

Potencial económico de la ganadería en la regeneración de los servicios ecosistémicos en el bosque de caldén, Argentina.

Universidad Nacional de Rio Cuarto

Autores:

Jorge D. de Prada; Omar J. Plevich; Carlos H. Peñafort; María Victoria Anomale; Diego S. Tello; Horacio A. Gil

Contacto autores:

jdeprada@ayv.unrc.edu.ar

oplevich@ayv.unrc.edu.ar

cpenafort@ayv.unrc.edu.ar

vanomale@ayv.unrc.edu.ar

dtello@fce.unrc.edu.ar

hgil@ayv.unrc.edu.ar

Resumen

La degradación del bosque de caldén está asociado a los incendios y las prácticas de pastoreo convencional (PC) con ganado vacuno. El objetivo de este artículo es evaluar el potencial económico de las prácticas ganaderas regenerativas, pastoreo racional (PR). Se diseña un modelo de programación lineal entera mixta e indaga cuatro variantes: PC, PR I con suplementación estratégica (limpieza pastizales muertos), PR I Eco - normas de producción orgánica, y PR II con el pastizal renovado. Los resultados muestran una mejora significativa en el flujo económico. Los beneficios netos fueron: 45,63; 88,63; 81,74 y 139,55 US\$ ha⁻¹ con PC, PR I, PR I Eco y PR II respectivamente. Las necesidades de capital son mayores en la ganadería regenerativa. El capital de trabajo fue: 2,45; 107,41; 121,91 y 55,06 US\$ ha⁻¹ con PC, PR I, PR I Eco y PR II respectivamente. La adopción del sistema regenerativo - de PC con 177 vacas, a PR I, y PR II con 717 vacas – incrementaría el valor de la tierra en 2 215 US\$ ha⁻¹ si se estabiliza en PR II. La forma de herbivoría reduce el riesgo de incendios, y la infraestructura y manejo del pastizal mejora los servicios ecosistémicos del suelo.

Palabras claves: programación lineal entera mixta, pastoreo racional Voisin, objetivo de desarrollo sostenible, planificación, ecorregión espinal,

Clasificación temática: Economía ambiental y de recursos naturales (análisis económico), Economía de los sistemas agropecuarios (evaluación de nuevas alternativas productivas).

Código JEL:

Q (Economía de los recursos agrícolas y naturales • Economía ambiental y ecológica), Q2 Recursos renovables y conservación, Q23 Silvicultura, Q24 Tierras

O. Desarrollo económico, innovación, cambio tecnológico y crecimiento; O1: Desarrollo económico, O13 Agricultura • Recursos naturales • Medio ambiente • Otros productos primarios; O2: Planificación y política de desarrollo, O2. Análisis de proyectos.

Economic potential of livestock in the regeneration of ecosystem services in the caldén forest, Argentina.

Abstract

The degradation of the caldén forest is associated with fires and conventional grazing practices (CP) with cattle. The aim of this paper is to assess the economic potential of regenerative livestock practices, rational grazing (PR). A mixed integer linear programming model is built to investigate four treatments: PC, PR I with strategic supplementation (cleaning dead grasslands), PR I Eco - organic production standards-, and PR II with renewed grassland. The results show a significant improvement in the economic flow. The net benefits were: 45.63; 88.63; 81.74 and 139.55 US\$ ha⁻¹ with PC, PR I, PR I Eco and PR II respectively. Capital needs are higher in regenerative production. The working capital was: 2.45; 107.41; 121.91 and 55.06 US\$ ha⁻¹ with PC, PR I, PR I Eco and PR II respectively. The adoption of the regenerative system - from CP with 177 cows, to PR I, and PR II with 717 cows - would increase the value of the land by US\$ 2,215 ha⁻¹ if production stabilizes in PR II. The PR reduces fire risk, and grassland infrastructure and management improves soil ecosystem services.

Keywords: mixed integer linear programming, Adaptive multi-paddock grazing, sustainable development goal, planning, Espinal ecoregion,

Code JEL:

Q (Agricultural and Natural Resource Economics • Environmental and Ecological Economics), Q2 Renewable Resources and Conservation, Q23 Forestry Q24 Land

O. Economic Development, Innovation, Technological Change, and Growth; O1. Economic development, O13 Agriculture • Natural Resources • Energy • Environment • Other Primary Products; O2 Development Planning and Policy, O22 Project Analysis

Potencial económico de la ganadería en la regeneración de los servicios ecosistémicos en el bosque de caldén, Argentina.

I. Introducción

La sociedad asigna un alto valor a los bienes y servicios ecosistémicos de los bosques nativos, inclusive está dispuesta a pagar para conservarlos (Tello *et al.*, 2018a). Sin embargo, la degradación de los bosques en el mundo sigue siendo alarmante (FAO *et al.*, 2020). Según este informe, los incendios constituyen una de las principales causas de la degradación y se prevé que serán más intensos y frecuentes en el futuro debido a los efectos del cambio climático. En este escenario en las áreas con bosque nativo, es poco probable que se logren los objetivos de desarrollo sostenibles (ODS) de la Agenda-2030: *acción por el clima, vida en los ecosistemas terrestres, trabajo decente y crecimiento económico, producción y consumo responsable* (ODS, 2019; ONU, 2015).

Este fenómeno es particularmente importante en los bosques de caldén, bosque xerófilo con varios endemismos, distribuido en 160 933 km² de tierras (SAyDS, 2007) de propiedad y gestión privada en la República Argentina. Aunque estos bosques brindan múltiples servicios, los productores sólo lo usan para la producción ganadera bovina con sistemas extensivos de pastoreo, pastoreo convencional (PC) (e.g. Arzubi *et al.*, 2021; Nieto *et al.*, 2018). Los procesos de degradación del ecosistema están asociados al sobrepastoreo (Adema *et al.*, 2003; Sawczuk, 2018) y los incendios (MAYDS, 2020; Pombo *et al.*, 2020). Estos problemas están íntimamente relacionados con la cultura productiva dominante (Fernández *et al.*, 2009).

El sobrepastoreo depende del tiempo en que los pastos están expuestos al animal y la distancia a las aguadas (Voisin, 1988). En el bosque de caldén, la infraestructura productiva consiste en lotes grandes (de 100ha a 1000 ha o más) con una aguada compartida cada cuatro lotes. Es posible observar sobrepastoreo y subpastoreo con efectos contrastantes en el mismo lote. En la proximidad de las aguadas, se puede observar sobrepastoreo, pérdida de cobertura de suelo, mayor pérdida de agua por escurrimiento de agua, (Adema *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2017) y menor productividad primaria neta en el largo plazo (Bacha *et al.*, 2013). En tanto, en los periodos secos se incrementa el riesgo de la erosión eólica (desertificación inducida). En contraste, en las áreas alejadas de las aguadas, el consumo animal es menos frecuente, los pastos envejecen y mueren. El material muerto se acumula y la forma de descomposición es física o química por oxidación (Savory *et al.*, 1999). En los periodos secos, ya sea en forma

intencional o natural los incendios con frecuencia eliminan el material muerto. Y los incendios han sido una forma de renovación del pastizal y el principal factor de degradación de los servicios ecosistémicos del bosque y pastizales naturales (MAYDS, 2020).

En la medida que los incendios son más frecuentes e intensos, mayores son daños causados tanto al ambiente como a la infraestructura productiva. Este círculo vicioso, aleja a los productores con bosques de las posibilidades de contribuir a los ODS comprometidos por el país (ODS, 2019). En este contexto, se plantea la posibilidad de renovación del pastizal a través de la herbivoría y cambio en la modalidad de aprovechamiento del estrato herbáceo.

