



**INSTITUTO
NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN
AGROPECUARIA**

URUGUAY



**INDICADORES DE
DESEMPEÑO
AMBIENTAL PARA
SISTEMAS
AGROPECUARIOS
DEL URUGUAY**

Noviembre, 2023

**SERIE
TÉCNICA**

266

INIA

INDICADORES DE DESEMPEÑO AMBIENTAL PARA SISTEMAS AGROPECUARIOS DEL URUGUAY

Editores: Fiorella Cazzuli¹
José Paruelo²

¹ Ing. Agr. (Mag, Mag, Dra). Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

² Ing. Agr. (MSc, PhD). Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

Título: INDICADORES DE DESEMPEÑO AMBIENTAL PARA SISTEMAS
AGROPECUARIOS DEL URUGUAY

Editores: Fiorella Cazzuli
José Paruelo

Serie Técnica N° 266

© 2023, INIA

<http://doi.org/10.35676/INIA/ST.266>

ISBN: 978-9974-38-449-6

e-ISBN: 978-9974-38-500-9

Depósito Legal: 383987/23

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA
Avda. Italia 6201, Edificio Los Guayabos, Parque Tecnológico del LATU, Montevideo,
Uruguay.
<http://www.inia.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Esta publicación no se
podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur S.R.L.
Cassinoni 1629/804 - Teléfono 2402 2010
Montevideo - Uruguay

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

Integración de la Junta Directiva

Ing. Agr. José Bónica - Presidente

Ing. Agr. Walter Baethgen - Vicepresidente



**Ministerio
de Ganadería,
Agricultura y Pesca**

Ing. Agr. Martín Gortari

Ing. Agr. Rafael Normey



Ing. Agr. Alejandro Henry

Ing. Agr. Diego Bonino



CONTENIDO

	Página
I. Desempeño ambiental de los sistemas agropecuarios	1
1. Sostenibilidad y servicios ecosistémicos	1
2. La sostenibilidad en el marco de las transiciones agroecológicas	3
3. Bibliografía	4
II. El uso de indicadores de desempeño ambiental-sostenibilidad y salud ambiental	5
1. El concepto de salud	5
2. Indicadores de desempeño ambiental	6
3. Diagnóstico y «terapias»	8
III. Conjunto de indicadores potencialmente aplicables	11
1. Introducción	11
2. Descripción de indicadores	14
IV. Ejemplo de aplicación de indicadores sinópticos a nivel predial y la creación de índices de desempeño ambiental	37
1. Introducción	37
2. Cálculo de indicadores y un índice de desempeño ambiental	37
3. Patrones general de los indicadores y el índice	39
4. Usos potenciales	42
5. Bibliografía	44
V. Desarrollo de un sistema de generación de buenas prácticas agrícolas	45
1. La idea de buenas prácticas agropecuarias en el marco de las transiciones agroecológicas	45
2. ¿Cómo acelerar los procesos de aprendizaje para la generación de BPA?	47
3. Relevancia del enfoque	48
4. Bibliografía	49

PRÓLOGO

Los temas ambientales han estado siempre en la agenda de investigación de INIA. Esto se volvió aún más explícito con la creación en 2006 del programa nacional de Producción y Sustentabilidad Ambiental. En la actualidad el programa pasó a ser un área transversal a los sistemas de producción, denominada «Área de recursos naturales, producción y ambiente».

Desde entonces se ha trabajado en el desempeño ambiental de todos los sistemas de producción. Este trabajo se llevó adelante a través de una constelación de proyectos de investigación muchos de los cuales incorporaron un fuerte componente de co-innovación. Estas actividades fueron ejecutadas en conjunto con otras instituciones a través de proyectos financiados principalmente por el Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA).

Rosas y Buonomo (2016) reseñaban algunos de los términos que describían los enfoques productivos que buscaban poner un énfasis explícito en el desempeño ambiental. Estos incluían, por ejemplo, la Agricultura Climáticamente inteligente, la Agricultura Orgánica, la Agricultura de Conservación, la Agroecología, la Intensificación Ecológica, la Intensificación Sostenible, los Sistemas Agrícolas Sostenibles, entre otros. A mediados de la segunda década de este siglo, la institucionalidad agropecuaria uruguaya decidió adoptar el enfoque de «Intensificación Sostenible» (IS). Según The Royal Society (2009), la IS es «aquella forma de produc-

ción donde se aumenta el rendimiento sin generar impactos ambientales adversos y sin aumentar la superficie cultivada».

INIA en consonancia con cambios institucionales y normativos (por ej. la Ley 19.7171) ha incorporado al diseño de su agenda la idea de Transiciones Agroecológicas (TAE). Se entiende por TAE a «los cambios en los sistemas de producción que los tornen más sostenibles que los que se busca reemplazar». En ese marco, INIA se vincula en 2022 al proyecto «Sistemas Agroecológicos y Resilientes en Uruguay – S.A.R.U.» en asociación estrecha con el MGAP y a partir de la financiación del Banco Mundial. Esta publicación se enmarca y aporta a ese proyecto.

Bibliografía

- Royal Society (Great Britain).** 2009. Reaping the Benefits: Science and the Sustainable Intensification of Global Agriculture. The Royal Society Policy Document 11/09, The Royal Society, London. Retrieved from https://royalsociety.org/~media/royal_society_content/policy/publications/2009/4294967719.pdf
- Rosas y Buonomo.** 2016. Marco conceptual para un desarrollo del sector agropecuario basado en la intensificación sostenible. En: Bervejillo, J.; Cayota, S.; Gómez Miller, R. (Ed.). Desafíos de la intensificación sostenible para la política pública. Convenio INIA-OPYPA/MGAP. Montevideo (UY): INIA. pp. 33-49. (Serie Técnica, 227).

I. DESEMPEÑO AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS AGROPECUARIOS

José Paruelo¹, Fiorella Cazzuli²

1. SOSTENIBILIDAD Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Una cantidad de factores (normativos, legales, éticos, económicos, culturales) han determinado que el desempeño ambiental de la producción agropecuaria pase a ser un aspecto central de la planificación y gestión de los predios. El desempeño ambiental se vincula directamente con la sostenibilidad de las actividades rurales. La **sostenibilidad** se refiere a una meta, que es variable según el contexto y los valores de las partes interesadas. Más allá de las críticas que genera, la definición más extendida y aceptada de «sostenibilidad» fue acuñada en el Informe Brundtland en 1987. Según este informe, algo es sostenible si satisface las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras de satisfacer las suyas.

Considerar en términos absolutos si una práctica o sistema es o no sostenible no es

factible. Es prácticamente imposible definir a priori si el sistema a gestionar podrá satisfacer las necesidades (desconocidas) de las generaciones futuras. Una forma de hacer más operativa la idea de sostenibilidad es discutirla en términos comparativos o relativos: qué sistema es más sostenible según una serie de pautas predefinidas.

El diferencial de sustentabilidad se asocia a un cambio en la oferta de Servicios Ecosistémicos:

$$\Delta \text{Sostenibilidad} \approx \Delta \text{Oferta de Servicios Ecosistémicos}$$

Los **servicios ecosistémicos (SE)** se definen como los aspectos estructurales y funcionales de los ecosistemas de los que la sociedad obtiene beneficios. Los SE se pueden clasificar de distintas maneras. Una posibilidad es distinguir entre **SE finales** (aquellos que directamente generan beneficios para los humanos) y **SE intermedios** (los procesos ecosistémicos que a partir de los cuales se generan los SE finales).

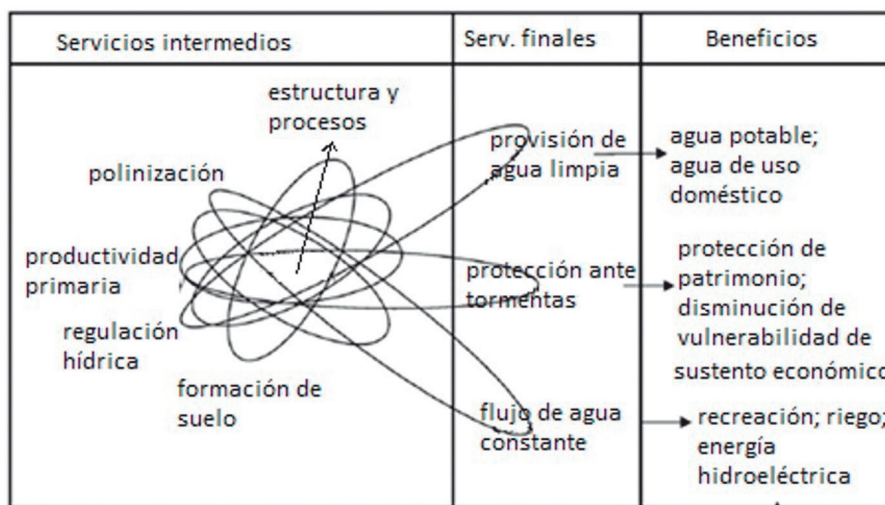


Figura 1. Esquema general de vínculo entre SE intermedios, finales y beneficios (modificado de Fisher et al., 2009).

