. El objetivo general de este proyecto es desarrollar sistemas de pronóstico de: 1) el balance hídrico climático (BHC), y 2) la PPNA. Los sistemas de pronóstico operarán para las áreas ganaderas y los recursos forrajeros más importantes de los pastizales del Río de la Plata. Los pronósticos se basarán en la dinámica de las condiciones endógenas (PPNA y BHC de períodos previos) y exógenas (precipitación, temperatura y evapotranspiración, de períodos previos, y de proyecciones de modelos climáticos). Las condiciones endógenas serán estimadas *ad hoc*, y las exógenas serán tomadas de bases de datos de dominio público. Los pronósticos serán generados mediante redes neuronales recurrentes, una familia de técnicas de aprendizaje automático especialmente apropiadas para el análisis y pronóstico de series temporales no lineales. Los pronósticos tendrán una anticipación de al menos 1 mes, cobertura temporal de entre 1 y 6 meses para toda la región, y resolución espacial de aproximadamente 6 ha. Los pronósticos serán públicos y podrán ser consultados en una plataforma web-SIG a distintos niveles: región y unidad político-administrativa, desde departamento hasta establecimiento y potrero dentro de un establecimiento. Todos los actores de la cadena ganadera, desde los productores hasta los decisores políticos, se beneficiarán al contar anticipadamente con pronósticos del BHC y la PPNA. Esta información es clave para el uso y una planificación más educada de los recursos forrajeros en sistemas pastoriles. No existen en la región sistemas análogos al propuesto, ni tampoco abundan en el mundo.

PLAN DE TRABAJO

Objetivo General o marco de referencia.

El objetivo general de este proyecto es desarrollar un sistema de pronósticos de: 1) el BHC, y 2) la PPNA. Los sistemas de pronóstico operarán para las áreas ganaderas y los recursos forrajeros más importantes de la región de los pastizales del Río de la Plata. El marco de referencia es que los niveles actuales del BHC y de la PPNA dependen de las condiciones ambientales actuales y de las de períodos anteriores (Oosterheld et al. 2001, Wiegand et al. 2004, Liu et al. 2019). Por lo tanto, la capacidad de generar pronósticos del BHC y de la PPNA depende en gran medida de la influencia de los períodos pasados y de los escenarios meteorológicos futuros de corto y mediano plazo. Los pronósticos se basarán en la dinámica de las condiciones endógenas (PPNA y BHC de períodos previos) y exógenas (precipitación, temperatura y evapotranspiración, de períodos previos y de proyecciones de modelos climáticos).

Objetivos Específicos.

Objetivo específico 1 - Estimar la PPNA de los recursos forrajeros más importantes de la región, desde el 2000 al presente, con resolución temporal mensual y espacial de aproximadamente 6 ha, y mediante la aplicación del modelo radiativo de Monteith (1972).

Objetivo específico 2 - Estimar el BHC en las áreas ganaderas de la región, desde el 2000 al presente, con una resolución compatible con la de las estimaciones de PPNA del objetivo anterior, y mediante la aplicación del modelo de Thornwaite y Mather (1957).

Objetivo específico 3 - Cuantificar en qué medida las variaciones temporales de la PPNA son explicadas por el BHC y sus componentes.

Objetivo específico 4 - Desarrollar un sistema de pronóstico del BHC y de la PPNA de los principales recursos forrajeros de la región.

Objetivo específico 5 - Implementar los sistemas de pronóstico del BHC y de la PPNA en una plataforma web-SIG de acceso abierto.

Introducción General.

A medida que las economías de los países en desarrollo crecen, su demanda de alimentos de mejor calidad aumenta (Popkin 2003). La proporción del suministro de energía nutricional proveniente de cereales está disminuyendo, desde un 60% a principios de 1960 a un 50% esperado para el 2030. Paralelamente, la participación global de la proteína animal en la alimentación aumentó de un 7% a casi un 12% (Bruinsma 2017), y continuará en aumento, principalmente en los países en desarrollo. Distintos modelos indican que el consumo per cápita de proteína animal aumentará poco en Norteamérica y Europa, aumentará más significativamente en América Latina y el Caribe, y se duplicará en Asia y África. Actualmente, el consumo anual de carne vacuna en los países en desarrollo es de 41 millones de toneladas, y se estima que para el 2027 aumentará un 16% y alcanzará los 47,6 millones de toneladas (OECD <https://stats.oecd.org/>). Pocos países en el mundo podrán satisfacer esta demanda creciente de carne.

Argentina, Brasil y Uruguay se encuentran entre los diez primeros países exportadores de carne; en 2017 produjeron el 6% del suministro mundial (USDA 2018). En estos países el sector de la carne representa un componente importante del producto bruto interno del sector agropecuario (Bruinsma 2017, Rossini et al. 2017). Si bien los productores ganaderos de la región han adquirido experiencia en el manejo de las existencias y el mejoramiento genético (Cantet et al. 2017, Goszczynski et al. 2018), la brecha entre los rendimientos máximos obtenibles y los rendimientos promedio en los sistemas de producción aún es relativamente amplia y no ha disminuido durante los últimos treinta años (Viglizzo et al. 2001, 2011). Una gran parte de esta brecha se asocia a la escasa información sobre la variación espacial y temporal de la principal fuente de energía para el ganado, el forraje. La ganadería en estos tres países es principalmente de base pastoril, el ganado consume *in situ* el forraje producido por pastizales naturales y pasturas implantadas (Herrero y Thornton 2013, Irisarri et al. 2014, Thornton et al. 2009, Viglizzo et al. 2011). Como la oferta forrajera es mucho más variable que la demanda animal, es necesario manejar adecuadamente la variación en la cantidad y calidad del forraje (Bradford et al. 2006, Craine et al. 2017, 2010, Paruelo et al. 1997). En este sentido, contar con pronósticos de la producción forrajera y de las condiciones ambientales que la determinan será muy útil e impactará positivamente en los niveles de producción.

Tradicionalmente, la PPNA, ha sido estimada mediante cortes secuenciales de biomasa en el campo (Sala y Austin 2000, Scurlock et al. 2002). La desventaja de este método es que es muy demandante de trabajo, por lo que, generalmente se dispone de unas pocas estimaciones de PPNA para un área, cuya extrapolación espacial y temporal suele ser muy difícil. Como consecuencia, las escasas estimaciones de PPNA hechas a partir de cortes en el campo suelen ser insuficientes. La estimación de la PPNA mediante índices espectrales derivados de satélites permite superar estas dificultades (Gamon et al. 1992, Paruelo et al. 1997, Paruelo et al. 2000, Huete et al. 2002, Running et al. 2004, Di Bella et al. 2004, Reeves et al. 2014). Éste es un método rápido, económico, no destructivo,

posee una relativa alta resolución temporal y espacial, es realizado con un mismo protocolo y cubre áreas extensas. El método se basa en el modelo radiativo de Monteith (1972), el cual establece que la PPNA resulta del triple producto entre la radiación incidente (RFA), la fracción de ésta absorbida por la vegetación (fRFA) y la eficiencia de uso de la radiación (EUR):

$$PPNA = RFA \times fRFA \times EUR$$

(ecuación 1)

La radiación incidente es un dato relativamente fácil de obtener (Ceballos y de Oliveira Macedo, 2014). La fracción de la radiación incidente absorbida por la vegetación puede estimarse mediante índices espectrales como el índice de vegetación normalizado o el índice de vegetación mejorado (NDVI o EVI, Sellers et al. 1992, Huete et al. 2002, Pettorelli 2013). La eficiencia de uso de la radiación, el componente más incierto del modelo, depende del tipo de vegetación y puede ser estimado mediante diversos métodos (Garbulsky et al. 2008, Oyarzabal et al. 2011).