Regenerar el ecosistema natural y cultivado es un cambio cualitativo de las prácticas productivas, y de la cultura de producción para reconstituir el ecosistema, su salud y resiliencia y sostener las crecientes necesidades sociales (Lal, 2020). La agricultura regenerativa incluye la ganadería regenerativa con los principios manejo equivalentes al pastoreo racional (PR) (Spratt *et al.*, 2021). El PR fue desarrollado en la década del 60 sobre pasturas implantadas modificando la modalidad de manejo del ganado bovino lechero (Voisin, 1988). En América Latina fue adaptado y difundido por Pinheiro Machado con el nombre de “Pastoreo Racional Voisin” (Guevara Viera *et al.*, 2003; Ojeda-Falcón *et al.*, 2020). El mismo es un sistema de pastoreo planeado y controlado para ajustar las condiciones y tiempo de pastoreo durante el periodo de crecimiento y de reposo de las pasturas. El PR requiere de múltiples parcelas y acceso al agua para manejar la duración de pastoreo y el periodo de descanso del pasto (Voisin, 1988). El PR fue posteriormente adaptado, y perfeccionado para los ecosistemas naturales (Savory *et al.*, 1999). Se integra el PR en forma holística a la economía de la empresa, el desarrollo y bienestar de las personas en un contexto complejo. En lo concerniente al PR, un elemento crítico que se incorpora es el manejo de la cantidad de animales de acuerdo a la oferta forrajera, que difiere entre periodos secos y húmedos. Otro elemento son el cuidado de la biodiversidad y los hábitats naturales para la vida silvestre (Savory *et al.*, 1999).

Los resultados de la ganadería regenerativa son promisorios, mejoran la calidad del suelo, reducen el riesgo de erosión, aumentan la biodiversidad, la economía y estabilidad de la empresa (e.g. Mosier *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2017; Shrestha *et al.*, 2020). En la región de estudio, hay productores que han adoptado el PR. Una experiencia fue desarrollada con

ganadería ovina y bovina sobre pasturas implantadas en el establecimiento El Mate¹ (UniRioTV, 2017). En tanto, en el bosque de caldén hay dos experiencias en desarrollo. En la provincia de San Luis, en el Establecimiento el Tapayo, la experiencia consistió en: la primer intervención limpieza biomasa no deseada con uso de herbicida, siembra aérea de especies forrajeras e implementa un sistema de PR, apotreramiento con uso de boyero eléctrico para manejar los animales (Anomale *et al.*, 2019). El PR ha permitido mantener el pastizal sin acumulación de biomasa muerta, mejoró el aprovechamiento y redujo el riesgo de sobrepastoreo (Cola *et al.*, 2019)². En la provincia de Córdoba, una experiencia similar fue desarrollada en la Estancia Ralico. La limpieza de material herbáceo en senescencia o muerto acumulado, se realizó mediante herbivoría con el PR: con el efecto manada de los animales y la suplementación estratégica para cubrir los déficits de nutrientes³. El apotreramiento se realiza con boyero eléctrico, los animales permanecen en el periodo de limpieza, una semana por parcela. Se observó una respuesta positiva en la calidad del pastizal natural (pasó de 3.5% PB a 13, 5% de proteína bruta en promedio).

El PR mejora la calidad de las pasturas^{2y3}, y el consumo de las mismas. Comparado con el consumo de biomasa del estrato herbáceo del PC (20 a 40% en promedio), el consumo de pastizal bajo PR puede alcanzar hasta el 65% de la biomasa del pastizal natural y reduce los impactos ambientales (Chiba, 2009). Aunque Chiba menciona que el PR es más costoso que el PC. En este sentido, la información sistematiza al año 1999 con sistemas de pastoreos de corta duración en EEUU muestra que éstos no superan al PC (Holechek *et al.*, 2000). Un meta-análisis comparando sistemas de PC y rotativos muestras que no hay diferencias significativas entre sistemas de pastoreo (Hawkings, 2017). El autor menciona mejoras en la producción del pastoreo rotativo, pero los beneficios económicos no compensan los gastos de inversión y producción. En esta línea, Derner *et al.* (2021) estudian un sistema de PR manejado en forma colaborativa por 11 involucrados y lo comparan con el PC. El sistema colaborativo incrementa la producción, pero el incremento de los ingresos económicos no compensa los mayores costos. En la Patagonia Argentina un sistema PR desarrollado con ganadería ovina durante cuatros años con resultados contradictorios sobre la performance cuando se los contrasta con el PC de baja carga (Oliva *et al.*, 2021). Estas

¹ Comunicación personal Vaschetto, Bruno y Sergio Toletti y observación en terreno.

² Comunicación personal y datos Juan Cola y observación en terreno pastoreo racional intensivo con ganadería bovina en el Establecimiento Tapayo, San Luis.

³ Comunicación personal y datos: Emiliano Freire (Estancia Ralico – datos de producción) y observación en terreno: proyecto piloto apotreramiento con alambrado eléctrico, pastoreo directo con alta carga ganadera, suplementación con rollos de alfalfa en el bosque.

discrepancias de la ganadería regenerativa son abordadas en este estudio, guiado por la hipótesis “la ganadería regenerativa (PR) supera en términos económicos a la ganadería convencional, aunque con un costo significativo en el periodo de transición o de renovación del pastizal.

El objetivo: desarrollar un modelo matemático de programación lineal entera mixta (PLEM) para estudiar los efectos económicos de la transición de la ganadería bovina de cría con PC hacia la ganadería regenerativa basada con PR.

El modelo se usa para:

- a) indagar sobre el potencial económico de cambiar el sistema de PC al PR considerando: la primera intervención (PR I) – renovación del pastizal, la segunda intervención (PR II) con la respuesta del pastizal renovado; y el PR Eco, se incluyen las limitaciones de las normas de producción orgánica.
- b) Identificar las necesidades de recursos que demanda la ganadería regenerativa con el proceso estabilizado: capital circulante, tierras adicionales para la producción de suplementos estratégicos para alimentación animal, y trabajo.
- c) Valorar el impacto en el valor de la tierra de esta innovación, que ayuda a determinar cuánto podría invertir en términos económicos el productor para implementar el PR.

Las contribuciones principales de este trabajo son dos. En primer lugar, se desarrolla un modelo matemático simple que integra y agrega valor a la información disponible dispersa. El modelo permite identificar los potenciales económicos, dimensionar la brecha económica, y cuantificar el esfuerzo económico del periodo de transición para implementar el PR. El modelo puede ajustarse a cada situación con datos locales y seleccionar las modalidades de manejo del pastizal más promisorias. La segunda contribución consiste en la integración de los resultados de optimización al análisis beneficios costos que permite estimar el valor del recurso, tierra, por el cambio en la modalidad de manejo. Esta contribución es importante porque permite visualizar en un indicador económico fácil de comunicar el potencial de cada modalidad de manejo y además puede utilizarse como un indicador de equidad entre generaciones.

II. Materiales y métodos

El área de estudio se localiza en la ecorregión del Espinal, al sur de la provincia de Córdoba, en lo que se denomina Corredor Biogeográfico del Caldén (en adelante CBC,

Figura 1). El CBC posee clima templado con estación seca, las precipitaciones varían en sentido noreste a suroeste desde 650 mm hasta los 500 mm anuales y las temperaturas medias anuales alrededor de 16 °C con temperatura media del mes más cálido de 24 °C y del más frío de 8 °C (BID-PID 013/2009-2015, 2014). La fisiografía es ondulada por la presencia de médanos de diferentes épocas, las cubetas de deflación humedales, y las borduras con pastizales e isletas de chañar. Las tierras cultivadas con cultivos de cosechas y pasturas implantadas para la producción ganadera bovina son la expresión de cobertura vegetal dominante en el CBC. Los suelos son poco profundos desarrollados sobre materiales arenosos medios y finos, con riesgos de erosión eólica, y erosión hídrica en periodos de altas precipitaciones (BID-PID 013/2009-2015, 2014). Las tierras cultivadas presentan moderada a fuerte pérdida de productividad, mientras que en los bosques el principal factor degradación son los incendios, y en menor medida la deforestación (MAYDS, 2020).



Figura 1. Localización del área de estudio, corredor biogeográfico del caldén, ecorregión del Espinal.

Fuente: mapa de ecorregiones de la República Argentina, tomado del MAYDS.

Tratamientos

Cuatro variantes son exploradas: PC, PR I, PR II, y PR ecológico. En el PC los animales son introducidos al bosque nativo y pastorean en forma libre hasta que se sacan (Sawczuk, 2018). Las otras tres variantes usan el PR, apotreramiento en múltiples parcelas (alambrados eléctricos) y distribución de aguadas previo al ingreso del animal. El PR se maneja con alta

carga animal instantánea durante periodo de pastoreo de corta duración (1 a 7 días), y se retiran los animales para un periodo de descanso del pastizal para la recomposición de las reservas del pasto (30 a 180 días). Las características de las variantes son:

1. PC: representa el sistema actual de pastoreo de la actividad de cría bovina en el bosque nativo.
2. PR I: representa la primera intervención de la herbivoría con suplementación estratégica. Esta intervención permite la limpieza o renovación del estrato herbáceo, la suplementación estratégica complementa las carencias nutricionales de los pastizales (Tabla 1). La alta carga inicial por parcela (efecto manada, pisoteo y bosteo) realiza la operación de renovación del pastizal, por consumo y descomposición biológica de los pastos de baja calidad.
3. PR II representa la segunda intervención de la herbivoría con el estrato herbáceo renovado.
4. PR Eco representa un PR que cumple con las normas de producción orgánica, que agrega dos limitaciones. La primera limitación es la suplementación de los animales con concentrados para cubrir los déficits de la producción de los pastizales debe ser menor que el 30% de la materia seca de la ración diaria, y la segunda limitación la urea no se puede usar para la suplementación del ganado vacuno (AGENCERT, 2018).