En general requieren de otras formas de capital para concretar estos beneficios (por ejemplo energía hidroeléctrica requiere de construcción de infraestructura para generar la energía)

¹ Ing. Agr. (MSc, PhD). Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

² Ing. Agr. (Mag, Mag, Dra). Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

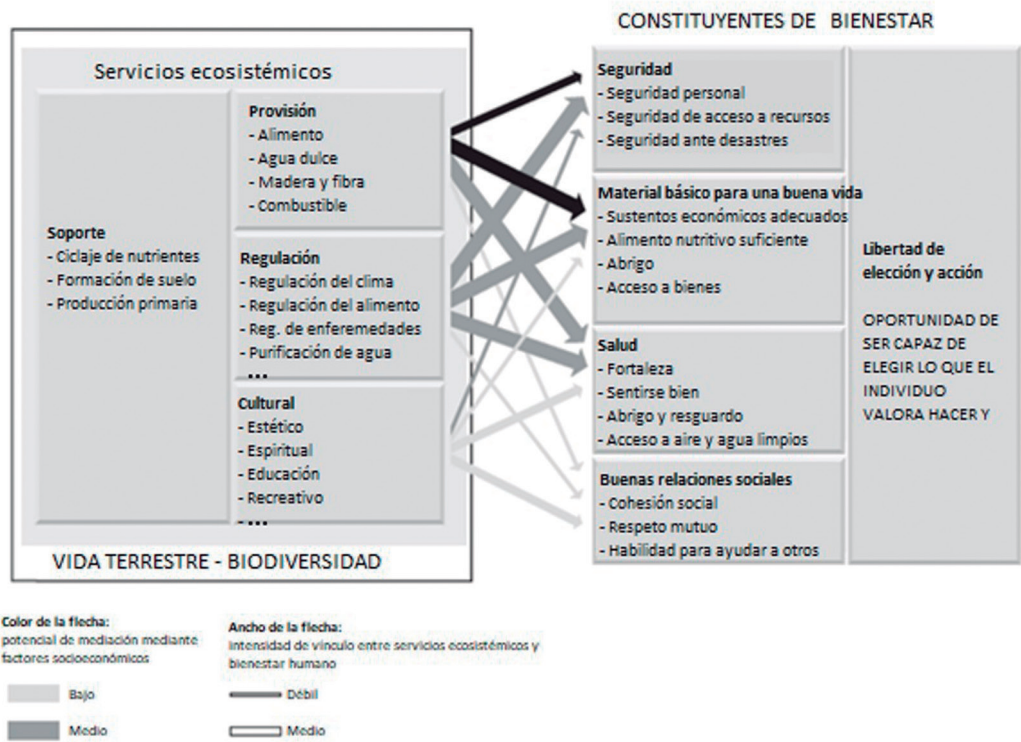


Figura 2. Clasificación de los SE propuesta por el Millenium Ecosystem Assessment (2006).

2

Otras definiciones consideran SE de Provisión, de Regulación, de Soporte y Culturales. El modelo en cascada acomoda todos estos conceptos en un esquema integrado y ayuda a identificar un aspecto crítico: la conexión entre los SE intermedios y los SE finales, que requiere la definición de funciones de producción. Un ejemplo familiar de

estas funciones de producción es la ecuación USLE/RUSLE para el cálculo del SE de control de la erosión.

La biodiversidad es un aspecto central en la caracterización de los SE. En ocasiones es considerada un SE final, pero, en la clasificación de Millenium Assessment es un SE

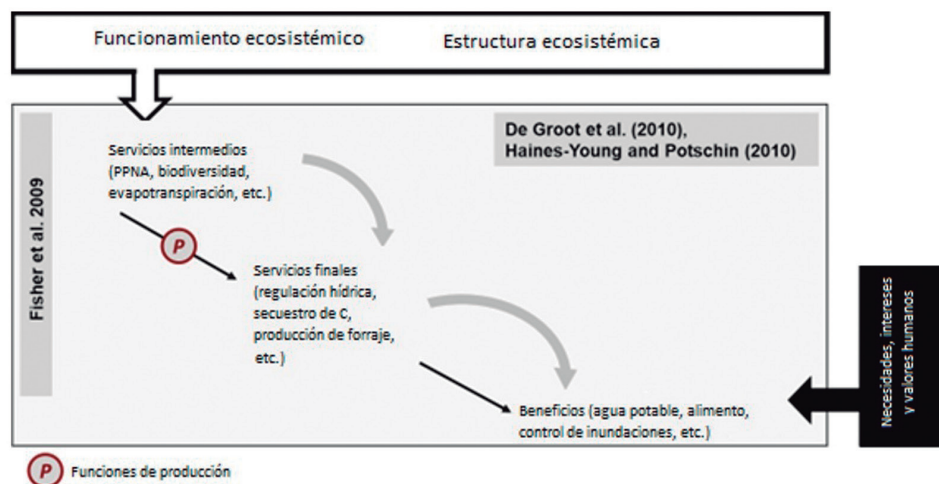


Figura 3. Integración de distintas definiciones de SE en el modelo de cascada (modificado de Paruelo y Laterra, 2019).

de soporte clave. De hecho, en el marco de las discusiones internacionales se distinguen habitualmente tres niveles en la biodiversidad:

- Genética o diversidad intraespecífica,
- Específica, y
- Ecosistémica.

Caracterizar la biodiversidad implica identificar y evaluar la importancia de las entidades biológicas (alelos de los genes, especies, tipos de ecosistemas) en varias dimensiones:

- Composición,
- Estructura, y
- Funcionamiento.

Si bien caracterizar la biodiversidad es clave dada su importancia como servicio ecosistémico de soporte o intermedio, esta tarea es virtualmente imposible. Incluso sin considerar aspectos de la estructura y funcionamiento del sistema, el número de elementos bióticos presente es enorme, y existe una fracción significativa de esos organismos que es operativamente imposible registrar y reconocer. Sin embargo, los impactos potenciales de prácticas o manejos sobre la biodiversidad pueden ser identificados sin tener una descripción completa de la misma. Los análisis pueden centrarse en los aspectos de la biodiversidad que se espera que sean afectados (o en los más relevantes, cuando se espera que varios aspectos sean impactados negativamente). Así, dependiendo de los impactos y del sistema a evaluar se pondrá énfasis en el nivel especies (por ejemplo, vegetales) evaluando su composición (lista de especies), su estructura (gramíneas, hierbas, arbustos y árboles) o su funcionamiento (especies primavera-estivales, otoño-invernales, anuales y perennes, fijadoras de N, etc.). La selección de los taxa (bacterias, hongos, anfibios, artrópodos totales o de suelo, aves, vegetales, etc.) a considerar está asociada a los procesos vinculados a los servicios ecosistémicos en los que se prioriza, pero también a cuestiones prácticas y logísticas (dificultades para el muestreo, costos, disponibilidad de personal entrenado en el reconocimiento de especies, etc.).

La caracterización a nivel de ecosistema implica identificar los tipos de ecosistemas

o agroecosistemas presentes y el área que ocupan. Los mapas de cobertura del suelo o de tipos funcionales de ecosistemas derivados de sensores remotos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son auxiliares clave para describir la diversidad a este nivel.

El estudio de la biodiversidad en cualquiera de sus dimensiones y para todos los niveles requiere considerar sus dos componentes:

- Riqueza, y
- Equitatividad.

La riqueza indica el número de clases distintas de ese nivel (por ejemplo, el número de especies de gramíneas presentes). La equitatividad se asocia a la proporción (número de individuos, cobertura o biomasa) en que cada entidad está presente. La diversidad resulta de combinar la riqueza y la equitatividad: un área será más diversa cuanto mayor sea la riqueza y la equitatividad.

2. LA SOSTENIBILIDAD EN EL MARCO DE LAS TRANSICIONES AGROECOLÓGICAS

A partir de la sanción de la Ley 19.717 por parte del Parlamento uruguayo en 2019, buena parte de las discusiones asociadas a la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuaria se vincularon con el concepto de **agroecología**. El término agroecología es un concepto polisémico cuyo alcance depende del contexto de utilización. La agroecología es alternativamente concebida como un movimiento social o político, una disciplina científica o como una práctica agronómica. Por un lado, se asocia al diseño de sistemas de producción agropecuaria más amigable desde el punto de vista social y ambiental. En la definición de estos sistemas suele haber un componente muy relacionado con valores ligados a prácticas ancestrales, al respeto a formas de producción tradicional, a perspectivas ideológicas, etc. Esta acepción representa una visión normativa o prescriptiva de la agroecología. Desde una óptica más estrecha, se agrupa bajo esta denominación tanto al estudio de patrones y procesos ecológicos en sistemas agropecuarios, como al uso de los conceptos ecológicos en la solución de

problemas agronómicos. En el primer caso, los estudios de manejo integrado de plagas, de competencia en policultivos, de efectos del pastoreo o de eficiencia tróficas ponen de manifiesto cómo los agroecosistemas permiten entender aspectos ecológicos básicos. En el segundo caso, los conceptos aportados por la ecología, en combinación con la agronomía, permiten diseñar prácticas y tecnologías que satisfacen distintos estándares en cuanto a una serie de aspectos asociados, entre otros, al nivel de aplicación de insumos (principalmente agroquímicos), a la preservación de la biodiversidad o a aspectos sociales (por ejemplo, adecuación a producciones familiares, de pueblos originarios o agricultura campesina). Todas estas acepciones del término agroecología describen entidades conceptuales valiosas e importantes, pero distintas.