Tradicionalmente, el régimen hidrológico de una región se estima como la diferencia entre la precipitación (las entradas de agua al sistema) y la evapotranspiración potencial (las salidas de agua del sistema). El método de Thornwaite (1948) es el más utilizado para estimar la evapotranspiración potencial en base a datos climáticos (temperaturas mensuales e índice de calor). Este método básico se ha mejorado incorporando además la radiación, la humedad relativa y la velocidad del viento (el modelo de Penman-Monteith, Allen 2006). Más recientemente, se incorporaron estimaciones de evapotranspiración potencial basadas en sensores remotos, como por ejemplo el producto MOD16A2.006 de MODIS (Mu et al. 2014) o el producto de evapotranspiración de Terraclimate (Abatzoglou et al. 2018). Así, al igual que para el caso de la PPNA, el BHC puede ahora calcularse de manera rápida, económica, con una relativa alta resolución temporal y espacial, con un mismo protocolo y una extensa cobertura.

Principales contribuciones de otros.

Las estimaciones de PPNA basadas en sensores remotos son cada vez más frecuentes. Un ejemplo de ello son tres esfuerzos, dos de ellos internacionales, de generación de estimaciones de PPNA de los últimos meses (<http://www.geo-rapp.org/>, Gherardi y Oldham 2003, Grigera et al. 2007, Mata et al. 2004), o el de los siguientes (<http://grasscast.agsci.colostate.edu/>, Chen et al. 2019, Peck et al. 2019, Hartman et al. 2020). La tercera iniciativa, ha sido desarrollada por nuestro equipo de investigación en Argentina, y está siendo transferida a Uruguay (Observatorio forrajero Nacional; <http://produccionforrajes.org.ar/>; Oyarzabal y Paruelo, 2019). Aunque hay aspectos en los que cada uno es único, aún no se cuenta con un sistema de pronósticos de la PPNA y el BHC. Geo-Rapp es una iniciativa internacional que proporciona datos globales de estimaciones de PPNA basadas en MODIS (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>), la misma información espectral de base que usamos en nuestra iniciativa, el Observatorio Forrajero Nacional. Específicamente, en ambos se usa la información recopilada cada 16 días a una resolución espacial de aproximadamente 6 ha. Geo-Rapp, a diferencia del Observatorio Forrajero Nacional, no distingue entre tipos de recursos forrajeros. Por ejemplo, no discrimina entre pastizales naturales, pasturas y verdeos, cuyas diferencias de PPNA y calidad nutritiva son significativas. Por ejemplo, en la región el pastoreo directo de los verdeos puede representar hasta el 30% del suministro de energía en los sistemas de engorde (Ojeda et al., 2018). Generar pronósticos de la PPNA por tipo de recurso forrajero es particularmente importante en la región, dado que dentro de un establecimiento pueden coexistir hasta cuatro tipos de recursos forrajeros con dinámica estacional y calidad nutritiva contrastantes (Nosetto et al., 2015). En cambio, Grass-Cast informa la PPNA actual de los pastizales naturales de las grandes llanuras del centro-norte de los EEUU, además de pronósticos del cambio relativo esperado de la PPNA para el mes próximo más cercano. Esta información es provista a nivel de condado. La lógica y las técnicas de Grass-Cast no son directamente aplicables a nuestra región, no sólo porque la heterogeneidad de recursos forrajeros es mucho mayor sino porque muchas de las relaciones empíricas utilizadas poseen un fuerte componente local.

En un gradiente regional, las diferencias en la PPNA entre sitios están asociadas positivamente con la precipitación media anual (Sala et al. 1988, Durante et al. 2017, Ye et al. 2018). A una resolución espacial más detallada, otros controles adquieren mayor preponderancia e interactúan con la precipitación: la topografía, los suelos, y el régimen de disturbios como el fuego, la herbivoría y el manejo (Oosterheld et al. 1999). A lo largo del tiempo y para un mismo sitio, la variabilidad de la PPNA también se encuentra asociada positivamente con la disponibilidad de agua, aunque con menor intensidad (Paruelo et al. 1999, Jobbágy et al. 2002). Si bien la precipitación es la variable que ha sido más utilizada como indicador de la disponibilidad de agua, existen otras variables menos exploradas y que dan cuenta del agua que efectivamente está disponible para la vegetación. Por ejemplo, el cociente entre la evapotranspiración actual y potencial (Baldi et al. 2016, Chen et al. 2019), el balance hídrico simple (Thornwaite y Mather 1957), y el índice estandarizado de precipitación/evapotranspiración (Vicente-Serrano et al. 2010, 2015) explican también la variación de la PPNA.

Principales contribuciones por parte del grupo del proyecto.

Los investigadores del grupo tienen una amplia experiencia en el estudio de los controles de la dinámica espacial y temporal de la PPNA y de los flujos de agua (Di Bella et al. 2000, 2019, Paruelo et al. 1999, 2010, Pagnanini et al. 2019, Texeira et al. 2019a). Han realizado mejoras significativas al modelo radiativo de estimación de la PPNA, en términos de las imágenes satelitales a utilizar (Paruelo et al. 2000, Pellegrini et al. 2020), de la fracción de la radiación interceptada (Di Bella et al. 2004, Caride et al. 2012, Piñeiro et al. 2006, Pellegrini et al. 2020), de la eficiencia de uso de la radiación (Piñeiro et al. 2006, Cristiano et al. 2015) y de la aproximación conceptual para calibrar modelos (Piñeiro et al. 2008). También, han estudiado la relación entre la PPNA con los cambios en el uso y cobertura del suelo (Texeira et al. 2015), la productividad secundaria (Oosterheld et al. 2000, Gutierrez et al. 2020), los procesos de degradación-recuperación de los ecosistemas (Verón et al. 2017, Texeira et al. 2019b), la oferta de servicios ecosistémicos intermedios (Paruelo et al. 2016) y la provisión de forraje (Irisarri et al. 2013). Además, han desarrollado modelos de estimación de la evapotranspiración basadas en sensores remotos (Di Bella et al. 2000, 2019). Y por último, han utilizado exitosamente redes neuronales artificiales para predecir la dinámica de la PPNA estimada mediante sensores remotos (Paruelo y Tomasel 1997, Tomasel y Paruelo 2000), para determinar los controles del desempeño reproductivo ovino en la Patagonia argentina (Texeira et al. 2008, 2012) y para dilucidar los controles del funcionamiento de los pastizales naturales del sur de la pampa (Herrera et al. 2012).