Datos

Los datos de los productores, recursos, cantidad y modalidad de uso del bosque y pastizales, actividades productivas fueron tomados del CNA 2002 y actualizado mediante una encuesta en el CBC (Tello *et al.*, 2018b). Los productores empresarios son 128 y gestionan más del 95% del bosque nativo, mientras que el 5% restante del bosque corresponde a 87 productores familiares. El modelo matemático se desarrolla considerando el productor empresario representativo: con 3 128 ha de tierra, sistema de producción mixto (893 ha tierras en cultivos agrícolas, y 2 235 ha de tierras ganaderas en el año 2017). Las tierras ganaderas en promedio se corresponden con: 851 ha de bosque nativo y pastizales naturales, y 1 384 ha de cultivos forrajeras anuales y pasturas perenes implantadas. La ganadería es de ciclo completo, con una existencia ganadera promedio de 2 388 cabezas, y el rodeo de cría compuesto por 840 vacas (Tello *et al.*, 2018b). En este trabajo, nos focalizamos en el aprovechamiento del pastizal natural y del bosque nativo para la actividad de cría bovina.

La modalidad de aprovechamiento del estrato herbáceo era PC, y los datos sobre la calidad del estrato herbáceo se muestran en la Tabla 1, fueron tomados del inventario realizado en el año 2017 (Plevich, 2017; Utello *et al.*, 2021) y se ajustan para el área de bosque promedio del productor empresario. El PC, PR I usan la misma calidad forrajera básicamente limitado por las proteínas brutas. En el PR I, se asume que los animales pueden consumir más biomasa del pastizal por el efecto de la suplementación.

Método

La PLEM permite incluir variables discretas y continuas para optimizar una función objetivo, sujeta a un conjunto de restricciones, por ejemplo, tierra, capital y trabajo (Bermúdez Colina, 2011). El modelo incluye la oferta y cosecha de estrato herbáceo durante un año. Se supone que es posible ajustar la estacionalidad en la oferta del estrato herbáceo: 62% de la biomasa es producida por las especies invernales y 38% de la biomasa por las especies estivales (Gabutti *et al.*, 1999) a los requerimientos nutricionales de las vacas en los diferentes estados: preñada, y en lactancia (Aello, 2014; Chiba, 2009). Modelo matemático

La PLEM se usa con una función objetivo con 7 variables de decisión (Ec.1) y con 9 restricciones (Ec. 2 a 9). Las restricciones incluyen dos variantes, la primera para a) indagar los requerimientos para la limpieza o renovación del estrato herbáceo mediante el uso de la vaca en PR, en forma similar a lo observado en la Estancia Ralico. Esta variante del modelo también permite indagar el potencial máximo del PC sin suplementación y la transición al PR. La segunda variante del modelo, PR II: b) usa los parámetros del pastizal renovado. Básicamente, las diferencias entre variantes del modelo son: la cantidad y calidad del estrato herbáceo, y los requerimientos de trabajo (Ec. 2 a 9).

En el modelo, se maximiza el beneficio neto de gastos de operación, z , Ecuación (1)

$$z = 3510 x_1 - 1,12 x_3 - 6,2 x_4 - 2,73 x_5 - 0,37 x_6 - 0 x_7 - 493 x_8 \quad \text{Ec. (1)}$$

donde: las variables, el nombre, la unidad de medida y tipo de variable se muestran en la Tabla 2. Los gastos de operación se corresponden con: sanidad, reposición de toros, comercialización, alimentación y salarios de los trabajadores adicionales. Los tres primeros están descontados de las ventas de terneros por vaca (x_1) y los dos últimos son optimizados mediante la elección de las variables de decisión del modelo.

Las dos variantes programadas usan las mismas variables de decisión, x_1 y x_2 , cantidades de vacas y de toros respectivamente son las variables de decisión enteras y las

otras variables son continuas. Para los requerimientos nutricionales de la vaca se considera la definición de equivalente vaca (EV): requerimientos diarios promedio de una vaca de raza británica de 450 kg de peso vivo, que gesta y cría un ternero hasta el destete con 160 kg de peso vivo en promedio.

Tabla 1. Cantidad y calidad del estrato herbáceo del bosque de caldén: máximo aprovechable

Estrato herbáceo – inicial – primera intervención				Máximo aprovechable (4)	
	Área Ha	Materia seca kg/ha	Proteína bruta %	Materia seca total Kg / año	Proteína bruta Kg/año
Bosque Cerrado (1)	245	3300	3,50%	PC 20 a 40% del total PR 50% del total	
Bosque Abierto (1)	222	4461	3,50%		
Bosque degradado (1)	133	5067	3,50%		
Pastizales (2)	251	7000	3,50%		
Pastoreo convencional				1.268.804	74.014
Pastoreo Racional I				2.114.673	74.014
Estrato herbáceo – segunda intervención				Máximo aprovechable	
Bosque Cerrado (3)	245	2051	14,5%	65% del total	65% del total
Bosque Abierto (3)	222	2823	13,3%		
Bosque degradado (2)	133	3206	13,3%		
Pastizales (2)	251	7000	7,0%		
Pastoreo Racional II				2.153.056	218.332

Nota: (1) datos provistos por Freire, Estancia Rálico, (2) elaborado en base a observaciones de terreno, (3) elaborado en base a los datos Utello *et al.* (2021), y (4) supuestos de cálculo basados en Chiba (2009).

El ingreso neto de gastos sanitarios, de reposición de toros, y de comercialización \$c 3 510 (U\$S 219) equivale a la venta de un ternero para un rodeo que en promedio desteta el 90% de los terneros a los 160 kg de peso vivo. Los precios usados son constantes a diciembre de 2016, representan el promedio de precios entre 2007 y 2016 actualizados por el índice de precios mayorista nivel general (CREA, 2017).

Tabla 2. Variables de decisión y parámetros de la función objetivo

VARIABLES	NOMBRE	UNIDAD DE MEDIDA	TIPO DE VARIABLE
x ₁	Vacas	Nº vacas	Entera
x ₂	Toros	Nº toros	Entera
x ₃	Maíz granos	Kg	Continua
x ₄	Urea	Kg	Continua
x ₅	Expeler soja	Kg	Continua
x ₆	Heno de alfalfa	Kg	Continua
x ₇	Crédito corto plazo	\$c año ⁻¹	Continua

También, se usa el dólar (\$c 16 U\$S⁻¹) y el equivalente del peso vivo de ternero EPVT, medido en kilogramos, para informar los resultados económicos (\$c kg⁻¹ 26). Los gastos de alimentación: incluye el precio de suplemento puesto en la chacra (maíz, urea,

harina de soja, o heno de alfalfa) por la cantidad de suplemento x_3, \dots, x_6 respectivamente; y gastos en trabajo adicional contratado para las operaciones de suplementación. Además, el modelo permite estimar el capital de trabajo, x_7 , y empleo adicional requerido a una persona en promedio asignada para la actividad, x_8 . Sujeto a las restricciones:

$$180 x_1 + 180 x_2 + 1,12 x_3 + 6,20 x_4 + 2,73 x_5 + 0,37 x_6 - x_7 = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

$$0,5 x_1 + 0,5 x_2 + 0,0005 x_3 + 0,001 x_4 + 0,001 x_5 + 0,0005 x_6 - x_8 = 250 \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$0,65 x_1 + 0,65 x_2 + 0,0005 x_3 + 0,001 x_4 + 0,001 x_5 + 0,0005 x_6 - x_8 = 250 \quad \text{Ec. 3.2}$$