Se entiende por «transiciones o trayectorias agroecológicas» los cambios en los sistemas de producción que los tornen más sostenibles que los que se busca reemplazar (García-Inza et al., 2023). El incremento de la sostenibilidad ambiental está asociado a un aumento de la oferta de servicios ecosistémicos (SE) de regulación y soporte. En tal sentido, resulta crítico evaluar la sostenibilidad ambiental de las prácticas agronómicas a considerar.

Para facilitar la determinación de un incremento en sostenibilidad, se deberían contemplar las siguientes 14 dimensiones:

1. Promover la diversidad específica aérea y subterránea.
2. Reducir las aplicaciones de productos sintéticos.
3. Mantener o restaurar áreas naturales o semi-naturales.
4. Proteger y usar eficientemente los recursos naturales y mantener y/o aumentar la oferta de servicios ecosistémicos.
5. Promover procesos y sistemas naturales, reciclar, reutilizar.
6. Promover la diversidad de hábitats.
7. Integrar prácticas a nivel del paisaje.
8. Asumir la perspectiva de una sola salud (ambiental, humana, vegetal, animal, del suelo, etc.).
9. Facilitar la participación y capacitación de los productores.
10. Potenciar el intercambio de saberes.
11. Promover el desarrollo rural y territorial.
12. Acercar la producción a los consumidores.
13. Cuidar la inocuidad de los alimentos.
14. Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Esta lista no es exhaustiva y puede ampliarse o reducirse en función de los contextos productivos, ambientales, institucionales, políticos, o culturales que se consideren. En todo caso, se utilizarán estas 14 dimensiones de aquí en más, para estandarizar las discusiones y temas que se presentarán más adelante.

Estos aspectos se corresponden (y expanden) con los 10 elementos de la agroecología que consensuó la FAO:

- Diversidad
- Creación conjunta e intercambio de conocimientos: las innovaciones agrícolas
- Sinergias
- Eficiencia
- Reciclaje
- Resiliencia
- Valores humanos y sociales
- Cultura y tradiciones alimentarias
- Gobernanza responsable
- Economía circular y solidaria

3. BIBLIOGRAFÍA

- Fisher, B.; Turner, R.K.; Morling, P.** 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3): 643–653.
- García Inza, G.; Paruelo, J.M.; Zoppolo, R. (eds.)** 2023. Aportes científicos y tecnológicos del INIA a las Trayectorias Agroecológicas. Buenos Aires: Editorial CICCUS. 528 pp.
- Millennium Ecosystem Assessment.** 2006. Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis. Island Press. Washington, DC, p.137.
- Paruelo, J.M. y Littera, P. (eds)** 2019. El lugar de la naturaleza en la toma de decisiones. Buenos Aires: Editorial CICCUS. 567 pp.

II. EL USO DE INDICADORES DE DESEMPEÑO AMBIENTAL- SOSTENIBILIDAD Y SALUD AMBIENTAL

José Paruelo¹

Como se señalaba en el capítulo anterior, la idea de desempeño ambiental busca caracterizar la sostenibilidad de los sistemas agropecuarios. Esa caracterización no es absoluta sino relativa a una situación de referencia, teórica, en el espacio (otras áreas) o en el tiempo (un área en el pasado o el futuro). En buena medida esta definición relativa evalúa la **sostenibilidad** como un cambio positivo en la oferta de **Servicios Ecosistémicos (SE)**. En general hay un «trade-off» o compromiso entre la oferta de SE de provisión y los de regulación y soporte (Figura 1). La capacidad de proveer servicios ha sido vinculada con la idea de salud del ecosistema. El concepto de salud del ecosistema guarda una estrecha relación con la idea de sostenibilidad. Un ecosistema saludable será estable y sostenible, manteniendo su organización y autonomía en el tiempo y su resiliencia

ante perturbaciones o factores que generen algún grado de estrés.

1. EL CONCEPTO DE SALUD

Un recurso cognitivo que permite capitalizar los avances realizados en otras áreas del conocimiento es la analogía. Una analogía es el proceso por el cual se transfiere información o significado de un objeto -o fuente- a otro objeto -o destino-. La analogía entre la salud humana y la salud ambiental -o falta de ellas en el caso de la degradación de los recursos- provee un marco muy útil para avanzar en una estimación más objetiva de los impactos ambientales de las actividades agropecuarias ya que en general estamos bastante familiarizados con el concepto de salud humana.

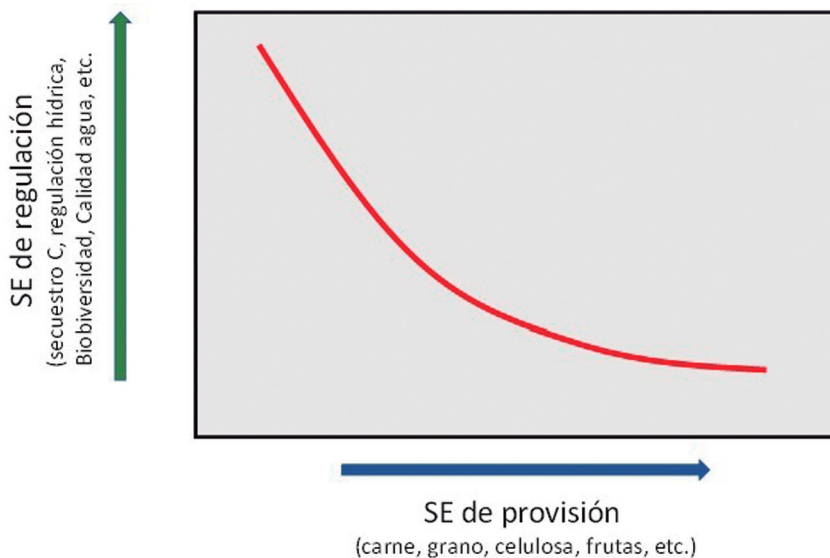


Figura 1. Relación hipotética entre la oferta de SE de provisión y de regulación.

¹ Ing. Agr. (MSc, PhD). Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

La salud humana es una construcción social. Su significado y definición específica dependen del conocimiento disponible, de valores, del contexto y de factores tecnológicos. La idea de salud se basa, frecuentemente, en la comparación con otras personas o con la misma persona en diferentes momentos. El concepto de salud no es estático, ha cambiado a lo largo del tiempo. Estos cambios estuvieron asociados a desarrollos tecnológicos (desde lentes a productos farmacológicos) pero también a cambios culturales.

Las comparaciones en las que se basa la definición de un estado saludable del cuerpo humano involucran el uso de indicadores tales como la temperatura corporal, la cantidad de colesterol en sangre o la concentración de glóbulos blancos. La información aportada por estos indicadores es objetiva, cuantitativa y repetible. Sin embargo, la caracterización de un individuo como saludable a partir de ellos no es automática. Estos indicadores se relacionan de manera no-lineal y los procesos o estados que caracterizan interaccionan entre sí. Dada una particular combinación de niveles de estos indicadores, la definición de salud tampoco es unívoca. Con todos estos indicadores el médico debe realizar una evaluación multidimensional. El diagnóstico debe necesariamente contemplar variables de contexto tales como la edad de la persona, una inspección física, sus hábitos, etc. Ignorar estos aspectos podría llevar al especialista a concluir que una persona de 80 años posee problemas de salud debido a que su corazón late más lento que el de un joven de 20 años o una persona con un análisis de laboratorio dentro de los parámetros frecuentes no tiene problemas, aunque haya sufrido la amputación de una pierna.

Al igual que la salud humana, la salud ecosistémica (o ambiental) es una construcción social que integrará los valores hegemónicos en una sociedad determinada. Su caracterización requiere, a su vez, comparar el estado actual con una situación de referencia. Esta situación de referencia puede ocurrir en el espacio (otros ecosistemas que se considere que no han sido modificados por humanos) o en el tiempo (el mismo ecosistema previo a la modificación). De la misma manera, la comparación se deberá realizar a partir de

indicadores que integren aspectos clave de los ecosistemas. Como en el caso de una persona, la falta de salud en el ecosistema está asociada a una modificación estructural o funcional. La definición de la salud de un ecosistema estaría ligada entonces a la evaluación del grado de alteración de la estructura y el funcionamiento. En este caso la salud estará ligada a la capacidad de proveer Servicios Ecosistémicos.

El concepto de salud se vincula estrechamente con la idea de aptitud. Un estado saludable hace a una persona -o un ecosistema- «apta» para desarrollar determinadas actividades (funciones) que eventualmente le reportarán beneficios (económicos, culturales, recreativos, etc.). Tanto en el caso de humanos como de ecosistemas, la idea de aptitud va ligada a un fin específico y a un manejo o entrenamiento previo. Un ecosistema o una persona serán aptos para determinada actividad agropecuaria o recreativa y no para otra. La condición de «apta» puede habilitar a una persona a desarrollar determinadas actividades y a un sistema productivo a cumplir un determinado estándar de calidad.