Resultados preliminares.

Mediante el modelo radiativo de Monteith (1972), el grupo ha generado estimaciones mensuales de PPNA a partir del año 2000, por cada 6 ha para sitios de la Argentina (Durante et al. 2017, , Irisarri et al. 2013, Piñeiro et al. 2006), o a partir del año 1981 por cada ~2500 ha para los pastizales naturales de Uruguay (Texeira et al. 2019a, 2019b). Durante los últimos 20 años el grupo ha trabajado con grupos de productores de carne, leche y lana de Uruguay y Argentina. Estimó la PPNA mediante cortes de biomasa y la aplicación de técnicas de sensores remotos (Grigera et al. 2007, Paruelo et al. 2000, Piñeiro et al., 2006, Paruelo et al. 2019). A través de esta asociación, se ha demostrado que la brecha de producción entre el rendimiento máximo obtenible y el rendimiento promedio en sistemas pecuarios puede disminuirse en gran medida si se conocen y consideran las fluctuaciones de la producción de forraje (Pacin y Oosterheld 2014, 2015). Estas contribuciones han resultado en el desarrollo, implementación y difusión de la iniciativa que el grupo ha puesto en marcha y que se describió más arriba (<http://produccionforrajes.org.ar/>, Oyarzabal y Paruelo, 2019).

ACTIVIDADES, CRONOGRAMA y METODOLOGÍA.

Objetivo específico 1

Para estimar la PPNA de los recursos forrajeros mediante el modelo radiativo de Monteith (1972, ecuación 1) se deberán estimar sus tres componentes: la radiación fotosintética incidente, la fracción

de ésta que es absorbida por la vegetación y la eficiencia de uso de la radiación. La radiación fotosintética incidente será obtenida de un producto del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, <http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/>). Este producto provee estimaciones de radiación total para prácticamente toda Sudamérica para el período 2000-2016, con una resolución temporal mensual y espacial de 0.04° (Ceballos and de Oliveira Macedo, 2014). Dado que las estimaciones de radiación de este producto no muestran tendencias significativas durante el período, para los años posteriores a 2016 se utilizarán datos promedio. Como alternativa se utilizaran los datos de radiación incidente provistos por el proyecto NASA *power* (<https://power.larc.nasa.gov/>), los cuales son generados mediante la asimilación de las bases MERRA-2 (Bosivolich et al. 2016) y GEOS 5.12.14 (Molod et al. 2011, 2015). Estos datos tienen cobertura global, una resolución espacial de 0.5° y temporal diaria, con disponibilidad desde 1981. Como estimador de la fracción de radiación que es absorbida por la vegetación se utilizará el índice de vegetación normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés), provisto por el producto MOD13Q1. Este índice se deriva de las bandas 4 (rojo, 620-670 nm) y 5 (infrarojo, 841-876 nm) del sensor Terra, a bordo del sistema de observación terrestre (EOS-NASA) MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). El sensor combina resolución espacial (~6 ha) y temporal (16 días) moderadas, y existen imágenes a partir del año 2000. La fracción de radiación que es absorbida por la vegetación será estimada mediante la aplicación de una aproximación empírica que asume una relación no lineal entre el NDVI y la fracción a estimar (Los et al. 2000, Piñeiro et al. 2006, Grigera et al. 2007, Caride et al. 2012, Pellegrini et al. 2020). Se parametrizará esta relación asignando valores de fracción = 0 a valores de NDVI correspondientes a píxeles sin vegetación (i.e. salinas) y valores de intercepción máxima o fracción = 0.95 a valores de NDVI de píxeles con abundante biomasa verde (i.e. pasturas implantadas con índices de área foliar > 3, Grigera et al. 2007). La ecuación que aplicará será:

$$\text{fracción} = \min((\text{SR} - \text{SR}_{\min}) / (\text{SR}_{\max} - \text{SR}_{\min}), 0.95) \quad (\text{ecuación 2})$$

donde $\text{SR} = (1 + \text{NDVI}) / (1 - \text{NDVI})$ y SR_{\min} y SR_{\max} representan los valores extremos de SR, los cuales fueron extraídos de Grigera et al (2007): $\text{SR}_{\min} = 1.55$ ($\text{NDVI}_{\min} = 0.215$) and $\text{SR}_{\max} = 11.62$ ($\text{NDVI}_{\max} = 0.842$).

La eficiencia de uso de la radiación será obtenida de registros disponibles publicados (i.e. Druille et al. 2019, Baeza et al. 2011, Piñeiro et al. 2006) y obtenidos por nuestro grupo a partir de la interacción con INTA, AACREA e INIA (Oyarzabal y Paruelo 2019). Elaboraremos un mapa de eficiencia de uso de la radiación para los principales recursos forrajeros de la región. Las estimaciones de eficiencia provienen del cociente entre la productividad estimada a partir de cosechas secuenciales de biomasa y la radiación absorbida a partir de sensores remotos, que en el caso de MODIS tiene una resolución espacial o tamaño de píxel de aproximadamente 6 ha. El mapa de eficiencia será clave para mejorar la estimación de la PPNA a partir de teledetección.

Relacionaremos las estimaciones de eficiencia con variables meteorológicas provenientes de estaciones propias, de productores o de organismos como el Servicio Meteorológico Nacional y el INTA. En caso de encontrarse relaciones robustas, las variables climáticas podrán utilizarse como estimadores de la eficiencia y de este modo podremos mejorar las interpolaciones para completar el mapeo, considerando además la heterogeneidad de la vegetación (Oyarzabal et al. 2018).

Objetivo específico 2.

Se estimará el BHC a partir de 2000 a escala mensual como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial. La información de precipitación mensual será obtenida de la base de datos CHIRPS (“climate hazards infrared precipitation with stations”, Funk et al 2015), que tiene una cobertura global, con una resolución espacial de 0.05° y temporal diaria. Esta base de datos es de dominio público, se accede a través de la plataforma Google Earth Engine y está disponible a partir de 1981. La temperatura mensual será obtenida de las bases de datos provistas por el proyecto NCEP/NCAR (Kalnay et al 1996), los cuales poseen una cobertura global, una resolución espacial de 2.5° y temporal de 6 horas, y están disponibles a partir de 1948. Como alternativa, se utilizarán

los productos de precipitación y temperatura del proyecto NASA power descrito en el objetivo anterior. Adicionalmente se utilizará el producto MOD16A2.006 de MODIS (Mu et al 2014), el cual provee estimaciones de evapotranspiración potencial a partir del año 2000 con una resolución temporal de 8 días y espacial de 500 m. Tanto las estimaciones regionales de evapotranspiración potencial basadas en información climática como aquellas provenientes del producto MOD16A2.006 serán validadas con estimaciones de la evapotranspiración potencial basadas en información de estaciones meteorológicas de la región.

Objetivo específico 3.