$$3.650 x_1 + 4.745 x_2 - x_3 - x_5 - x_6 \leq 2.114.673 \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$3.650 x_1 + 4.745 x_2 - x_3 - x_5 - x_6 \leq 2.153.056 \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$7.800 x_1 + 10.140 x_2 - 3,25 x_3 - 2,88 x_5 - 1,85 x_6 \leq 4.229.345 \quad \text{Ec. 5.1}$$

$$7.800 x_1 + 10.140 x_2 - 3,25 x_3 - 2,88 x_5 - 1,85 x_6 \leq 4.637.351 \quad \text{Ec. 5.2}$$

$$390 x_1 + 608 x_2 - 0,10 x_3 - 1,26 x_4 - 0,45 x_5 - 0,16 x_6 \leq 74.014 \quad \text{Ec. 6.1}$$

$$390 x_1 + 608 x_2 - 0,10 x_3 - 1,26 x_4 - 0,45 x_5 - 0,16 x_6 \leq 218.232 \quad \text{Ec. 6.2}$$

$$- 0,04 x_1 + x_2 \leq 0 \quad \text{Ec. 7.1}$$

$$- 0,03 x_1 + x_2 \leq 0 \quad \text{Ec. 7.2}$$

$$-1095 x_1 - 1424 x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - x_6 \leq 0 \quad \text{Ec. 8}$$

$$-36,5 x_1 - 40 x_2 + x_4 \leq 0 \quad \text{Ec. 9}$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, \text{ y } x_8 \geq 0$$

Ec. 2, representa las necesidades de capital circulante o de trabajo. Es idéntica en las dos variantes del modelo, \$c 180 por cabeza cubre los gastos sanitarios. La Ec. 3 representa las necesidades trabajo para la gestión del sistema de producción. El trabajo requerido para manejar animales y la suplementación debe ser menor igual que el trabajo disponible, 250 jornales año, más el contratado (x_8). En tanto, Ec. 3.1. en PC (0,5 jornal por cabeza) equivalente a 500 EV por persona año⁻¹ mientras que Ec. 3.2 en PR (0,65 jornal por cabeza) equivalente a 385 EV persona⁻¹. Estos parámetros incluyen el valor promedio de los establecimientos CREA – Región centro para la actividad de cría 429 EV persona⁻¹. Además, la cantidad de trabajo asociado a suministro del suplemento se incluye en el coeficiente técnico de cada suplemento.

Las Ec. 4, 5 y 6 representan las demandas de alimentos (materia seca, energía metabólica, y proteína bruta respectivamente) debe ser menor o igual que lo suplementos más la disponibilidad del pastizal. La demanda de alimentos por equivalente vaca, se considera 3650 kg años de acuerdo con los requerimientos para las razas británica entre 3.000 y 4.000 kg MS/año de pasturas elegidas entre 50 a 65% de digestibilidad a lo largo del año para destetar un ternero a los 6-8 meses de edad (Aello, 2014). En tanto las ecuaciones 4.1., 5.1, y 6.1 representan la calidad y disponibilidad de los pastizales en pastoreo convencional y en PR I. Y las Ec. 4.2, 5.2 y 6.2 representan la calidad y disponibilidad de alimentos en PR II. Es importante notar que las variaciones más relevantes son las proteínas brutas aprovechables (74.014 kg/año en pastizales con PC pasa a 218.232 en el PR II).

La Ec. 7.1. y 7.2 la cantidad de toro por vacas, 4% para el pastoreo convencional y PR I, y 3% de toros para el PR II. La Ec. 8 es una restricción de la cantidad de suplementos estratégicos deben ser menores que el 30% de la biomasa total demandada equivalente a la restricción para la producción orgánica.

La ecuación 9, es la restricción de la cantidad de urea que puede consumir la vaca y el toro como fuente de nitrógeno no proteico 36.5 y 40 kg respectivamente (7% y 9% de los requerimientos totales de proteína bruta) para evitar la toxicidad por amoniac (Chiba, 2009).

Método para estimar el valor de stock del recurso natural

El flujo de beneficios netos incrementa el valor del capital natural. Las ecuaciones 10, 11 y 12 muestran como pasar del flujo económico estimado por el modelo PLEM al valor de la tierra, recurso natural. Las inversiones económicas consisten en inversiones en capital fijo (fundario y de explotación), capital de trabajo (capital circulante – Ec. 2) e inversiones nominales o intangibles. El indicador más usado del análisis beneficios costos es el valor actual neto económico, (Boardman *et al.*, 2018), representado por la Ec. 10:

$$VANE = I_0 + \frac{BN_1}{(1+r)^1} + \frac{BN_2}{(1+r)^2} + \sum_{t=3}^{\infty} \frac{BN_t}{(1+r)^t}, \quad \text{Ec. 10}$$

donde: I_0 representa la inversión total (fija, capital de trabajo y nominal), medidas en pesos imputada al momento inicial del proyecto, el subíndice t, representa el tiempo medido en años, desde el momento 0, ..., ∞ , BN son los beneficios netos de gastos de operación con y sin proyecto (sin proyecto PC) y r representa el costo de oportunidad del capital. El modelo PLEM nos permite conocer BN_1 y BN_2 , suponiendo que las repuesta se estabiliza a partir del

segundo año, el valor total de flujo de BN futuros desde el año 3 a infinito puede ser expresado como el cambio en el valor de stock (tierra, capital y trabajo-saber hacer) del establecimiento en el año R_3 , representado por la Ec. 11.

$$\sum_{t=3}^{\infty} \frac{BN_t}{(1+r)^t} = \frac{BN_2}{r} = R_3, \quad \text{Ec. 11}$$

Y consecuentemente, el máximo monto de inversiones puede ser estimado de la siguiente manera:

$$I_0 = \frac{BN_1}{(1+r)^1} + \frac{BN_2}{(1+r)^t} + \frac{BN_2}{r}, \quad \text{Ec. 12}$$

El costo de oportunidad, r se supone en el 4%, que representa que el productor empresario duplica u obtiene un capital equivalente al fundiario cada 18 años.

III. Resultados y discusión

Potencial económico y productivo del pastoreo racional intensivo

El modelo arroja resultados contrastantes (Tabla 3). Los beneficios netos una vez montada la infraestructura para el PR II es tres veces mayor que el sistema de PC. En el PC, el modelo estima un BN de \$ 621.270 (EPVT 23.895 kg años⁻¹), mientras que el PR II alcanza los \$ 1.900.054 por año (EPVT 73.079 kg años⁻¹). En el PC, la cantidad de vacas fueron calculadas en 177, mientras que en el PR II esta cifra ascendió a 717 vacas. La calidad forrajera del pastizal renovado permite prácticamente cubrir los requerimientos alimenticios. El modelo es restringido por el 30% de suplementación usando 815.923 kg de henos de alfalfa.

Sin embargo, para alcanzar la calidad forrajera es necesario realizar una transición, PR I de limpieza o renovación del pastizal. De acuerdo al modelo, el BN del PR I casi duplica al PC, alcanzan un valor de \$ 1 206 764 por año (EPVT 46.414 kg años⁻¹) versus \$ 621.270 del PC. En el PR I, se muestra la importancia de la suplementación estratégica para compensar la pobre calidad del pasto. La suplementación estratégica más importante es el concentrado proteico, que es cubierto con urea, harina de soja, y heno de alfalfa 27.513, 203.305 y 601.053 kg respectivamente.

En el caso, que se valore como producción orgánica solamente se requiere modificar el PR I, dado que el PR II no demanda urea. En el PR I sin urea, la suplementación

estratégica se distribuye entre la harina de soja y heno de alfalfa respectivamente 330.034 y 553.921 kg respectivamente. El costo de prohibición en las normas orgánicas de la urea es de alrededor 8% de beneficios netos en PR I, \$c 93 827, sin considerar las posibles diferencias en los precios del producto y de los insumos orgánicos.

Tabla 3. Valores de las variables de decisión por tipo de manejo de la pastizal para el productor empresario

Var.	Nombre	Unidad	Pastoreo convencional	Pastoreo racional intensivo con suplementación estratégica		
				PR I	PR I sin urea	PR II
x1	Vacas y reposición	Nº vacas	177	722	750	717
x2	Toros	Nº toros	8	29	30	22
x3	Maíz granos	kg años ⁻¹	Nc	0	0	0
x4	Urea	kg años ⁻¹	Nc	27.513	0	0
x5	Expeler soja	kg años ⁻¹	Nc	203.305	330.034	0
x6	Heno de alfalfa	kg años ⁻¹	Nc	601.053	533.921	815.983
Z	Beneficio neto	\$c año ⁻¹	621.270	1.206.764	1.112.937	1.900.054
	Beneficio neto	EPVT kg años ⁻¹	23.895	46.414	42.805	73.079
	Beneficio neto unitario	U\$S ha ⁻¹ año ⁻¹	45,63	88,63	81,74	139,55

Nota: nc: no corresponde., EPVT: equivalente peso vivo de ternero, el precio usado fue de \$c 26 kg⁻¹.