La idea de salud del ecosistema es claramente una metáfora. Como tal no se aplica a cualquier situación. Por ejemplo, hablar de salud del ecosistema no implica en modo alguno asumir que un ecosistema es un organismo. Algunos críticos de la idea de salud del ecosistema usaron este argumento para objetar el concepto. Sin embargo, no es necesario darle entidad de organismo al ecosistema para que el concepto sea útil. El funcionamiento de los ecosistemas se altera bajo stress y la idea de salud abre la posibilidad de una detección temprana de la disfuncionalidad.

2. INDICADORES DE DESEMPEÑO AMBIENTAL

Genéricamente, un indicador es un signo, medible u observable, que refleja una característica cuantitativa o cualitativa del sistema estudiado. Provee información clave para conocer algo y, frecuentemente, tomar una decisión. El indicador es un elemento de diagnóstico y no un fin en sí mismo. En

el caso del desempeño ambiental, la característica a reflejar es un proceso o aspecto estructural del agroecosistema relacionado con la capacidad del ecosistema de proveer uno o más servicios. En ocasiones usamos indicadores para evaluar el nivel de presión ejercido sobre el sistema. Dentro del proceso incluimos, por ejemplo, las emisiones netas de Gases con Efecto Invernadero (GEI). Algunos aspectos estructurales que interesa evaluar incluyen la biodiversidad de algún taxon particular o el reservorio de C orgánico del suelo. La presión ejercida sobre el sistema puede evaluarse mediante la carga toxicológica asociada al uso de agroquímicos. Como en el caso de la temperatura corporal o el número de glóbulos rojos para un individuo, los indicadores adquieren relevancia y capacidad de diagnóstico cuando se los analiza en conjunto y cuando se evalúa su cambio en el tiempo. En este punto es necesario disponer de una definición operativa, es decir, precisar las dimensiones del fenómeno a considerar de manera de permitir una cuantificación objetiva. Los aspectos a considerar dependerán, como se señalaba más arriba, del contexto sociopolítico. Lo crucial en un proceso como este es que los beneficios (y perjuicios) a considerar sean explícitos para que la sociedad los juzgue.

La evaluación del desempeño del ambiental de un sistema de producción busca entender qué está ocurriendo con los recursos naturales (RRNN), la oferta de Servicios Ecosistémicos y la biodiversidad. Caracterizar estos aspectos es clave para entender cuáles son los efectos de las prácticas que se desarrollan en los distintos sistemas de producción sobre los RRNN y el ambiente. Establecer la relación entre prácticas de manejo y gestión de los sistemas de producción y desempeño ambiental es la base del diseño de buenas prácticas para la promoción de transiciones agroecológicas y/o la transformación de los sistemas agroalimentarios. El uso de indicadores ambientales se ha extendido y la selección del conjunto específico a utilizar variará de acuerdo con el sistema considerado y a los objetivos específicos que se persiguen, o sea, en qué aspectos del desempeño ambiental se pone énfasis.

La naturaleza multidimensional del desempeño ambiental hace que, generalmente, se recurra a un conjunto de indicadores complementarios, capaces de capturar distintos aspectos funcionales o estructurales del agroecosistema. En ocasiones, uno o más indicadores pueden combinarse y constituir un **Índice**, o sea un conjunto agregado o ponderado de indicadores.

2.1. Características de un buen indicador de desempeño ambiental

Los indicadores de desempeño ambiental deben satisfacer una serie de criterios:

- Ser relevante, o sea, deben evaluar aspectos claves del desempeño ambiental.
- Tener una definición clara.
- Ser susceptibles de ser medidos y/o estimados mediante un protocolo claramente definido.
- Tener una adecuada sensibilidad a variaciones de la característica a evaluar, preferentemente con una respuesta lineal.
- Su medición debe ser simple y sin ambigüedades.
- El costo, en términos económicos y de tiempo, debe ser bajo.
- Su base conceptual y el sentido de los cambios debe ser fácilmente comunicable a distintos públicos.
- Debe ser capaz de diferenciar entre los ciclos o tendencias naturales y los inducidos por actividades humanas.

A esta lista (no necesariamente exhaustiva) deberían agregarse dos aspectos muy importantes: legitimidad y «auditabilidad».

La *legitimidad* deriva de dos aspectos. El primero es el técnico-científico. Las evidencias fácticas y la solidez conceptual de los indicadores es una condición necesaria para cualquier indicador. Sin embargo, esta no es suficiente si no cuenta con una legitimidad social y política. Es crítico el grado de acuerdo entre distintos actores para su uso. El nivel de sostenibilidad institucional en el cual se enmarca la decisión es clave en la construcción de la legitimidad. En tal sentido, en Uruguay buena parte

del éxito de los Planes de Uso y Manejo de Suelos se relaciona con el acuerdo logrado en torno a su evaluación (el modelo USLE-RUSLE).

La *auditabilidad* hace referencia a la posibilidad de que terceros involucrados puedan verificar los valores reportados. Eso se vincula con la solidez técnica pero también con transparencia en el registro y el nivel de participación en su legitimación e implementación.

3. DIAGNÓSTICO Y «TERAPIAS»

Los indicadores de salud (humana o ecosistémica) tienen como objetivo central el diagnóstico y el monitoreo. Sin embargo, la recopilación de casos (personas o establecimientos agropecuarios) habilita un proceso de mejora muy importante. La recopilación de gran cantidad de casos -cientos o miles- permite generar un experimento observacional que habilita:

- Describir la variabilidad de los valores de los distintos indicadores.
- Estudiar la correlación entre ellos.
- Explorar el compromiso («trade-off») entre los indicadores de salud y el desempeño. En el caso de establecimientos

agropecuarios esto es especialmente importante para el compromiso con el desempeño productivo y económico.

- Asociar niveles de los indicadores con valoración de la salud de la entidad (persona/establecimiento) en base a criterios asociados con el contexto, valores, conocimiento, demandas, etc.
- Asociar niveles de los indicadores con acciones de manejo/gestión/comportamiento

Si el diagnóstico está dado por el análisis y discusión de los indicadores, la terapia estaría dada por la aplicación de una serie de medidas que podemos llamar **Buenas Prácticas Agropecuarias (BPA)**, o sea el conjunto de actividades asociadas con la conservación o el incremento en la oferta de servicios ecosistémicos.

La figura 2 representa situaciones de «intensificación» (representadas por los puntos azules sobre la curva) para aumentar los SE de Provisión que redundan en una caída en la oferta de SE de regulación y/o soporte. La intensificación está asociada a distinto tipo de intervenciones o prácticas. Por ejemplo, el aumento de la carga ganadera, la aplicación de agroquímicos o los años de agricultura continua.

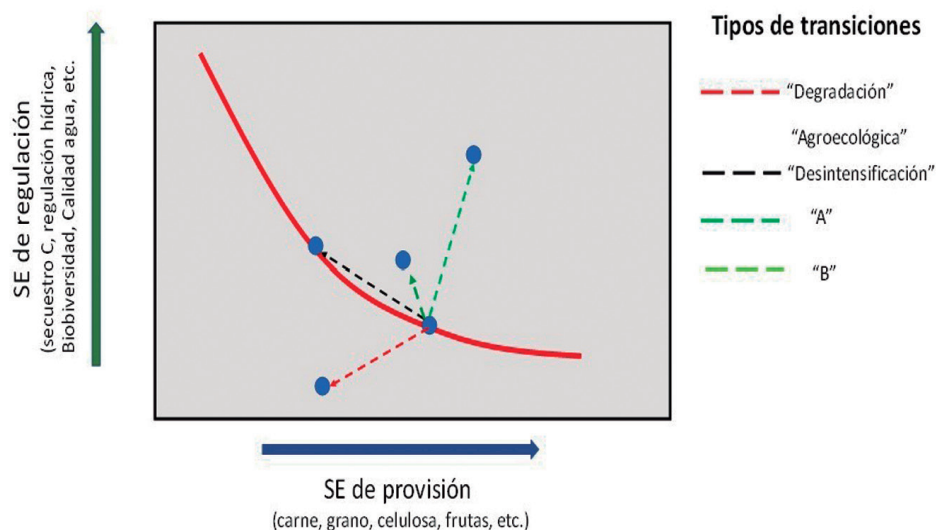


Figura 2. Posibles transiciones en un sistema y su efecto en sobre la oferta de SE de provisión y regulación.

Claramente la curva de la figura no es estática y puede ir cambiando con el tiempo. Una posibilidad es que, en un hipotético sistema, un manejo ganadero con altas cargas y una gestión deficiente de la oferta forrajera o la ausencia de una fase de pasturas en la rotación en sistemas agrícolas, genere una transición como la indicada en la figura con una flecha intermitente roja. En estas condiciones caen simultáneamente la oferta de SE de provisión (los rendimientos en carne o granos) y de SE de regulación (el control de la erosión, el secuestro de C o la biodiversidad). Llamamos a esta transición «degradación», tanto en su desempeño productivo como ambiental.

Una opción es la «desintensificación» (bajar demasiado la carga en un sistema

ganadero, por ejemplo) dentro del mismo planteo tecnológico (manteniendo la misma gestión de la base forrajera). Eso movería el sistema según lo que indica la flecha intermitente negra en la misma figura.