Se cuantificará la medida en que la precipitación, la temperatura, la radiación solar y la evapotranspiración actual y potencial explican las variaciones temporales del BHC, y estas a su vez la variabilidad de la PPNA. Para estimar el efecto conjunto de las variables descritas, explorar y contrastar hipótesis respecto a las relaciones causales y para identificar los efectos directos e indirectos sobre las estimaciones de la PPNA y el BHC, utilizaremos modelado con ecuaciones estructurales (“SEMs”, por sus siglas en inglés, Shipley 2000, Beaujean 2014, Lefcheck 2016). Tanto los datos de precipitación como de temperatura, evapotranspiración actual y ETP que se utilizarán son de dominio público, están disponibles en la plataforma Google Earth Engine o en el sistema de acceso de datos de NASA power. Alternativamente la evapotranspiración actual se estimará mediante el algoritmo utilizado por el instituto de clima y agua de INTA, desarrollado y actualizado por investigadores de este proyecto (Di Bella et al. 2000). El mismo utiliza el NDVI y la temperatura superficial provistos por una nueva generación de sensores NPP-Suomi (Di Bella et al. 2019). Esta alternativa permite estimar la evapotranspiración con una cobertura regional, una resolución espacial de 375 m y temporal mensual.

Objetivo específico 4.

El cuarto objetivo es generar un sistema de pronósticos del BHC y la PPNA. Los pronósticos serán generados en base a la dinámica endógena de la PPNA y el BHC (la PPNA y el BHC en meses previos, Oesterheld et al. 2001, Wiegand et al. 2004, Liu et al. 2019). Se utilizarán redes neuronales recurrentes (“RNR”, Smith 1994, Connor et al 1994, Greff et al. 2016), una familia de técnicas de aprendizaje automático (“machine learning”) especialmente apropiadas para el análisis y pronóstico de series temporales no lineales. Concretamente, se propone utilizar redes neuronales recurrentes con arquitectura LSTM (“Long Short Term Memory”; Hochreiter y Schmidhube 1997). Si bien esta arquitectura fue desarrollada a fines del siglo pasado, recién a partir de 2010 su uso comenzó a popularizarse en problemas de aprendizaje profundo (“*deep learning*”) de secuencias y series temporales, como consecuencia del desarrollo de algoritmos y hardware novedosos y potentes (Chollet y Allaire 2017).

Se propone generar pronósticos de entre 1 y 6 meses, a una resolución espacial de aproximadamente 6 ha. Esta resolución es compatible con el área característica de los potreros, las unidades de manejo ganadero más frecuente en la región. La capacidad predictiva de las redes neuronales recurrentes, i.e. su desempeño y capacidad de generar pronósticos confiables, será evaluada mediante validación cruzada (Smith 1994). La cantidad de información a generar será inmensa, por lo que se propone el uso de herramientas más potentes y versátiles que las tradicionales, como la plataforma Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>, Gorelick et al. 2018), y los entornos R (<https://www.r-project.org/>) y Tensorflow (<https://www.tensorflow.org/>).

Objetivo específico 5.

Los pronósticos se generarán en una plataforma web-SIG desarrollada para tal fin en Shiny/R (Wickham y Golemund 2017), alojada en la página del Observatorio Forrajero Nacional (www.produccionforrajes.org.ar). Los mismos se actualizarán regularmente y con una frecuencia mensual. Los pronósticos serán de dominio público y podrán ser consultados libremente a distintos niveles: unidad ambiental y división político-administrativa o de manejo, desde departamento a establecimiento y potrero dentro de cada establecimiento.

CRONOGRAMA

	AÑO 1		AÑO 2		AÑO 3	
TAREAS ESPECIFICAS	Semestre 1	semestre2	Semestre 3	Semestre 4	Semestre 5	Semestre 6
Objetivo específico 1 – Estimación de la PPNA						
Objetivo específico 2 – Estimación del BHC						
Objetivo específico 3 – Controles temporales del BHC y la PPNA						
Objetivo específico 4 – Desarrollo del sistema de pronósticos del BHC y la PPNA						
Objetivo específico 5 – Implementación del web-sig en produccionforrajes.org.ar						

Resultados esperados.

Este proyecto generará conocimiento tanto básico como aplicado. Por un lado, se propone generar un conocimiento más acabado de los controles biofísicos de la dinámica temporal de la PPNA mensual de recursos forrajeros de sistemas pastoriles, que incluye pastizales naturales, semi-naturales y pasturas implantadas. La amplia mayoría de la literatura en este tema aborda la PPNA anual de sistemas naturales. En cambio, la PPNA mensual de sistemas semi-naturales y cultivados puede tener controles biofísicos diferentes. Por otro lado, y sobre la base de este conocimiento básico, se pretende generar una herramienta tecnológica única en la región y singular en el mundo: un sistema de pronóstico del BHC y la PPNA que asista en la toma de decisiones educadas vinculadas al manejo racional de los recursos forrajeros.

Difusión de los resultados.

Esperamos continuar publicando los resultados en revistas con referato reconocidas internacionalmente, así como en medios de divulgación científica. Se prevé también la difusión de resultados en reuniones científicas. Los productos del sistema de pronóstico serán incorporados a la página web del Observatorio Forrajero Nacional.

Protección de los resultados.

Los resultados serán de dominio público, por lo que no requieren de medios de protección.

Actividades de transferencia.

El proyecto contribuirá a generar conocimiento básico y aplicado. El conocimiento básico será primero evaluado por la comunidad científica, mediante la publicación en revistas especializadas y la presentación en reuniones científicas. La transferencia ocurrirá primariamente a través de la docencia en la Facultad de Agronomía de la UBA. Los investigadores que conforman el GR y el equipo de trabajo del proyecto son docentes de cursos de grado (Carreras de Agronomía y Lic. Ciencias Ambientales) y posgrado (Especialización en Teledetección y Sistemas de Información geográfica aplicados a los recursos naturales, Maestría en Recursos Naturales, Doctorado en Cs. Agropecuarias). Los resultados serán a su vez utilizados internamente en el LART- Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, del IFEVA, FAUBA. Este laboratorio, integrado en parte por los investigadores que participan de este proyecto, desarrolla tecnologías para un aprovechamiento ganadero y agrícola más eficiente y sustentable en todo el país. El conocimiento aplicado que genere este proyecto provendrá del sistemas de pronósticos del BHC y la PPNA. Estos sistemas fortalecerán al servicio que actualmente presta el Observatorio Forrajero Nacional, una iniciativa del LART. El Observatorio utiliza la lógica del modelo radiativo de Monteith para monitorear la productividad forrajera próxima pasada. Con este proyecto se espera pronosticar condiciones

ambientales (BHC) y la PPNA futuras. A mediano plazo, se podrá transferir este desarrollo a instituciones con las que el grupo mantiene una estrecha y extensa colaboración: CREA, INTA, MINAGRO (de Argentina), e Instituto Plan Agropecuario (de Uruguay).

Conformación del grupo de investigación.

Justificación de cada integrante.