Requerimientos de recursos

El modelo muestra un uso de recursos más intensivo en el sistema PR en contraste al PC. En el PR II, se requiere un capital de trabajo de más de 22 veces que el mismo en el PC (749.636 versus 33.300 en PC). En tanto, el PR I muestra el momento más crítico, la transición. De hecho, el capital de trabajo requerido en el PR I, es 44 veces mayor que el capital de trabajo en el PC (\$c 1.462.534 en PR I versus \$c 33 300 en PC). Es importante notar que el capital de trabajo en el PR I es una transición hacia el PR II y posteriormente se libera prácticamente la mitad mismo.

El PR también es más intensivo en trabajo. En el PC, demanda alrededor de 93 jornales por año, mientras que el PR II, demanda alrededor de 888 jornales por año. En tanto, la tierra para aprovechar las 851 ha de pastizal natural renovado se requieren el equivalente a 102 ha adicionales de tierras laborables para la producción del heno de alfalfa, que permita realizar la suplementación estratégica.

Tabla 4. Recursos usados por tipo de manejo del pastizal

Recursos usados	Unidad de medida	Pastoreo convencional	Pastoreo racional intensivo con suplementación estratégica (PR)		
			PR I	PR I Eco	PR II
Capital trabajo	\$c año ⁻¹	33.300	1.462.534	1.659.963	749.636
Capital trabajo unitario *	U\$S ha ⁻¹ año ⁻¹	2,45	107,41	121,91	55,06

Trabajo	Jornales	93	1019	1.104	888
Tierra	Ha	851 **	993	1.027	953

Nota: *se usa 851 ha pastizales naturales, y \$c16 US\$¹; ** limitado por la cantidad de proteínas.

En la producción orgánica, se reemplaza la urea por harina de soja e incrementa levemente el uso de recursos en el PR I, y no tiene efectos en el PR II. En el PR I Eco, se incrementa el uso de capital de trabajo, trabajo y tierras en un 14%, 8% y 3% respectivamente. La producción orgánica en estos sistemas básicamente tiene dos requisitos: prohibición del uso de urea, y el uso de suplementos hasta un 30% de concentrados para cubrir la demanda alimenticia, medida en materia seca. El PR II, no requiere de urea. En la Tabla 5, se muestran los resultados con diferentes niveles de suplementación. Comparado con el PC, el PR II sin suplementación prácticamente triplica los beneficios netos de gastos de alimentación aún sin considerar un plus de precios por la producción orgánica (\$c 1.811.774 versus \$ 621 270). También, el empleo y capital de trabajo se reduce significativamente si fuese posible eliminar la suplementación estratégica.

Tabla 5. Demanda alimentos cubierta por suplementos. PR II

	Suplementos % demanda	Vacas cabezas	Toros Cabezas	Beneficios netos \$c	Capital de trabajo \$c	Empleo Jornales
PC	0%	177	8	621.270	33.300	93
PR II	0%	531	16	1.811.774	150.493	356
PR II	10%	581	18	1.834.560	312.570	500
PR II	20%	642	20	1.862.748	509.832	674

Sin embargo, es probable que el PR II en el último mes de la vaca en gestación y durante los dos meses de lactancia y los toros en el periodo de servicios requieran de los suplementos estratégicos para cubrir las mayores demandas nutricionales. Esta situación queda representada posiblemente entre la cobertura del 10% y 30% con suplementos. Donde claramente se muestra mejoras leves con respecto al PR II sin suplementación en términos económicos, aunque requiere el incremento significativo en el capital de trabajo y empleo. Por ello, definitivamente el PR II, muestra mejor performance productiva y económica, aunque requiere más capital de trabajo y empleo.

Inversiones totales

Aunque los BN son muy promisorios para la adopción del PR por parte de los productores empresarios del corredor biogeográfico del caldén. Además de la necesidad de capital de trabajo es necesario considerar las inversiones fijas y las nominales.

Las inversiones fijas: para implementar el PR I, primer año y PR II, segundo año se refieren a las necesidades recursos económicos para:

- a) la distribución de agua y colocación de bebederos, los animales no debieran caminar más de 250 m para acceder a los bebederos (Coimbra *et al.*, 2012) con agua de calidad para satisfacer los estándares de bienestar animal,
- b) apotreramiento en parcelas, por tipo de bosque y pastizal con alambrado eléctrico,
- c) accesibilidad a las parcelas, en casos construir senderos – caminos: suplementación estratégica, y control de incendios,
- d) los equipos para realizar la distribución de los suplementos estratégicos,
- e) la cantidad de vacas para manejar alta carga animal instantánea, y producir el efecto manada.

En tanto, las inversiones nominales (intangibles) se refieren: a la planificación del sistema PR integrado a sistema de producción: diagnóstico, y planificación de la infraestructura productiva: diseños de la cosecha de agua de lluvia o extracción, y sistema de aguadas, apotreramiento fijo o flexible, cantidad de parcelas (entre 35 y 140 parcelas para el productor representativo de 851 ha), b) planificación del rodeo y su manejo considerando las contingencias, c) planificación y ajuste de la transición, considerando los mayores gastos ocasionales en la implementación. Y posiblemente, más importante: la capacitación para saber hacer: revisión y control de especie tóxicas, reconocer el estado corporal de las vacas, estimación y ajuste del tiempo de pastoreo en la parcela, valorar la calidad del estrato herbáceo y la calidad y cantidad del suplemento estratégico de acuerdo a la oferta forrajera disponible, la asignación de parcelas – respetando tiempo de descanso para la recuperación de las especies de mayor valor forrajeras.

Tabla 6. Flujo económico pastoreo racional intensivo con suplementación estratégica

	Unidades	Tiempo en años, momento inicial y final			
		0	1	2	3 a infinito
BN PC	\$		-621.270	-621.270	-15.531.750
BN PR	\$	I0	1.206.764	1.900.054	47.501.360
BN con y sin *	\$	I0	585.495	1.278.784	31.969.600
BNA *	\$		-30.166.141	562.975	1.182.308
BNA por unidad	EPVT kg h ⁻¹		-1.363,4	25,4	53,43

Nota: BN: Beneficio neto, BNA: beneficio neto con y sin proyecto actualizado con un costo de oportunidad 4%, PC: Pastoreo convencional, PR: Pastoreo racional con suplementación estratégica, R: valor capital agrario (tierra, capital y saber hacer estimado al momento). EPVT: equivalente peso vivo de ternero

El total de inversiones que puede afrontar el productor de acuerdo al costo de oportunidad se muestra en la Tabla 6. El flujo de BN con y sin PR muestra el beneficio neto

adicional, que es utilizado para estimar el cambio de valor de stock del capital agrario, R_3 , equivalente al flujo futuro desde el 3er año a infinito.

El cambio de valor del stock, R_3 , tierras con pastizales, renovados, inversiones fijas, y saber hacer si se mantienen un flujo similar al segundo año alcanza casi \$c 32 MM ($r= 4\%$) en el tercer año. De hecho, el valor de stock con el flujo en PC en el año 3, sería de \$15.531.750 (cuyo valor unitario equivale US\$ 1140 ha^{-1}) y el stock del PR \$c47.501.360 (cuyo valor unitario equivale US\$ 3 488 ha^{-1}). Esto muestra la diferencia cualitativa en la capacidad productiva capturada por la variable de stock, cambio de R que representa, la tierra, el capital, el trabajo y saber hacer.