Las Transiciones Agroecológicas (TAE) implican un cambio en el planteo tecnológico -el tipo de prácticas que se llevan a cabo- de manera de mover al sistema según indican las flechas marcadas en verde. En este contexto, el paquete de prácticas agronómicas a implementar será «bueno» en tanto promuevan transiciones que desplacen los sistemas hacia situaciones en donde aumente la oferta de los SE de regulación y/o de provisión. Un adecuado conjunto de indicadores de desempeño ambiental permitirá evaluar el cambio en la oferta de SE (eje Y de la figura 2).

III. CONJUNTO DE INDICADORES POTENCIALMENTE APLICABLES

Carolina Leoni¹, Verónica Ciganda², Oscar Blumetto¹, Gabriel Ciappesoni³, Alejandro La Manna⁴, Andrés Quincke⁵, José Paruelo¹

1. INTRODUCCIÓN

Existe una demanda para evaluar los resultados de la aplicación de prácticas agronómicas que buscan promover trayectorias agroecológicas en distintos sistemas agropecuarios. Para ello es indispensable contar con una lista amplia de indicadores de desempeño ambiental que permita seleccionar la mejor combinación de ellos para cada situación particular. La lista que se propone en este capítulo es el resultado de varias instancias de intercambio dentro de INIA en primera instancia, y luego con otras instituciones en el marco de iniciativas específicas (como la Mesa de la Cebada y la Huella de la Ganadería). La lista preliminar fue discutida finalmente con quienes conforman las sectoriales Ganadera, Agrícola-ganadera, Lechera y Granjera de FUCREA.

Los indicadores que se presentan tienen una base conceptual y metodológica claramente establecida y evaluada, al menos en condiciones experimentales. Algunos de los indicadores incluidos son ampliamente usados, otros tienen menor difusión. Cada uno de los indicadores evalúa distintas dimensiones asociadas a transiciones ecológicas de las 14 listadas en el Capítulo II (Cuadro 1). En tal sentido la caracterización del desempeño ambiental basada en un indicador será necesariamente parcial. La integración de indicadores que evalúan distintos aspectos es clave para lograr una evaluación integral del desempeño ambiental.

La lista presentada en este capítulo refiere solo a indicadores de desempeño ambiental. Evidentemente las transiciones agroecológicas deben ser evaluadas también en aspectos sociales y económicos. Esto es evidente en el Cuadro 1 ya que los indicadores solamente evalúan algunas dimensiones asociadas a las TAE y no otras (dimensiones 9-12).

Para cada uno de los indicadores listados se indica el sistema productivo en el que son aplicables, una breve descripción del mismo, qué dimensiones asociadas a transiciones ecológicas evalúan, qué tipo de información se necesita para su estimación (provista por productores o técnicos), cada cuánto tiempo es necesario estimarlo y cuál es el grado de cobertura espacial de la observación.

Finalmente, se propone un «tipo» de predio en donde es recomendable su aplicación, lo que se desprende de las discusiones y talleres mantenidos entre INIA y FUCREA. Durante estas instancias, se generaron recomendaciones de uso basadas en la intensidad de recursos -tiempo y fondos- en donde los predios «comerciales» representan cualquier predio donde se quiera estimar cambios en la sostenibilidad, mientras que los «referentes» representan los predios que se prestarían a destinar mayores recursos. En los casos donde el «tipo» de predio sea «comercial» se sobreentiende que también incluye los referentes, pero no al revés.

¹Ing. Agr. (MSc, PhD). Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

²Ing. Agr. (MSc, PhD). Coordinadora del Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

³Ing. Agr. (PhD). Sistema Ganadero Extensivo - INIA.

⁴Ing. Agr. (MSc, PhD). Sistema Lechero - INIA

⁵Ing. Agr. (MSc, PhD). Sistema Agrícola-Ganadero - INIA.

2. DESCRIPCIÓN DE INDICADORES

2.1. Compactación y densidad aparente (#1: DAP)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: La compactación del suelo se asocia a la pérdida de estructura y de porosidad, a una mayor resistencia al crecimiento radicular y a una menor aireación del suelo. Puede ser evaluada mediante un «penetrómetro» que mide la resistencia a la penetración y permite detectar capas de compactación en el perfil cuando el suelo está a capacidad de campo en todo el perfil. También se evalúan los aspectos enunciados a partir de cambios en la densidad aparente, la relación entre el peso seco y el volumen de muestras de suelos tomadas a distintas profundidades.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Salud del suelo, flujo de agua, aireación.

Tipo de datos: Medición a campo (muestreo y análisis de suelo).

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/cuadro.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Muestreo u observación a campo.

Registros necesarios por parte del productor: -

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Arshad, M.A.; Lowery, B.; Grossman, B. 1997. Physical tests for monitoring soil quality. Methods for assessing soil quality, 49, pp.123-141.

2.2. Pérdida de suelo USLE/RUSLE (#2: ErSuelo)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, lechero.

Breve descripción: Estimación mediante modelos (USLE-RUSLE) de las pérdidas de suelo esperadas dadas las característi-

cas topográficas del potrero, la secuencia de cultivos y el manejo.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Pérdida de suelo, control de la erosión.

Tipo de datos: Secuencia de cultivos, datos edáficos. Modelo digital de elevación del terreno.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/chacra.

Registros/análisis a realizar por técnicos: -

Registros necesarios por parte del productor: Secuencia de cultivos.

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

García Préchac, F.; Clérici, C.; Hill, M. & Hill, E. 2005. EROSION Versión 5.0, Programa de Computación Para El Uso de La USLE/RUSLE En La Región Sur de La Cuenca Del Plata. Versión Operativa En Windows. DINAMA-UNDP.

2.3. Pérdida de P por escurrimiento y erosión (#3: P-index)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Evalúa el riesgo de pérdida de fósforo (P) por escurrimiento y erosión a cursos y cuerpos de agua superficiales. Contempla factores asociados a la fuente (P en suelo; dosis, momento, localización del fertilizante fosfatados) y al transporte (erosión + escurrimiento, distancia al cuerpo de agua).

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Riesgo de exportación de P por escurrimiento y erosión.

Tipo de datos: Registro de productores y simulación con modelos.

Periodicidad del registro: Anual o menor.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/cuadro/establecimiento.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Estimación de P en el estrato más superficial del perfil del suelo (0-2.5 cm). Variables para estimar erosión por medio del modelo USLE-RUSLE.

Registros necesarios por parte del productor:

Dosis, fuente, localización y fecha de aplicación de fertilizantes fosfatados.

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Sharpley, A.N.; Kleinman, P.J. & Weld, J.L. 2008. Environmental soil phosphorus indices. *Soil sampling and methods of analysis*, 141-159.

Sharpley, A.N.; Weld, J.L.; Beegle, D.B.; Kleinman, P.J.; Gburek, W.J.; Moore, P.A. & Mullins, G. 2003. Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(3):137-152.

2.4. Balance aparente de nutrientes (#4: BalNut)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Diferencia entre ingresos y salidas de nutrientes a nivel de predio a partir de registros de insumos (forrajes, suplementos, fertilizantes, etc.) y productos exportados (grano, leche, carne, forraje, etc.), sin contabilizar pérdidas. El BalNut puede servir para valorar y comparar la eficiencia de uso de nutrientes dentro y entre establecimientos. Puede representar un componente del riesgo que representa el establecimiento para la calidad del agua.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Uso de nutrientes en el sistema productivo. Exportación versus importación de nutrientes del sistema.

Tipo de datos: Registros de productores y datos de bibliografía (% de P y N en productos agrícolas).

Periodicidad del registro: Anual o por ciclo de cultivo.

Grado de cobertura espacial de la observación: Establecimiento.

Registros/análisis a realizar por técnicos: -

Registros necesarios por parte del productor: Registros de cantidades de N y P en fertilizantes aplicados anualmente en el

predio (kg P₂O₅ y N por año), de otras entradas (ej. forrajes, suplementos) y de cantidades de productos exportados.

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Öborn, I.; Edwards, A.C.; Witter, E.; Oenema, O.; Ivarsson, K.; Withers, P.J.A.; Nilsson, S.I. & Stinzing, A.R. 2003. Element balances as a tool for sustainable nutrient management: a critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. *European Journal of Agronomy*, 20(1-2): 211-225.

Hoang, V.N. & Alauddin, M. 2010. Assessing the eco-environmental performance of agricultural production in OECD countries: the use of nitrogen flows and balance. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 87, 353-368.

2.5. Acidez del suelo (#5: pH)

Aplicable en sistemas: agrícola, granjero, lechero.

Breve descripción: La acidez o el pH del suelo es una medida de la actividad de hidrogeniones (H⁺). En condiciones naturales, el pH del suelo depende de los factores de formación del suelo, por ejemplo, el material parental, el régimen hídrico, condiciones de meteorización, etc. El uso y manejo del suelo implica un proceso de acidificación, especialmente asociado al uso de fertilizantes amoniacales (urea, fosfato de amonio, UAN, etc.) y la extracción neta de bases. Si bien la acidez del suelo puede tener impactos directos y agudos sobre el crecimiento y desarrollo radicular, los impactos más comunes sobre los cultivos ocurren a través de los efectos del pH sobre la disponibilidad y toxicidad de nutrientes. En conclusión, el pH del suelo es un buen indicador para valorar la pérdida de fertilidad del suelo asociada al proceso de acidificación.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Salud del suelo, productividad, acidificación.