El titular del proyecto (Marcos Texeira) posee amplia experiencia en el estudio de procesos ecosistémicos, en particular la dinámica de la PPNA y sus controles mediante la aplicación de técnicas estadísticas modernas y datos provistos por sensores remotos. Los investigadores integrantes (Carlos Di Bella, José Paruelo) son también especialistas en esta área, referentes internacionales, y poseen una vasta experiencia, reflejada en una profusa producción científica y dirección de estudiantes, becarios e investigadores en temas relacionados con el proyecto. Los becarios doctorales que integran el grupo, trabajan en tesis relacionadas a la dinámica del agua en los ecosistemas de la planicie chaco-pampeana con una aproximación basada en herramientas de procesamiento masivo de datos de sensores remotos (Paula Torre Zaffaroni, dirigida por Texeira y Di Bella) y a los efectos de los cambios en el uso del suelo y la configuración del paisaje sobre el funcionamiento ecosistémico (Gonzalo Camba Sans, dirigido por Paruelo). El becario posdoctoral del grupo de investigación (Pablo Baldassini dirigido por Paruelo), tiene también amplia experiencia en el uso de sensores remotos y modelos de simulación para la estimación de diferentes atributos funcionales de los ecosistemas, así como su relación con los servicios ecosistémicos asociados a la dinámica del C y el agua. La incorporación de Maria E. Beget y Gabriela Posse, del Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar, se basa en dos aspectos principales: a) su experiencia en el manejo de información espectral para el seguimiento, estimación y análisis de los sistemas pastoriles, y b) la posibilidad de interactuar directamente con un centro de recepción satelital que podrá proveer información satelital en tiempo real. Por último, la inclusión de Luca Scenna, de la FAUBA, como técnico del proyecto se fundamenta en su experiencia en el manejo de bases de datos y sistemas de información geográfica en el LART, IFEVA.

Indique de manera similar los mecanismos de interacción con otros grupos que contribuyan de manera significativa a la ejecución del proyecto.

Los integrantes del grupo trabajan regularmente con otros grupos, algo que favorecerá la ejecución del proyecto. Texeira es docente del Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información de la FAUBA y trabaja en estrecha colaboración con especialistas en estadística espacial (Pablo Cipriotti), así como con especialistas en sistemas de información geográfica y procesamiento y análisis de información satelital (Germán Baldi) y que ayudarán significativamente en resolver el desafío analítico-metodológico que este proyecto propone. Paruelo trabaja en colaboración con investigadores de España y Estados Unidos con los cuales ha desarrollado aproximaciones metodológicas aplicables en esta propuesta (Domingo Alcaraz Segura, Howard Epstein, Will Lauenroth) y tiene además relación con técnicos e investigadores de INTA (Lisandro Blanco) y el Inst. Plan Agropecuario de Uruguay (Marcelo Pereira), que contribuirán con datos de PPNA estimados a campo y registros de estaciones meteorológicas.

Describa los antecedentes de interacción entre los participantes.

Los participantes del GR trabajan juntos desde hace más de 20 años, tanto en la investigación como en la docencia. En investigación, el trabajo conjunto se ha reflejado en una serie de publicaciones en coautoría en revistas internacionales indexadas y capítulos de libros (descritas en las secciones anteriores), así como en subsidios codirigidos y otorgados tanto en el país como en el exterior. En la docencia, los integrantes comparten cursos de grado (SIG, modelos estadísticos y modelos de simulación, para las carreras de Agronomía y Cs. Ambientales, FAUBA) y posgrado (Maestría y Doctorado en recursos naturales, Especialización en teledetección y SIG y Especialización en manejo de sistemas pastoriles, en la EPG-FAUBA) en temas relacionados a la aplicación de técnicas derivadas de sensores remotos al estudio y manejo sostenible de los recursos naturales.

Viabilidad y factibilidad técnica.

El proyecto propone utilizar bases de datos de acceso libre (MODIS, RFA-INPE, Terraclimate, NPP-Suomi, NASA power, CHIRPS, NCEP/NCAR), así como desarrollos propios o de entidades vinculadas (estimaciones de eficiencia de uso de la radiación y de evapotranspiración, clasificaciones de uso y cobertura del suelo). En este sentido, los integrantes del proyecto cuentan con el acceso a las instalaciones, laboratorios y equipamientos de las unidades a las que pertenecen: IFEVA (Texeira, Paruelo, Baldassini, Camba-Sans, Torr  Zaffaroni, Scenna), INIA (Paruelo) y FAUBA – Metodos Cuantitativos (Texeira, Di Bella, Paruelo, Baldassini, Camba-Sans, Torr  Zaffaroni) e INTA (Beget, Posse). Las entidades de los investigadores cuentan con camionetas (necesarias para los viajes para coleccionar información meteorológica y de productividad estimada a campo para validar las estimaciones derivadas de sensores remotos) y diversos equipos (espectro-radiómetro portátil ASD, FieldSpec Pro FR, espectrómetro hiperespectral también HR4000 de Ocean Optics, sensores multiespectrales Skye de cuatro canales y Decagon para estimación de PRI y NDVI), servidores, computadoras y software para el procesamiento de imágenes y análisis masivo de datos.

Aspectos  ticos.

El proyecto no representa ningún riesgo en este sentido. El grupo de trabajo se atiene al código de conducta del instituto IFEVA (<http://www.ifeva.edu.ar/es/institucional/CodigoConducta-dic02.html>). A su vez, la Facultad de Agronomía UBA es una institución activa por el respeto de los Derechos Humanos.

Aspectos de seguridad laboral, ambiental y bioseguridad relacionados al proyecto.

La Facultad de Agronomía de la UBA cuenta con un área de Higiene y Seguridad encargada del cumplimiento de las normas de seguridad en laboratorios y oficinas (cursos de primeros auxilios, manejo de extintores, estrategias de evacuación ante incendios). A su vez, el IFEVA-CONICET cuenta con personal capacitado en el mantenimiento de la seguridad del instituto, y al menos una vez al año dicta charlas para investigadores, docentes, becarios y técnicos sobre las normas de seguridad del Instituto. Este proyecto no solo no compromete aspectos de seguridad ambiental, sino que brega por uso más educado y sustentable de los recursos naturales.

Recursos financieros.

gastos de capital		2021	2022	2023	
	Equipamiento	120000	150000	180000	450000
	Licencias	0	0	0	0
	Bibliografía	0	0	0	0
	Subtotal gastos de capital	120000	150000	180000	450000
gastos corrientes	Bienes de consumo	10000	20000	20000	50000
	Viajes y viaticos	60000	40000	50000	150000
	Difusion/proteccion de resultados	0	0	0	0
	Servicios de terceros	150000	220000	260000	630000
	otros gastos	12000	10000	10000	32000
	Subtotal gastos corrientes	232000	290000	340000	862000
TOTALES		352000	440000	520000	1312000

El gasto en equipamiento solicitado corresponde a la adquisición de una computadora de escritorio de altas prestaciones (procesador Intel i9, 64Gb de RAM, disco de estado sólido). Dado que el proyecto contempla procesar grandes volúmenes de información satelital, no solo en plataformas remotas, sino que también en equipos locales, se contempla la adquisición de discos de estado

sólido y memoria RAM adicional para actualizar los equipos disponibles, de modo de maximizar la velocidad de lectura, procesamiento y transferencia de información.