El flujo económico que genera PR versus el PC, si a partir del segundo año se estabiliza PR II y el productor empresario tiene un costo de oportunidad de 4% el proyecto puede invertir por todo concepto: alrededor de \$c30 MM en el momento inicial y quedar indiferente entre PC y PR, si las inversiones son menores el productor tendría una rentabilidad absoluta y sin son mayores no sería viable. La inversión total que puede soportar la transición de PC a PR, alrededor de 30\$c MM es muy alta en términos relativos, por ejemplo, la compra de las vacas y toros adicionales para implementar el PR requiere alrededor de \$c 3,2 MM. Por lo tanto, aunque el valor debe considerarse en para cada sistema en particular las probabilidades de rentabilidad son altas. Además, los productores empresarios tienen en promedio un rodeo de cría de 842 vacas y parte del equipamiento para realizar las operaciones de suplementación. Por ello, el apotreramiento y distribución de las aguadas en el bosque y los pastizales posiblemente son las inversiones fijas más relevantes para la mayoría.

El saber hacer constituye una inversión intangible muy importante. En primer lugar, porque hay escaso valor por las tecnologías de proceso, requieren cambiar la forma de concebir y hacer las cosas. En segundo lugar, la capacitación para adquirir este saber hacer es limitada en todo el sistema educativo formal y de extensión. De todos modos, las experiencias desarrolladas localmente constituyen un lugar de referencia para estas prácticas.

Discusión

Los resultados están dentro del rango de los informado por otros autores. La carga animal calculada por el modelo en el PC fue 0,22 EV ha^{-1} . La carga animal informada en la misma área de estudio fue de 0,16 EV ha^{-1} (Tello *et al.*, 2017). En tanto, en el bosque de caldén en La Pampa usaron una carga animal de 0,13 EV ha^{-1} para un modelo predial

representativo de 3000 ha con 95% de pastizales y bosque nativo (Iturrioz, 2013). También, en La Pampa con datos medidos en forma experimental han usado en PC una carga 0,17 EV ha⁻¹ considerada como una carga recomendada y una alta carga 0,35 EV ha⁻¹ (Sawczuk, 2018). En el bosque de caldén de San Luis, con datos relevados por una encuesta los productores operan una superficie de 3598 ha, con una carga animal de 0,13 EV ha⁻¹ en promedio (Nieto *et al.*, 2018). Los modelos de cría para sudeoeste sanluiseño basado en pastizales donde el bosque de caldén ocupa el 38% de la tierra la carga animal para el PC y mejorado fueron 0,13 y 0,24 EV ha⁻¹ (INTA, 2011). También en San Luis, en el estudio sobre el efecto de pastoreo en la expansión de especies no forrajeras informan una carga animal intermedia y alta 0,125 y 0,2 EV ha⁻¹ (Rauber *et al.*, 2014). En un trabajo, más reciente que modela el productor representativo de cría bovina de La Pampa y San Luis semiárida, con 85% de campo natural y 15% pasturas implantadas la carga animal usada fue de 0,26 EV ha⁻¹ (Arzubi *et al.*, 2021).

En comparación carga animal estimada en PC, la carga animal calculada por el modelo con el PR II se triplica alcanza 0,64 y 0,78 EV ha⁻¹ sin y con suplementación estratégica (la calidad del estrato herbáceo soporta entre 2,9 y 3,5 más animales en la misma área (después del periodo de transición) algo menor al impacto del PR más la incorporación de especies forrajera que quintuplica la carga animal en el bosque de caldén de San Luis (Anomale *et al.*, 2019), y que lo informado por Teutscherová *et al.* (2021) en la llanura tropical de Colombia, donde el sistema PR incrementa más de 4 veces la carga animal (4,3 a 1 EV ha⁻¹). Nuestros resultados son mayores que los hallados en el norte de Texas Estados Unidos, donde la carga del PR se duplica comparada con PC moderado y es similar al PC intenso (Park *et al.*, 2017; Teague *et al.*, 2011).

El resultado económico es consistente con lo hallado por otros autores, aunque se sobreestimó el resultado del PC. El BN fue calculado en \$c 730 ha⁻¹ (EPVT 28 kg ha⁻¹) en el PC. Las estimaciones previa en el CBC, BN EPVT 18 kg ha⁻¹ (Tello *et al.*, 2017). En tanto, en San Luis los BN EPVT 8 y 13 kg ha⁻¹ (Anomale *et al.*, 2019; INTA, 2011). El modelo predial representativo de cría de La Pampa y San Luis semiárida EPVT 19 kg ha⁻¹ (Arzubi *et al.*, 2021). En el diseño, la variante de PC en nuestro estudio sobreestimamos el consumo de biomasa forrajera y no reducimos el porcentaje de destete, mientras que los modelos representativos usan porcentajes de destete más realistas alrededor de 70% y el consumo biomasa del pastizal es menor.

El hallazgo económico es muy promisorio. Comparado con PC, después de la transición el PR triplica los BN, el modelo muestra EPVT 77 kg ha⁻¹ (y 81kg ha⁻¹ PR sin suplementos). Mediante uso de modelo de simulación con un horizonte de 25 años, Teague *et al.* (2015) hallaron que incrementar el número de parcelas, acortar el periodo de pastoreo, ajustar los periodos de descansos mejora las condiciones ecológicas y las rentabilidad del PR. Además, en las grandes llanuras del oeste de EEUU comparan resultados económicos con diferente intensidad de pastoreo durante 15 años entre 2003 y 2017. Los resultados económicos son mejores con mayor intensidad de pastoreo en los años húmedos y normales, mientras que no hay diferencias en los años secos (Irisarri *et al.*, 2019).

Es importante notar que la mayor rentabilidad económica se debe al incremento de la carga animal debido al cambio en la calidad del estrato herbáceo por el sistema de pastoreo. Por ello, el resultado no contradice lo hallado por otros autores con iguales carga animal entre las modalidades de pastoreo (Derner *et al.*, 2021; Hawkings, 2017). Y es consistente con estos autores en la necesidad de mayores recursos, especialmente en la transición hacia el PR I requiere de un esfuerzo económico muy importante. Particularmente, arrojamamos alguna luz con el cálculo del capital de trabajo requerido, EPVT pasa de 1.5 en PC a 66 kg ha⁻¹ en el PR I y además las necesidades de trabajo el PC, que fue de 93 jornales y pasa a más de 1000 jornales, equivalente a 4 empleados en la transición.

Sin embargo, el cambio en el valor de recursos R, por la capacidad productiva generada muestra el gran potencial del sistema y la tensión creativa para pensar como implementamos la ganadería regenerativa. De hecho, el valor de la tierra EPVT 312 y 445 kg ha⁻¹ correspondiente al modelo citado (Arzubi *et al.*, 2020, 2021) representa el 25 o 30% de lo que puede invertir el productor para implementar el PR: EPVT 1284 kg ha⁻¹. Este resultado es consistente con la percepción “duplicamos el campo, y gozamos de sus beneficios” y los datos compartidos Cola *et al.* (2019) y los informado Anomale *et al.* (2019) sobre este caso.

El PR II además muestra una posibilidad adicional, producir bajo normas de producción orgánicas. Una revisión de artículos científicos en EEUU muestra que la producción orgánica tiene una mejor performance económica que los sistemas convencionales debido a los menores costos de producción y un mayor precio de mercado del producto (Durham *et al.*, 2021). Sin embargo, los autores señalan que los productos orgánicos tienen en general menores rendimientos, especialmente en la producción hortícola y animal. En nuestro caso, no hay reducción del rendimiento, pero la ganadería en PR orgánico requiere más trabajo y capital circulante para PR I especialmente. Otro elemento importante es señalar que el ternero producido bajo normas orgánicas tiene que entrar en una cadena

diferenciada y posiblemente el efecto sobre rendimientos se observe en la etapa terminación (Fernández *et al.*, 1999).

El incremento de la carga animal con un sistema PR para un año normal mejora las propiedades físicas del suelo, menor densidad, más infiltración de agua de lluvia y menor escurrimiento superficial y la cobertura del suelo cuando se los compara con PC intenso (30% de suelo desnudo versus menos de 1%)(Park *et al.*, 2017; Teague *et al.*, 2011). Y también, PR mejora la estructura y biología del suelo, especialmente la mesofauna: escarabajos y lombrices (Teutscherová *et al.*, 2021). Basado en las observaciones en terreno de los productores que han adoptado esta modalidad, especulamos que un efecto similar puede ser obtenido en el área de estudio si se implementa el PR bajo un esquema de ganadería regenerativa del ecosistema, prácticamente se cuadruplica la carga e incrementa la biodegradación del pastizal.