Tipo de datos: Medición a campo (muestreo y análisis en laboratorio de «pH en agua»).

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/cuadro.

Registros/análisis a realizar por técnicos: -

Registros necesarios por parte del productor:
Fecha de muestreo, profundidad muestreada.

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, 5, 475-490.

2.6. Potencial de mineralización de nitrógeno (#6: PMN)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: El potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) indica la capacidad del suelo para mineralizar el nitrógeno presente en la materia orgánica. La determinación se realiza mediante una incubación de 7 días en condiciones de anaerobiosis a partir de suelo previamente tamizado. El indicador se correlaciona positivamente con la fracción fácilmente mineralizable de la materia orgánica del suelo y con su capacidad de aporte de N.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado:
Ciclaje de nutrientes / salud suelo (al considerar las 4 mediciones: ResSue - ProtSue - Clab - IPSue se tiene una buena estimación de la salud del suelo).

Tipo de datos: Muestreo de suelo y determinación en laboratorio.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/cuadro.

Registros/análisis a realizar por técnicos:
Georeferencia del punto de muestreo, muestreo, determinación en laboratorio.

Registros necesarios por parte del productor:
-

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Waring, S.A. & Bremner, J.M. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature*, 201(4922): 951-952.

2.7. Índice de proteína del suelo (#7: ProtSue)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Indica la fracción de la materia orgánica (MO) del suelo que corresponde a proteínas. Estima el pool de N orgánico del suelo fácilmente mineralizable por microorganismos y luego disponible para las plantas. El contenido de proteínas es un indicador de la salud biológica y química del suelo.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado:
Ciclaje de nutrientes / salud del suelo (al considerar las 3-4 mediciones: ResSue - ProtSue - Clab - IPSue se tiene una buena estimación de la salud del suelo).

Tipo de datos: Determinación en laboratorio.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/cuadro.

Registros/análisis a realizar por técnicos:
Georeferencia del punto de muestreo, muestreo, determinación en laboratorio.

Registros necesarios por parte del productor: Fecha muestreo suelo e historia del suelo.

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Schindelbeck, R.R.; Moebius-Clune, B.N.; Moebius-Clune, D.J.; Kurtz, K.S. & van Es, H.M. 2016. Cornell University comprehensive assessment of soil health laboratory standard operating procedures. *Cornell Univ., Ithaca, NY*.

2.8. Eficiencia en el uso de N (#8: EUN)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: La eficiencia en el uso del nitrógeno mide la relación entre la productividad (ganancias de carbono, grano, carne, leche, etc.) por unidad de N. La eficiencia puede ser calculada no sólo para los volúmenes físicos de distintos productos sino también para distintos flujos de N (aplicado, aplicado + mineralización, consumido, etc.). La eficiencia en el uso del N asume una enorme importancia debido al impacto económico de una baja eficiencia dado el costo de los fertilizantes y a los impactos ambientales. Con una baja eficiencia en el uso del N se asocia el aumento de las concentraciones de nitratos en cuerpos y cursos de agua y en acuíferos. Hay al menos dos formas en las que una planta puede maximizar la biomasa ganada por unidad de nutriente: a través de una alta productividad de nutrientes -es decir, una alta tasa instantánea de absorción de C por unidad de nutriente-, y a través de un mayor tiempo de residencia -es decir, el tiempo medio que el nutriente permanece en la planta. Esto es importante para derivar métricas o indicadores de eficiencia.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Eficiencia en el uso de los recursos.

Tipo de datos: Dado que pueden definirse distintas eficiencias (distintas métricas en el numerador y denominador de la relación) los datos pueden variar. Una aproximación al cálculo se basa en el cociente entre un descriptor de la producción (biomasa acumulada, producción de grano, litros de leche) y el aporte de N (fertilización).

Periodicidad del registro: Anual o por ciclo de cultivo.

Grado de cobertura espacial de la observación: Dependiendo de los datos colectados, cuadro, chacra o establecimiento.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Determinación de N disponible en el suelo (nitratos, amonio).

Registros necesarios por parte del productor: Producción física, fecha, dosis y fuente de aplicación de fertilizantes.

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Congreves, K.A.; Otchere, O.; Ferland, D.; Farzadfar, S.; Williams, S. & Arcand, M.M. 2021. Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. *Frontiers in Plant Science*, 12, 637108.

2.9. Carbono orgánico en el suelo (#9: COS)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Cantidad total de carbono orgánico en el suelo diferenciando las distintas fracciones; Materia Orgánica Particulada (POM, por sus siglas en inglés) y Materia Orgánica Asociada a la fracción Mineral (MAOM, por sus siglas en inglés) a distintas profundidades. La evaluación suele completarse hasta 80 cm de profundidad.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Secuestro de C - fertilidad potencial - mejora características físicas del suelo,

Tipo de datos: a) medición a campo; b) modelos de simulación; c) índices sinópticos en base a sensores remotos.

Periodicidad del registro: Trienal.

Grado de cobertura espacial de la observación: a) potrero/cuadro/establecimiento, b) y c) potrero/establecimiento/cuenca.

Registros/análisis a realizar por técnicos: a) Obtención de muestras de suelo a campo, diferenciando estratos u horizontes y determinaciones de laboratorio; b) y c) Simulaciones usando modelos biogeoquímicos (por ej. Century, Daycent) y procesamiento de imágenes satelitales.

Registros necesarios por parte del productor: Secuencias de cultivos y usos del suelo, datos de textura del suelo derivados de

muestreos a campo o mapas de suelos, polígonos unidades de manejo (potreros, chacras, establecimiento).

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Baethgen, W.E.; Parton, W.J.; Rubio, V.; Kelly, R.H. & Lutz, S.M. 2021. Ecosystem dynamics of crop–pasture rotations in a fifty year field experiment in southern South America: Century model and field results. *Soil Science Society of America Journal*, 85(2): 423-437.

Baldassini, P.; Baethgen, W.E.; Camba, G.; Quincke, A.; Pravia, V.; Terra, J.A.; Macedo, I.; Piñeiro, G. & Paruelo, J. 2023. Carbon Stocks and Potential Sequestration of Uruguayan Soils. A Road Map to a Comprehensive Characterization of Temporal and Spatial Changes to Assess Carbon Footprint. <https://doi.org/10.31219/osf.io/3buqs>

Pravia, M.V.; Kemanian, A.R.; Terra, J.A.; Shi, Y.; Macedo, I. & Goslee, S. 2019. Soil carbon saturation, productivity, and carbon and nitrogen cycling in crop-pasture rotations. *Agricultural Systems*, 171, 13-22.

2.10. Carbono lábil (carbono activo, carbono potencialmente oxidable (#10: CLab))

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Indica la porción de materia orgánica (MO) del suelo fácilmente disponible para los microorganismos como alimento y fuente de energía. Indica la viabilidad de una trama trófica saludable. Positivamente correlacionado con el porcentaje de MO del suelo, con la estabilidad de los agregados y con medidas de actividad biológica (ej: ResSue) y biomasa microbiana.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Ciclaje de nutrientes / salud suelo (al considerar las 3-4 mediciones: ResSue - ProtSue - Clab - IPSue se tiene una buena estimación de la salud del suelo).

Tipo de datos: Determinación en laboratorio.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/chacra/cuadro.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Georeferencia del punto de muestreo, muestreo, determinación en laboratorio.

Registros necesarios por parte del productor: Fecha muestreo suelo y uso del suelo.

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Schindelbeck, R.R.; Moebius-Clune, B.N.; Moebius-Clune, D.J.; Kurtz, K.S. & van Es, H.M. 2016. Cornell University comprehensive assessment of soil health laboratory standard operating procedures. *Cornell Univ., Ithaca, NY*.

2.11. Respiración del suelo (#11: ResSue)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: La respiración es una medida de la actividad metabólica de las comunidades microbianas del suelo, integra abundancia y actividad. Se mide mediante la captura y cuantificación de dióxido de carbono (CO₂) liberado de la muestra de suelo re-humedecida (suelo de 0-15 cm previamente secado a temperatura ambiente) en un frasco hermético durante 4 días.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Ciclaje de nutrientes / salud suelo (al considerar las 4 mediciones: ResSue - ProtSue - Clab - IPSue se tiene una buena estimación de la salud del suelo).

Tipo de datos: Determinación en laboratorio.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/chacra/cuadro.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Georeferencia del punto de muestreo, muestreo, determinación en laboratorio.

Registros necesarios por parte del productor: Fecha muestreo de suelo e historia de uso del suelo.