Los bienes de consumo corresponden a la adquisición de insumos de oficina y periféricos de computación.

Los gastos relacionados con viajes y viáticos se destinarán en primera instancia para viajes de colección de información de estaciones meteorológicas y de PPNA estimada por cortes y que no se encuentran sistematizadas y/o disponibles (por ejemplo, estaciones meteorológicas de experimentales del INTA, o de productores individuales). Así mismo, en este rubro se contemplan los gastos asociados a la asistencia a reuniones científicas.

Los servicios de terceros contemplan principalmente gastos vinculados a la contratación de programadores y diseñadores web profesionales, para implementación del web-sig de pronósticos y su integración en el sitio del observatorio forrajero (www.produccionforrajes.org.ar). Así mismo, se consideró en este rubro el mantenimiento y eventual reparación de equipos. El rubro otros gastos incluye un presupuesto menor por gastos imprevistos, que representa a lo sumo el 5 % del subtotal anual de gastos corrientes.

Dedicación al proyecto.

Cada integrante tendrá un mínimo de 50% de dedicación a este proyecto.

Bibliografía.

Abatzoglou, J.T., Dobrowski, S.Z., Parks, S.A., Hegewisch, K.C. 2018, Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015, Scientific Data 5:170191, doi:10.1038/sdata.2017.191

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 56:1-79.

Baeza S., Paruelo J.M., Ayala W. 2011. Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. Agrociencia 15(2):48-59.

Baldi, G., Texeira, M., Murray, F., y Jobbagy, E., 2016. Primary productivity contrasts between cultivated and uncultivated vegetation along a water availability gradient". PLOSone DOI:10.1371/journal.pone.0168168

Beaujean, A.A., 2014. Latent Variable Modeling Using R. Taylor & Francis.

Bosilovich, M. G., F. R. Robertson, L. Takacs, A. Molod, and D. Mocko, 2016. Atmospheric Water Balance and Variability in the MERRA-2 Reanalysis. J. Clim. - Special MERRA-2 Collection, doi: 10.1175/jcli-d-16-0338.1

Bradford, J.B., Lauenroth, W.K., Burke, I.C., Paruelo, J.M., 2006. The Influence of Climate, Soils, Weather, and Land Use on Primary Production and Biomass Seasonality in the US Great Plains. Ecosystems 934–950. doi:10.1007/s10021-004-0164-1.

Bruinsma, J., 2017. World Agriculture: Towards 2015/2030. Routledge. doi:10.4324/9781315083858

Cantet, R.J.C., García-Baccino, C.A., Rogberg-Muñoz, A., Forneris, N.S., Munilla, S., 2017. Beyond genomic selection: The animal model strikes back (one generation)! J. Anim. Breed. Genet. 134, 224–231. doi:10.1111/jbg.12271.

Ceballos, J.C., y L.O. Macedo. 2014. Uma base de dados de radiação solar na América do Sul, estimada por satélite (modelo GL1.2/CPTEC). In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, Pernambuco, Brasil.

Chen, M., W. J. Parton, M. D. Hartman, S. J. Del Grosso, W. K. Smith, A. K. Knapp, S. Lutz, J. D. Derner, C. J. Tucker, D. S. Ojima, J. D. Volesky, M. B. Stephenson, W. H. Schacht, and W. Gao., 2019. Assessing precipitation, evapotranspiration, and NDVI as controls of U.S. Great Plains plant production. *Ecosphere* 10(10):e02889. 10.1002/ecs2.2889.

Chollet, F. y Allaire, J.J. 2017. Deep learning with R. Manning Publications.

Cordon, G., Lagorio, M., y Paruelo, J. 2016. Chlorophyll fluorescence, photochemical reflective index and normalized difference vegetative index during plant senescence. *Journal of Plant Physiology* 199:100-110.

Connor, J. T., Martin, D. R. y Atlas, L.E. 1994. Recurrent neural networks and robust time series prediction. *IEEE Transactions on Neural Networks* 5:240-254.

Craine, J.M., Elmore, A., Angerer, J.P., 2017. Long-term declines in dietary nutritional quality for North American cattle. *Environ. Res. Lett.* 12, 044019. doi:10.1088/1748-9326/aa67a4

Craine, J.M., Elmore, A., Olson, K.C., Tolleson, D., 2010. Climate change and cattle nutritional stress. *Glob. Chang. Biol.* 16, 2901–2911. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02060.x

Cristiano, P., Posee, G. y Di Bella, C. 2015. Total and aboveground radiation use efficiency in C3 and C4 grass species influenced by nitrogen and water availability. *Grassland Science* 61:131-141.

Di Bella, C.M., Oricchio, P.A., Gusmerotti, L.A. y Texeira, M., 2019. Actualización del algoritmo de estimación de la evapotranspiración real en la Región Pampeana para el sensor VIIRS-Suomi NPP. *Ecología Austral* 29:428-432.

Di Bella, C.M., Rebella, C.M. y Paruelo, J. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA-AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 21:791-797.

Di Bella, C, Paruelo, J., Becerra, J., Bacour, C. and Baret, F., 2004. Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: experimental and modeling evidences *International Journal of Remote Sensing* 25 (23): 5415-5427.

Druille, M., Oyarzabal, M y Oosterheld, M. 2019. Radiation use efficiency of forage resources: a meta-analysis. *Agronomy Journal* 111:1-9. doi:10.2134/agronj2018.10.645.

Durante, M., Piñeiro, G., Irisarri, J.G.N., Oosterheld, M., 2017. Primary Production of Lowland Natural Grasslands and Upland Sown Pastures Across a Narrow Climatic Gradient. *Ecosystems* 20. doi:10.1007/s10021-016-0039-2

FAO, 2016. OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025 SPECIAL FOCUS: Sub-SAHARAN AFRICA. doi:10.1787/agr_outlook-2016-en.

Gallego, F., Lezama, F., Pezzani, F., López-Mársico, L., Leoni, E., Mello, A. L. y 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.