En relación a la emisión de gases efectos invernaderos, la ganadería regenerativa tiene posibilidades potencialmente de neutralizar las emisiones si se regenera la funciones del suelo en el pastizal, incrementa el contenido de carbono orgánico total en el suelo (Mosier *et al.*, 2021; Shrestha *et al.*, 2020) y se regenera la función de fijación de carbono de los otros estratos del ecosistema. La comparación realizada en la etapa de terminación animal entre los engorde a corral y terminado a pasto cuando se integra los efectos sobre el suelo, muestran a la ganadería pastoril con posibilidad de tener efectos netos favorables (Stanley *et al.*, 2018). En el CBC, la funciones de fijación de carbono incrementaría la biomasa leñosa de 47 a 86 o 126 Mg ha⁻¹ sin incendios y con las intervenciones de restauración considerando las respuestas del estrato leñoso se alcanzan en un periodo de 45 años (de Prada *et al.*, 2018).

IV. Conclusiones

En este trabajo, se explora el potencial económico de la ganadería regenerativa para restaurar las funciones de ecosistemas naturales, particularmente la productividad primaria del estrato herbáceo del bosque de caldén mediante un modelo matemático de PLEM. Con el modelo, se maximizan los beneficios netos de gastos de operación (sanidad, reposición de reproductores, alimentación y suplementación, trabajo y comercialización) de la ganadería de cría bovina sujeto a las restricciones de tierra, capital, trabajo, y las restricciones técnicas del balance de alimentos. Se analizan cuatro variantes: el PC, PR I en la transición cuando se realiza la limpieza del pastizal envejecido y muerto, PR II con el cambio en la calidad y

cantidad de pastizal posterior a la transición y el PR Eco considerando las normas de producción orgánica.

El modelo de PLEM muestra apropiado para situaciones con datos limitados de terreno para identificar y cuantificar la brecha económica. Los resultados muestran un potencial económico y ambiental importante en la agricultura regenerativa en el bosque de caldén. La implementación del PR II triplica el flujo de bienes económicos cuando se lo compara con el PC. Inclusive, en el periodo de transición, los beneficios netos PR I prácticamente se duplican. La mayor producción de bienes revaloriza el capital natural, triplica el valor de stock del recurso al tercer año, cuando se lo compara con el PC. En términos ambientales la renovación del estrato herbáceo mediante herbivoría reduce significativamente el riesgo de incendios; y mejora las funciones ecosistémicas del suelo.

Otro hallazgo importante del modelo es que identificamos las diferencias cualitativas en el capital de trabajo y la necesidad de trabajo adicional que requiere la implementación del PR, especialmente el periodo de transición PR I. El capital de trabajo, necesario para financiar el desfasaje entre los ingresos y los gastos operación, debido al incremento del stock animal y la suplementación es muy importante en el PR I, difiere cualitativamente del PC. También, la cantidad de trabajo requerida es cuatro veces mayor en el PR I que el trabajo generado en el PC. El trabajo tiene dos componentes: a) la cantidad de trabajo significativamente mayor, y b) el saber hacer un intangible que cambia drásticamente entre el PC y el PR, y de difícil cuantificación. De todos modos, cuantificados y reconocido su importancia el productor empresario puede iniciar el proceso de transición hacia el PR en pequeña escala para favorecer el aprendizaje y posteriormente escalarlo a todo el establecimiento. Además, los productores empresarios tienen organizaciones de experimentación agropecuaria y capacitación que pueden reducir significativamente este esfuerzo.

Estos hallazgos son importantes para la política pública comprometida con los ODS. Mediante la modelización y el ajuste del modelo a cada tipo de productor se puede evaluar y hallar propuestas en línea con los ODS *trabajo decente y crecimiento económico*, y *producción y consumo responsable* para los productores agropecuarios que usan el bosque nativo como recurso. La mayor producción de proteína de origen animal contribuye al ODS *hambre cero*. Y la herbivoría al reducir los materiales combustibles en el bosque reduce el

riesgo de los incendios, que se encuadra con los ODS *acción por el clima*, y *vida en los ecosistemas terrestres*.

Aunque los resultados son consistentes con los hallados por otros autores es importante alertar al lector sobre ciertas limitaciones. En primer lugar, el estudio aborda un problema complejo de un ecosistema degradado y se centra en unas de las funciones del ecosistema producción primaria neta del pastizal y en una dimensión la económica aprovechando un solo producto alimentos para ganadería bovina de cría. En segundo lugar, estos ecosistemas tienen un clima templado con estación seca con variaciones muy importante en las precipitaciones y la producción del pastizal. En este trabajo, hemos asumido un valor promedio de biomasa que identifica el potencial, pero adaptar la carga animal para proteger el suelo, la comunidad vegetal y mantener el bienestar de los animales es un desafío importante para la ganadería en general y más para la regenerativa que incrementa la cantidad de animales. El modelo PLEM se desarrolla usando los valores medios anuales del estrato herbáceo y de los requerimientos nutricionales de la vaca de cría sin considerar las diferencias en calidad y digestibilidad de la dieta durante ciclo: vaca-gestación y vaca-crianza y las posibles respuestas de cada parcela al momento de intervención. Por lo tanto, los resultados deben ser considerado con precaución previa cualquier extrapolación. Estas limitaciones son parte de la agenda de investigación futura.

V. Bibliografía

- Adema, E. O., Babinec, F. J., Buschiazzo, M. J. M., y Peinemann, N. (2003). *Erosión hídrica en los suelos del Caldenal*. In (pp. 34).
- Aello, M. S. (2014). Índice de conversión alimentación en la cría vacuna: Factores que lo afectan. In UIB (Ed.), *Nutrición animal aplicada* (pp. 105-119): EEA Balcarce del INTA y Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP.
- AGENCERT. (2018). *Manual de normas de producción orgánica*. Buenos Aires, Argentina: AGENCERT SA.
- Anomale, V., Cola, J., y Macor, L. (2019). *Aumento de la receptividad del pastizal natural en la ecoregión de El Caldenal*. Paper presented at the 42 Congreso argentino de producción animal, Bahía Blanca, Argentina.
- Arzubi, A., Vidal, R., y Moraes, J. (2020). *Resultados económicos ganaderos. Informe Trimestral N°33 / marzo 2020*. Recuperado de CABA, Argentina
- Arzubi, A., Vidal, R., y Moraes, J. (2021). *Resultados económicos ganaderos. Informe Trimestral N°37 / marzo 2021*. Recuperado de CABA, Argentina
- Bacha, E. F., Privitello, M. J. L., Gabutti, E. G., Cozzarin, G. I., Ruiz, M. O., Vetore, O. S., y Garbulsky, M. (2013). Gradiente de pastoreo bovino desde la aguada según la permanencia animal en Digitaria Eriantha diferida. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa*, 22(Suplemento 2 Tomo I), 9-15.
- Bermúdez Colina, Y. (2011). Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, II(7), 85-104.