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Schindelbeck, R.R.; Moebius-Clune, B.N.; Moebius-Clune, D.J.; Kurtz, K.S. & van Es, H.M. 2016. Cornell University comprehensive assessment of soil health laboratory standard operating procedures. *Cornell Univ., Ithaca, NY.*

2.12. C potencialmente acumulable (#12: CpAc)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Es cuantificado estimando el aporte de carbono aéreo y subterráneo de cultivos y recursos forrajeros perennes. El aporte de C se calcula como la suma del C aéreo (rastrajo, broza) y subterráneo (raíces y exudados). Para el C aéreo de cultivos se considera el C asociado a la producción primaria neta aérea (PPNA) sin incluir lo que se exporta del sistema en los granos cosechados (Índice de cosecha, IC). Para el aporte de C subterráneo, se considera al carbono asociado a la PPN subterránea (obtenida aplicando la relación biomasa subterránea/biomasa aérea) y al aporte de exudados de raíces como una proporción de 0,65 del C total de raíces. Para los recursos forrajeros perennes, se considera que la biomasa de raíces sobrevive varios ciclos, por lo tanto, el aporte de C subterráneo incluirá sólo el componente de exudados de raíces. En cambio, en el aporte de C aéreo se considera a la PPNA sin incluir al consumo animal y el aporte de excretas animales, calculadas como el consumo animal por el complemento de la digestibilidad. Se utilizará la PPNA derivada de estimaciones basadas en sensores remotos y los parámetros de proporción de biomasa aérea (Baéreo) y subterránea (Bsub), IC de cada cobertura se obtendrán del trabajo de Berhongaray y Álvarez (2020) quienes recopilaron datos actualizados para el área de estudio.

Cultivos = $(C \times PPNA \times (1 - IC)) + (C \times PPNA \times B_{sub}/Baéreo) \times 1,65$

Recursos forrajeros = $(C \times PPNA \times (1 - Consumo animal)) + (consumo animal \times (1 - digestibilidad)) + (C \times PPNA \times B_{sub}/Baéreo) \times 0,65$

(En donde C es la proporción de carbono presente en la biomasa)

Proceso/servicio ecosistémico evaluado:

Cantidad de C que potencialmente podría ser incorporado al COS. Cuantifica el potencial de secuestro de C.

Tipo de datos: Datos de PPNA derivados de imágenes, Índice de cosecha de distintos cultivos, partición biomasa aérea y subterránea, digestibilidad de recursos forrajeros (RRFF).

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/chacra/cuadro.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Obtención de datos de sensores remotos, mapas e interpretación.

Registros necesarios por parte del productor:
=

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Berhongaray, G.; Álvarez, R. 2020. Aportes de carbono sub-superficiales de distintos cultivos y rotaciones. XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Corrientes, Provincia de Corrientes, Argentina. 13 al 16 de Octubre de 2020.

Bolinder, M.; Janzen, H.; Gregorich, E.; Angers, D. & Vanden Bygaart, A. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1-4): 29-42.

2.13. Stocks y emisiones netas COS (#13: dStockC)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Mediciones repetidas o simulaciones de carbono orgánico del suelo (COS) en el tiempo con las aproximaciones indicadas en el indicador COS.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Emisiones de GEI, Balance C/Huella de C.

Tipo de datos: Muestreos de suelo a distintas profundidades (0-30 cm). Para las simulaciones, datos climáticos, propiedades físicas del suelo, stocks de COS iniciales y secuencia de uso.

Periodicidad del registro: Quinquenal.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/chacra/cuadro.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Obtención de datos de sensores remotos, mapas e interpretación.

Registros necesarios por parte del productor: -

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Para Century (con calibraciones locales):

Baethgen, W.E.; Parton, W.J.; Rubio, V.; Kelly, R.H. & Lutz, S.M. 2021. Ecosystem dynamics of crop–pasture rotations in a fifty year field experiment in southern South America: Century model and field results. *Soil Science Society of America Journal*, 85(2): 423-437.

Piñeiro, G.; Paruelo, J. M. & Oesterheld, M. 2006. Potential long term impacts of livestock introduction on carbon and nitrogen cycling in grasslands of Southern South America. *Global Change Biology*, 12(7): 1267-1284.

2.14. Emisiones de metano (#14: ECH4)

Aplicable en sistemas: ganadero, lechero.

Breve descripción: Emisiones absolutas del gas CH₄ producto de la fermentación ruminal en bovinos, ovinos, etc. Intensidad de emisiones: CH₄ emitido por kg materia seca (MS) consumida, o por kg de producto (kg de peso vivo (PV), kg de ganancia media diaria (gmd), kg carne producida, kg lana, litros de leche, etc.).

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Emisiones de GEI.

Tipo de datos: Estimados mediante ecuaciones IPCC

Fuente	Ecuación
Ec. 10.21 - Factor de emisión CH ₄ para fermentación entérica (+)	$EF = [((GE * ((Ym / 100) * 365)) / 55,65)]$
Ec. 10.23 - Factor de emisión CH ₄ de la gestión del estiércol (+)	$EF_{(T)} = ((VS_{(T)} * 365) * (Bo_{(T)} * 0,67 * (Suma(MCF_{(S,k)} / 100) * MS_{(T,S,k)}))$
Ec. 10.24 - Tasa de Excreción de Sólidos Volátiles (+)	$VS = (GE * ((1 - (DE\% / 100)) + (UE * GE)) * ((1 - ASH) / 18,45))$

(+) IPCC, 2006.

Ecuación 10.21. EF = factor de emisión, kg CH₄ cabeza⁻¹ año⁻¹; GE = consumo de energía bruta, MJ cabeza⁻¹ año⁻¹; Ym = factor de conversión de metano, porcentaje de la energía bruta convertida en metano; el factor 55,65 (MJ/kg CH₄) es la energía contenida en el metano.

Ecuación 10.23. EF(T) = factor de emisión anual de metano por categoría (T), kg CH₄ animal⁻¹ año⁻¹; VS(T) = sólidos volátiles excretados diariamente por categoría (T), kg materia seca animal⁻¹ año⁻¹; 365 = base de cálculo de la producción de sólidos volátiles anual, días año⁻¹; Bo(T) = capacidad máxima de producción de metano producido por categoría (T), m³ CH₄ animal⁻¹ kg⁻¹ de sólidos volátiles; 0,67 = factor de conversión de m³ CH₄ a kg de CH₄; MCFS,k = factor de conversión de metano para cada sistema de manejo del estiércol (S) por región climática (k), %; MST,S,k = fracción del estiércol de la categoría (T), manejado usando el sistema de gestión (S) en una región climatológica (k), sin unidad (sin dimensión).

Ecuación 10.24. VS = excreción de sólidos volátiles por día, basado en materia orgánica seca, kg VS día⁻¹; GE = energía bruta consumida, MJ día⁻¹; DE% = digestibilidad del alimento en por ciento (ej. 60%); (UE*GE) = energía urinaria expresada como fracción de la energía bruta. Normalmente, para la mayoría de los rumiantes 0,04GE puede ser considerada como la energía urinaria excretada (0,02 para rumiantes alimentados con 85% o más de granos en el alimento o para suinos); ASH = contenido de ceniza del estiércol, calculado como una fracción de la materia seca del consumo de alimento (ej. 0,08 para ganado), utilizar datos propios del país cuando estén disponibles; 18,45 = factor de conversión para la energía bruta de la dieta por kg de materia seca

(MJ kg⁻¹). Este valor es relativamente constante a través de un amplio rango de forrajes y alimentos basados en granos consumidos por el ganado.

Periodicidad del registro: Anual

Grado de cobertura espacial de la observación: Predio.

Registros/análisis a realizar por técnicos:

- Stock vacuno y ovino completo (raza, categorías, peso inicial y final, edades).
- Dieta Animal (tipo de pastura y proporción: campo natural, campo natural mejorado, pastura implantada; voluminoso, suplemento/concentrado).
- Composición química de la dieta: fibra detergente neutra (FDN), %Digestibilidad, %Proteína Cruda, %Cenizas.

Registros necesarios por parte del productor: ídem técnico.

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Eggleston, H.S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T. & Tanabe, K. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.

2.15. Emisiones de óxido nitroso (#15: EN2O)

Aplicable en sistemas: ganadero, lechero, agrícola.

Breve descripción: Emisiones del gas N₂O producto de la deposición del nitrógeno contenido en orina y heces de los animales o por la aplicación de N-fertilizante al suelo.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Emisiones de GEI.

Tipo de datos: Estimados por ecuaciones IPCC.

$$N_2O_{\text{Directas-N}} = \text{Suma}_i((F_{SN} + F_{ON}) * EF_{li} + (F_{CR} + F_{SOM}) * EF_1 + N_2O - N_{OS} + N_2O - N_{PRP})$$

FSN= cantidad anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N año⁻¹;

FON = cantidad anual de estiércol animal, compost, lodos cloacales y otros aportes de N aplicada a los suelos, kg N año⁻¹;

EF1= factor de emisión para emisiones de N₂O de aportes de N, kg N₂O-N (kg aporte de N)-1;

FCR= cantidad anual de N en los residuos agrícolas, incluye cultivos fijadores de N y la renovación de forraje/pastura, que se regresan a los suelos, kg N año⁻¹;

FSOM= cantidad anual de N en suelos minerales que se mineraliza, relacionada con la pérdida de C del suelo de la materia orgánica del suelo como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra, kg N año⁻¹;

N₂O-N_{OS}= emisiones directas anuales de N₂O-N de suelos orgánicos gestionados, kg N₂O-N año⁻¹;

N₂O-N_{PRP}= emisiones directas anuales de N₂O-N de aportes de orina y estiércol a tierras de pastoreo, kg N₂O-N año⁻¹.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Dependiendo de los datos colectados, cuadro/chacra o establecimiento.