- Gamon J., Peñuelas J., Field C. 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment* 41, 35-44.
- Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Ourcival, J.M. y Fillela, I. 2008. Estimación de la eficiencia del uso de la radiación en bosques mediterráneos a partir de datos MODIS. *Uso del Índice de Reflectancia Fotoquímica (PRI). Ecosistemas* 17(3):89-97.
- Gherardi, S., Oldham, C., 2003. The value proposition for remotely sensed estimates of feed on offer and pasture growth rate. *Proceedings of the Joint Conference of GSV and GSNSW* 2003.
- Goszczynski, D.E., Corbi-Botto, C.M., Durand, H.M., Rogberg-Muñoz, A., Munilla, S., Peral-Garcia, P., Cantet, R.J.C., Giovambattista, G., 2018. Evidence of positive selection towards Zebuine haplotypes in the BoLA region of Brangus cattle. *animal* 12, 215–223.
doi:10.1017/S1751731117001380.
- Greff, K., Srivastava, R.K., Koutnik, J., Steunebrink, B.R. y Schmidhuber, J. 2016. LSTM: A Search Space Odyssey. *Transactions On Neural Networks and Learning Systems*, arXiv:1503.04069.
- Grigera, G., Oesterheld, M., Pacin, F., 2007. Monitoring forage production for farmers' decision making. *Agric. Syst.* 637–648.
- Gutiérrez, F., Gallego, F., Paruelo, J.M., y Rodríguez, C. 2020. Buffer and lag effects of precipitation variability across trophic levels in Uruguayan rangelands. *Agricultural Systems*. 185 <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102956>.
- Hartman, M.D., Parton, W.J., Derner, J.D., Schulte, D.K., Smith, W.K., Peck, D.E., Day, K.A., Del Grosso, S.J., Lutz, S., Fuchs, B.A., Chen, M., Gao, W. 2020. Seasonal grassland productivity forecast for the U.S. Great Plains using Grass-Cast. *Ecosphere* 11(11):e03280. 10.1002/ecs2.3280
- Herrera, L. Texeira, M. y Paruelo, J. 2013 Size, vegetation structure and physical environment influences on grassland functioning in the Southern Pampa, Argentina. *Applied Vegetation Science* 16:426-437.
- Herrero, M., Thornton, P.K., 2013. Livestock and global change: emerging issues for sustainable food systems. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 20878–81. doi:10.1073/pnas.1321844111.
- Hochreiter, S. y Schmidhuber, J. 1997. Long Short-Term Memory. *Neural Computation* 9:1735-1780.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., y Ferreira, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1), 195-213.
- Irisarri, J.G.N., Oesterheld, M., Oyarzabal, M., Paruelo, J.M., Durante, M., 2013. Monitoring the Ecosystem Service of Forage Production, in: *Earth Observation of Ecosystem Services*. p. 16.
- Irisarri, J.G.N., Oesterheld, M., Golluscio, R.A., Paruelo, J.M., 2014. Effects of Animal Husbandry on Secondary Production and Trophic Efficiency at a Regional Scale. *Ecosystems*.
doi:10.1007/s10021-014-9756-6.

Jobbágy E. G., Sala O. E., Paruelo J. M. 2002. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology*. 83: 307-319.

Lefcheck, J. S., 2016. piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(5), 573–579.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12512>

Liu, Y.; Schwalm, C. R.; Samuels-Crow, K. E. & Ogle, K. 2019. Ecological memory of daily carbon exchange across the globe and its importance in drylands. *Ecology Letters* 22, 1806-1816.

Mata, G.A., Henry, D.A., Gherardi, S.B., Smith, R.C., 2004. Aust. Remote Sensing Photogrammetry Conf, Animal Production in Australia.

Molod, A., Takacs, L., Suarez, M.J., Bacmeister, J., Song, I.S., Eichmann, A., Chang, Y., 2011. The GEOS-5 Atmospheric General Circulation Model: Mean Climate and Development from MERRA to Fortuna. Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation 104606, v28.

Molod, A., Takacs, L., Suarez, M.J., Bacmeister, J., Song, I.S. 2015. Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: evolution from MERRA to MERRA2; *Geosci. Model Dev.*, 8, 1339-1356, 2015, doi: 10.5194/gmd-8-1339-2015

Monteith J. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 9, 747-766.

Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W. and Numerical Terradynamic Simulation Group (2014): MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product MOD16A2 Collection 5.

Nosetto, M.D., Ballesteros, S., Jobbágy, E., Nosetto, M.D., Paez, R.A., Ballesteros, S.I., Jobbágy, E.G., Luis, S., Luis, A., 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agric. Ecosyst. Environ.* 206, 60–70.
doi:10.1016/j.agee.2015.03.009

Oesterheld, M., Di Bella, C.M., Kerdiles, H. 1998. Relation between NOAA-AVHRR satellite data and stocking rate of rangelands. *Ecological applications* 8:207-212.

Oesterheld, M., J. Loreti, M. Semmartin, J. M. Paruelo. 1999. Grazing, fire, and climate effects on primary productivity of grasslands and savannas. En: Walker L., editores. *Ecosystems of disturbed ground*. Amsterdam, Netherlands. Elsevier. 287-306.

Oesterheld, M., Loreti, J., Semmartin, M. y Sala, O.E. J 2001. Inter-annual variation in primary production of a semi-arid grassland related to previous-year production. *Journal of Vegetation Science*, 12:137-142.

Ojeda, J.J.J., Caviglia, O.P.O., Irisarri, J.G.N.G.N., Agnusdei, M.G.M.G., 2018. Agricultural and Forest Meteorology Modelling inter-annual variation in dry matter yield and precipitation use efficiency of perennial pastures and annual forage crops sequences. *Agric. For. Meteorol.* 259, 1–10.
doi:10.1016/j.agrformet.2018.04.014

Oyarzábal, M, Oesterheld, M., y Grigera, G. 2011. ¿Cómo estimar la eficiencia en el uso de la radiación mediante sensores remotos y cosechas de biomasa? En: Altesor A, Ayala W y Paruelo J. (eds.) *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales*. Serie FPTA-INIA 26:121-134.

Oyarzabal, M. y Paruelo, J. 2019. Dinámica de la productividad primaria de las comunidades de pastizal del Uruguay. En: Altesor, A., López-Mársico, L y Paruelo, J. (eds). Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Serie FPTA-INIA 69:111-122.

Oyarzabal M, Clavijo J, Oakley L, Biganzoli F, Tognetti P, Barberis I, Maturo HM, Aragón R, Campanello PI, Prado D, Oesterheld M, León R. 2018. Unidades de Vegetación de la Argentina. *Ecología Austral* 28:040-063.

Pacín, F., Oesterheld, M., 2014. In-farm diversity stabilizes return on capital in Argentine agro-ecosystems. *Agric. Syst.* 124, 51–59. doi:10.1016/j.agry.2013.10.008

Pacín, F., Oesterheld, M., 2015. Closing the technological gap of animal and crop production through technical assistance. *Agric. Syst.* 137, 101–107. doi:10.1016/j.agry.2015.04.007

Pagnanini F., Oyarzabal, M., Paruelo, J. y Pereira, M. 2019. Productividad primaria neta aérea de pastizales de Uruguay: Variación entre años y entre sitios. En: Altesor, A., López-Mársico, L y Paruelo, J. (eds). Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Serie FPTA-INIA 69:139-153.

Paruelo, J. y Tomaselli F. 1997. Prediction of functional characteristics of ecosystems: a comparison of artificial neural networks and regression models. *Ecological Modelling* 98:173-186.

Paruelo, J., Epstein, H.E., Lauenroth, W.K., Burke, I.C., 1997. ANPP Estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. *Ecology* 78, 953. doi:10.2307/2266073.

Paruelo J., Lauenroth W.K., Burke I.C., Sala O.E. 1999. Grassland Precipitation Use efficiency across a resource gradient. *Ecosystems* 2:64-69.

Paruelo, J., Oesterheld, M., Di Bella, C.M., Arzadum, M., Lafontaine, J., Cahuepé, M., Rebella, C.M., 2000. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Appl. Veg. Sci.* 3, 189–195. doi:10.2307/1478997.