- BID-PID 013/2009-2015. (2014, 2014). SIG "Bases ambientales para el ordenamiento territorial rural de la provincia de Córdoba. Recuperado de <http://www.ordenamientoterritorialcba.com/web3/>
- Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., y Weimer, D. L. (2018). *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice* (5 ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Chiba, L. I. (2009). Section 14. Beef cattle nutrition and feed. In *Animal nutrition handbook. Second revision* (pp. 360-391).
- Coimbra, P. A. D., Machado Filho, L. C. P., y Hötzel, M. J. (2012). Effects of social dominance, water trough location and shade availability on drinking behaviour of cows on pasture. *Applied Animal Behaviour Science*, 139(3-4), 175-182.
- Cola, J., y Cola, F. (2019). Cría intensiva en el monte de caldén. *Revista CREA*, 459.
- CREA. (2017). Agroseries online. Retrieved 30-8-2021, from Consorcio Regionales de Experimentación Agropecuaria <http://intranet.aacrea.org.ar/series/confirmacion/login.php>
- de Prada, J. D., Plevich, J. O., Tello, D. S., Utello, M., Gil, H. A., Fiandino, S., Cisneros, J. M., Tarico, J. C., y Cantero, A. (2018). *Planificación territorial y valorización del bosque en el corredor biogeográfico del caldén, Córdoba, Argentina*. Paper presented at the XLIX Reunión Anual de la AAEA, Santa Fe, Argentina. Trabajo de investigación. retrieved from
- Derner, J. D., Augustine, D. J., Briske, D. D., Wilmer, H., Porensky, L. M., Fernández-Giménez, M. E., Peck, D. E., y Ritten, J. P. (2021). Can Collaborative Adaptive Management Improve Cattle Production in Multipaddock Grazing Systems? *Rangeland Ecology & Management*, 75, 1-8.
- Durham, T. C., y Mizik, T. (2021). Comparative Economics of Conventional, Organic, and Alternative Agricultural Production Systems. *Economies*, 9(2).
- FAO, y PNUMA. (2020). *El estado de los bosques del mundo. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. Rome, Italy: FAO and UNEP.
- Fernández, M. I., y Woodward, B. W. (1999). Comparison of conventional and organic beef production systems I. feedlot performance and production costs. *Livestock Production Science*, 61(2), 213-223.
- Fernández, O. A., Gil, M. E., y Distel, R. A. (2009). The challenge of rangeland degradation in a temperate semiarid region of Argentina: The Caldenal. *Land Degradation & Development*, 20(4), 431-440.
- Gabutti, E. G., Privitello, J. L., Maidana, M. A., y Harrison, R. U. (1999). Producción anual del pastizal natural del bosque de caldén (*Prosopis caldenia burk.*) de la provincia de San Luis, Argentina. *Arch. Latinoam. Prod. Anim.*, 7(1), 1-8.
- Guevara Viera, R., Guevara Viera, G., y Curbelo Rodríguez, L. (2003). Pastoreo racional Voisin para la producción bovina sostenible (artículo reseña, primera parte). *Revista de Producción Animal*, 15.
- Hawkings, H.-J. (2017). A global assessment of holistic planned grazing™ compared with season-long, continuous grazing: meta-analysis findings. *Agrican Journal of Range & Forage Science*, 34(2), 65-75.
- Holechek, J. L., Gomes, H., Molinar, F., Galt, D., y Valdez, R. (2000). Short-duration grazing: The facts in 1999. *Rangelands*, 22(1), 18-22.
- INTA. (2011). *Costos de producción y márgenes brutos de los principales productos agropecuarios de la Provincia de San Luis, por regiones*. Recuperado de
- Irisarri, J. G., Derner, J. D., Ritten, J. P., y Peck, D. E. (2019). Beef production and net revenue variability from grazing systems on semiarid grasslands of North America. *Livestock Science*, 220, 93-99.
- Iturrioz, G. (2013). *Dinámica económica de la ganadería pampeana*. Recuperado de General Acha, La Pampa:

- Lal, R. (2020). Regenerative agriculture for food and climate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(5), 123A.
- MAYDS. (2020). *Informe del estado del ambiente 2019*. CABA, Argentina: Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Mosier, S., Apfelbaum, S., Byck, P., Calderon, F., Teague, R., Thompson, R., y Cotrufo, M. F. (2021). Adaptive multi-paddock grazing enhances soil carbon and nitrogen stocks and stabilization through mineral association in southeastern U.S. grazing lands. *Journal of Environmental Management*, 288, 112409.
- Nieto, M. I., Barrantes, O., Privitello, L., y Reiné, R. (2018). Greenhouse Gas Emissions from Beef Grazing Systems in Semi-Arid Rangelands of Central Argentina. *Sustainability*, 10(11).
- ODS, A. (2019). *Objetivos de desarrollo sostenible . Informe país 2018. Agenda 2030* - Recuperado de Buenos Aires,:
- Ojeda-Falcón, A. D., y Domínguez-Quintero, O. (2020). Pastoreo Racional Voisin, ruta agroecológica sustentable en suelos ácidos-arenosos de baja fertilidad natural. *Centro Agrícola*, 47, 41-53.
- Oliva, G., Ferrante, D., Cepeda, C., Humano, G., y Puig, S. (2021). Holistic versus continuous grazing in Patagonia: A station-scale case study of plant and animal production. *Rangeland Ecology & Management*, 74, 63-71.
- ONU. (2015). Objetivos del desarrollo sostenible. 17 objetivos para transformar el mundo. Recuperado de <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Park, J.-Y., Ale, S., Teague, W. R., y Jeong, J. (2017). Evaluating the ranch and watershed scale impacts of using traditional and adaptive multi-paddock grazing on runoff, sediment and nutrient losses in North Texas, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 240, 32-44.
- Plevich, J. O. (2017). *Estado de Avance: Propuestas preliminares para la elaboración del Plan Director de la Reserva Forestal Natural Ralicó*. Recuperado de Río Cuarto, Córdoba Argentina. :
- Pombo, D., Martínez Uncal, M. C., y Cases, F. (2020). Cartografía multitemporal de incendios forestales en el Parque Lihué Calel (La Pampa): integración de datos y técnicas. *Revista Cardinalis*, 14(1), 267-286.
- Rauber, R. B., Steinaker, D. F., Demaria, M. R., y Arroyo, D. N. (2014). Factores asociados a la invasión de pajas en bosques de la región semiárida central argentina. *Ecología austral*, 24(3), 320-326.
- Savory, A., y Butterfield, J. (1999). *Holistic management. A new framework for decision making* (2 ed.). Washington, D.C., : Island Press.
- Sawczuk, N. (2018). *La interacción planta-animal y su influencia sobre algunos parametros de degradación de un pastizal del distrito fitogeográfico del caldén*. (Dr IMRyD), Universidad Nacional de Bahía Blanca, Bahía Blanca, Argentina.
- SAyDS. (2007). *Primer inventario nacional de bosques nativos: Segunda etapa inventario de campo de la región espinal distritos Caldén y Ñandubay. Informe regional espinal segunda parte*. Recuperado de Buenos Aires, Argentina:
- Shrestha, B. M., Bork, E. W., Chang, S. X., Carlyle, C. N., Ma, Z., Döbert, T. F., Kaliaskar, D., y Boyce, M. S. (2020). Adaptive Multi-Paddock Grazing Lowers Soil Greenhouse Gas Emission Potential by Altering Extracellular Enzyme Activity. *Agronomy*, 10(11).
- Spratt, E., Jordan, J., Winsten, J., Huff, P., van Schaik, C., Jewett, J. G., Filbert, M., Luhman, J., Meier, E., y Paine, L. (2021). Accelerating regenerative grazing to tackle farm, environmental, and societal challenges in the upper Midwest. *Journal of Soil and Water Conservation*, 76(1), 15A-23A.
- Stanley, P. L., Rowntree, J. E., Beede, D. K., DeLonge, M. S., y Hamm, M. W. (2018). Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agricultural Systems*, 162, 249-258.

- Teague, R., Grant, B., y Wang, H.-H. (2015). Assessing optimal configurations of multi-paddock grazing strategies in tallgrass prairie using a simulation model. *Journal of Environmental Management*, 150, 262-273.
- Teague, W. R., Dowhower, S. L., Baker, S. A., Haile, N., DeLaune, P. B., y Conover, D. M. (2011). Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(3), 310-322.
- Tello, D., de Prada, J., y Cristeche, E. (2018a). Valoración económica del bosque de caldén en el sur de Córdoba, Argentina. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XXIV(3), 131-146.
- Tello, D. S., y de Prada, J. D. (2017). Análisis de alternativas de política para la conservación del bosque nativo de Caldén de Córdoba, Argentina. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 21(41), 9-23.
- Tello, D. S., de Prada, J. D., Gil, H. A., y Plevich, J. O. (2018b). *Tipificación de establecimientos agropecuarios en el corredor biogeográfico del caldén, Córdoba, Argentina*. Paper presented at the XLIX Reunión Anual de la AAEA, Santa Fe, Argentina. Comunicación tipo A retrieved from
- Teutscherová, N., Vázquez, E., Sotelo, M., Villegas, D., Velásquez, N., Baquero, D., Pulleman, M., y Arango, J. (2021). Intensive short-duration rotational grazing is associated with improved soil quality within one year after establishment in Colombia. *Applied Soil Ecology*, 159, 103835.
- UniRioTV. (2017). Córdoba Agroecológica 09: Establecimiento El Mate (Adelia María). www.youtube.com: Proyecto: "Evaluación de la sustentabilidad de establecimientos agroecológicos de Córdoba", .
- Utello, M. J., Fiandino, S. I., Tarico, J. C., Demaestri, M. A., y J, P. O. (2021). Aportes en la toma de decisiones para el manejo forestal con ganadería integrada del bosque de Prosopis caldenia del centro de Argentina. . *Revista Bosque*, 42(1), 23-32.
- Voisin, A. (1988). *Grass productivity. Introduction by Allan Savory* (C. T. M. Herriot, Trans.). Washington D.C. : Island press.