Paruelo J., Piñeiro G, Baldi G, Baeza S, Lezama F, Altesor A.I. y Oesterheld M. 2010. Carbon Stocks and Fluxes in Rangelands of the Río de la Plata Basin. *Rangeland Ecology and Management* 63:89-108

Paruelo, J., Oyarzabal M., Cordon, G., Lagorio, M. y Pereira Machín, M. 2019. Estimación de la eficiencia de la radiación en recursos forrajeros perennes del Uruguay. En: Altesor, A., López-Mársico, L y Paruelo, J. (eds). Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Serie FPTA-INIA 69:123-137.

Peck, D., J. Derner, W. Parton, M. Hartman, B. Fuchs. 2019. Flexible stocking with Grass-Cast: A new grassland productivity forecast to translate climate outlooks for ranchers. *Western Economics Forum* 17(1):24-39.

Pellegrini, P., Cossani, C.M., Di Bella, C.M., Piñeiro, G., Sadrás, Oesterheld, M. 2020. Simple regression models to estimate light interception in wheat crops with Sentinel-2 and a handheld sensor. *Crop Science* . DOI: 10.1002/csc2.20129.

Pettorelli, N., 2013. The Normalized Difference Vegetation Index. Oxford University Press.

- Piñeiro, G., Oesterheld, M., Paruelo, J.M., 2006. Seasonal variation in aboveground production and radiation-use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems* 9: 357-373. doi:10.1007/s10021-005-0013-x
- Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J.P., Paruelo, J.M., 2008. How to evaluate models: observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling* 216:316-332.
- Popkin, B.M. The Nutrition Transition in the Developing World. *Development Policy Review*. 21: 581–597. doi:10.1111/j.1467-8659.2003.00225
- Reeves, M.C., Moreno, A.L., Bagne, K.E., Running, S.W., 2014. Estimating climate change effects on net primary production of rangelands in the United States. *Clim. Change* 126, 429–442. doi:10.1007/s10584-014-1235-8.
- Rossini, G., Arancibia, R.G., Guiguet, E.D., 2017. Argentine government policies: impacts on the beef sector. *Agric. Food Econ.* 5, 1. doi:10.1186/s40100-016-0070-9.
- Running, S. W., R. R. Nemani, F. A. Heinsch, M. Zhao, M. Reeves, and H. Hashimoto. 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience* 54:547-560.
- Sala, O. E., Parton, W.J., Joyce, L.A., Lauenroth, W.K. 1988. Primary production of the central grassland region of the United States: Spatial pattern and major controls. *Ecology* 69:40–45.
- Sala, O.E., Austin, A.T., 2000. Methods of Estimating Aboveground Net Primary Productivity, in: *Methods in Ecosystem Science*. Springer New York, New York, NY, pp. 31–43. doi:10.1007/978-1-4612-1224-9_3.
- Sala O.E., Gherardi L., Reichmann L., Jobbagy, E. y Peters D. 2012. Legacies of precipitation fluctuations on primary production: theory and data synthesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 367:3135–3144.
- Scurlock, J.M.O., Johnson, K., Olson, R.J., 2002. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Glob. Chang. Biol.* 8, 736–753. doi:10.1046/j.1365-2486.2002.00512.x.
- Shipley, B., 2000. *Cause and Correlation in Biology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Smith, M., 1994. *Neural Networks for Statistical Modeling*. International Thompson Publishing, London.
- Texeira, M. Paruelo J., y Jobbagy, E. 2008. How do forage availability and climate control herbivore reproductive performance? An analysis based on artificial neural networks and remotely sensed data. *Ecological Modelling*, 217:197-206.
- Texeira, M., Baldi, G. y Paruelo, J. 2012. An exploration of direct and indirect drivers of herbivore reproductive performance in arid and semi arid rangelands by means of structural equation models. *Journal of Arid Environments* 81:26-34.
- Texeira, M., Oyarzabal, M., Piñeiro, G., Baeza S., y Paruelo, J., 2015. Land cover and precipitation controls over long-term trends in Carbon gains in South American temperate grassland biomes. *Ecosphere* 6(10):1-21. DOI:10.1890/ES15-00085.1

Texeira, M., Verón, S., Irisarri, G., Oyarzabal, M., Staiano, L., Baeza, S. y Paruelo, J. 2019a. Functional syndromes as indicators of ecosystem change in temperate grasslands. *Ecological Indicators* 96:600-610. DOI:10.1016/j.ecolind.2018.09.046.

Texeira, M. Oyarzabal, M. y Paruelo J. 2019b. Relación entre la productividad primaria anual y las precipitaciones en pastizales de la Cuesta Basáltica y de las Sierras del Este (1981-2015). En: Altesor, A., López-Mársico, L y Paruelo, J. (eds). Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Serie FPTA-INIA 69:155-167.

Thornton, P.K., van de Steeg, J., Notenbaert, A., Herrero, M., 2009. The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agric. Syst.* 101, 113–127. doi:10.1016/j.agsy.2009.05.002.

Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38: 55-94.

Thornthwaite, C.W., Mather, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Laboratory of Climatology. Centertown, NJ, USA.

Tomasel F. y Paruelo J. 2000. Normalized difference vegetation index estimation in grasslands of patagonia by ANN analysis of satellite and climatic data. In Lek S. and Guegan J.F., Eds. *Applications of artificial neural networks to ecological modelling*, Springer-Verlag 69-79.

USDA, 2018. Foreign Agricultural Service. Livestock and Poultry: World Markets and Trade. (<https://www.fas.usda.gov/data/livestock-and-poultry-world-markets-and-trade>).

Vassallo, M.M., Dieguez H.D., Garbulsky M.F., Jobbágy E.G. y Paruelo J.M. 2013. Grassland afforestation impacts on primary productivity: A remote sensing approach. *Applied Vegetation Science* : doi: 10.1111/avsc.12016.

Vicente-Serrano S.M., Beguería, S. y López-Moreno, J. I. 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. *Journal of Climate* 23: 1696-1718.

Vicente-Serrano, S.M., Van der Schrier, G., Beguería, S., Azorin-Molina, C. y Lopez-Moreno, J. I. 2015. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology* 426: 42-54.

Viglizzo, E.F., Frank, F.E., Carreño, L. V., Jobbágy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincén, D., Ricard, M.F., 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Glob. Chang. Biol.* doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x.

Viglizzo, E.F., Lértora, F., Pordomingo, A.J., Bernardos, J.N., Roberto, Z.E., Del Valle, H., 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 83, 65–81. doi:10.1016/S0167-8809(00)00155-9.

Wickham, H. y Grolemond, G. 2017. R for data science. O'Reilly Media.

Wiegand, T., Snyman, H.A., Kellner, K. Y Paruelo, J. 2004. Do grasslands have a memory: modeling phytomass production of a semiarid South African grassland. *Ecosystems* 7:243-258.

Ye, J.S., Pei, J.Y., Fang, C. 2018. Under which climate and soil conditions the plant productivity-precipitation relationship is linear or nonlinear? *Science of the Total Environment* 616-617:1174-1180. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.10.203.