Registros/análisis a realizar por técnicos:

- Stock vacuno y ovino completo (raza, categorías, peso, edades).
- Dieta Animal: a) tipo de pastura y proporción: campo natural, campo natural mejorado, pastura implantada; voluminoso, suplemento/concentrado; b) composición química de la pastura: % proteína cruda, % digestibilidad.

Fertilizantes nitrogenados utilizados: dosis (kg/ha), momento de aplicación, superficie de aplicación.

Registros necesarios por parte del productor: ídem técnico.

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial/referente.

Referencias:

Eggleston, H.S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T. & Tanabe, K. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.

2.16. Índice de patogenicidad del suelo (#16: IPSue)

Aplicable en sistemas: agrícola, granjero, lechero.

Breve descripción: Indica la potencialidad de un suelo de desarrollar o no epidemias. Se ha ajustado para enfermedades de implantación, por ejemplo: IPSue para alfalfa, IPSue para soja, IPSue para cebolla x *Fusarium*.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Regulación de enfermedades.

Tipo de datos: Determinación en laboratorio.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Chacra/cuadro.

Registros/análisis a realizar por técnicos:

Georeferencia del punto de muestreo, muestreo, determinación en laboratorio.

Registros necesarios por parte del productor:

Fecha muestreo suelo y uso del suelo.

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Altier, N.; Zerbino, M.S. 2012. Indicadores biológicos para evaluar los agroecosistemas. 4. Comunidades microbianas. Índice de patogenicidad del suelo: ejemplo para secuencias con leguminosas forrajeras. In: INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria); Programa Nacional Producción y Sustentabilidad Ambiental. Uso de la biodiversidad para la evaluación del impacto de la intensificación agrícola y el diseño de agroecosistemas sustentables. Las Brujas, Canelones (Uruguay): INIA. p.73-79 (INIA Serie Actividades de Difusión; 674).

Leoni, C.; De Vries, M. 2012. Indicadores biológicos para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas. 3. Comunidades microbianas. Índice de patogenicidad del suelo: ejemplo para secuencias hortícolas con aliáceas. In: INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria); Programa Nacional Producción y Sustentabilidad Ambiental. Uso de la biodiversidad para la evaluación del impacto de la intensificación agrícola y el diseño de agroecosistemas sustentables. Las Brujas, Canelones (Uruguay): INIA. p.66-72 (INIA Serie Actividades de Difusión; 674).

2.17. Carga de fitosanitarios (índice de cantidad y toxicidad) (#17 RIPEST)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: RIPEST (Riesgo de Pesticidas) es un enfoque basado en el rasgo que vincula la toxicidad de distintos pesticidas (herbicidas, insecticidas o fungicidas) con su dosis empleada para estimar un valor de riesgo ambiental. El enfoque de análisis utiliza un atributo de los pesticidas utilizados en un cultivo agrícola: su toxicidad. Este efecto es medido en Unidades de toxicidad (UT). El valor de UT indica la toxicidad de cada sustancia detectada analíticamente mediante el cálculo de su toxicidad para dos grupos de organismos: insectos y mamíferos. Esta estandarización es ventajosa en el caso de que deban compararse: i) una mezcla de pesticidas o, ii) lotes de muestreo con diferentes mezclas de pesticidas.

Para comparar la toxicidad de los pesticidas presentes en diferentes chacras o cuadros agrícolas, las UT pueden calcularse a partir de las dosis individuales utilizadas. El valor de UT para cada compuesto se basa en la LD 50 aguda (48 h) para mamíferos e insectos (mi):

$$UT_{mi} = Di / LD50_{i \text{ rat}} \quad UT_{ii} = Di / LD50_{i \text{ bee}}$$

Donde, UT mi y UT ii son las unidades tóxicas para mamíferos e insectos, Di es la dosis aplicada (gr de producto formulado/ha) del pesticida, LD50 i rat es la dosis letal aguda oral 50 para ratas (mg/k) del pesticida i, y LD50 i bee es la dosis letal aguda de contacto para abejas (lg /abeja) del pesticida.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Carga toxicológica.

Tipo de datos: Registro de productos y dosis.

Periodicidad del registro: Ciclo del cultivo.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/cuadro/establecimiento.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Análisis de planillas de registro y aplicación del modelo (RIPEST, EIQ).

Registros necesarios por parte del productor: Registro de aplicaciones: producto comercial, principio activo y concentración, dosis empleada, gasto en el cuadro, fecha de aplicación.

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Ferraro, D.O.; Duarte Vera, A.C.; Pessah, S. & Ghera, F. 2020. Environmental risk indicators for weed management: a case study of ecotoxicity assessment using fuzzy logic. *Decision Support Systems for Weed Management*, 191-210.

Ferraro, D.O.; Ghera, C.M. & Sznajder, G.A. 2003. Evaluation of environmental impact indicators using fuzzy logic to assess the mixed cropping systems of the Inland Pampa, Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 96(1-3): 1-18.

2.18. Porcentaje de hábitat naturales (pastizales naturales, humedales, montes) (#18: HabNat)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Cuantificar la proporción de pastizales naturales, bosques nativos y humedales por unidad cartográfica (potrero, establecimiento, cuenca). Indica de manera directa la preservación de ecosistemas y especies nativas en áreas agropecuarias. A su vez, es un indicador general del soporte que prestan los hábitats naturales.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Preservación de áreas naturales, conservación de especies.

Tipo de datos: Cartografías generales (por ej. Proyecto MapBiomás) y verificación de datos en el predio.

Periodicidad del registro: Anual. Podría ser mayor, por ejemplo, al inicio y final de un proyecto.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/cuadro o establecimiento.

Registros/análisis a realizar por técnicos:

Identificación y validación del polígono que corresponde a los límites del predio.

Registros necesarios por parte del productor:

-

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Baeza, S.; Vélez-Martin, E.; De Abelleira, D.; Bancho, S.; Gallego, F.; Schirmbeck, J.; Veron, S.; Vallejos, M.; Weber, E.; Oyarzabal, M.; Barbieri, A.; Petek, M.; Guerra Lara, M.; Sarrailhé, S.S.; Baldi, G.; Bagnato, C.; Bruzzone, L.; Ramos, S.; Hasenack, H. 2022. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomass Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>

2.19. Cobertura bosque nativo (#19: BQNat)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero

Breve descripción: Cuantificar la proporción de bosques nativos por unidad cartográfica (potrero, establecimiento, cuenca). Indica de manera directa la preservación de bosque nativo en áreas agropecuarias. A su vez, es un indicador general del soporte que prestan los hábitats naturales.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Preservación de Bosque nativo/reservación de cursos de agua en caso de bosques riparios.

Tipo de datos: Cartografías generales (por ej. Proyecto MapBiomass).

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Establecimiento.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Identificación y validación del polígono que corresponde a los límites del predio.

Registros necesarios por parte del productor:

-

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Baeza, S.; Vélez-Martin, E.; De Abelleira, D.; Bancho, S.; Gallego, F.; Schirmbeck, J.; Veron, S.; Vallejos, M.; Weber, E.; Oyarzabal, M.; Barbieri, A.; Petek, M.; Guerra Lara, M.; Sarrailhé, S.S.; Baldi, G.; Bagnato, C.; Bruzzone, L.; Ramos, S.; Hasenack, H. 2022. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomass Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>

2.20. Grado Conservación Monte nativo (#20: ConBQ)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Evalúa el estado del monte nativo en función de la composición de especies arbóreas, estructura de edades, presencia de especies exóticas invasoras, cobertura del dosel, presencia de plantas trepadoras y epífitas, estado del sotobosque y cobertura del suelo. Se realizan transectas de 100 metros dentro del bosque con un protocolo establecido.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Estado de conservación del bosque nativo.

Tipo de datos: Evaluación *in situ* con protocolo establecido.

Periodicidad del registro: Anual. Podría ser mayor, por ejemplo, al inicio y final de un proyecto.

Grado de cobertura espacial de la observación: Predio/ zonas dentro de predios.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Transectas de evaluación (tres por predio, se estima una jornada técnica).

Registros necesarios por parte del productor:

-

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Vaz, P. y Carbio, M. 2020. REDD+ Informe final PRODUCTO 5 – Estado de conservación del bosque.

2.21. Diversidad de tipos de cobertura (#21: DivTC)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Mide la diversidad (integrando tipos presentes y su proporción relativa) de las coberturas de uso del suelo a nivel predial, paisaje o cuenca, a través de un índice (por ej. índice de Shannon).

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Diversidad estructural a nivel de paisaje.

Tipo de datos: Cartografías generales (por ej. Proyecto MapBiomias).

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Establecimiento.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Identificación y validación del polígono que corresponde a los límites del predio.

Registros necesarios por parte del productor: -

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Baeza, S.; Vélez-Martin, E.; De Abelleira, D.; Bancho, S.; Gallego, F.; Schirmbeck, J.; Veron, S.; Vallejos, M.; Weber, E.; Oyarzabal, M.; Barbieri, A.; Petek, M.; Guerra Lara, M.; Sarrailhé, S.S.; Baldi, G.; Bagnato, C.; Bruzzone, L.; Ramos, S.; Hasenack, H. 2022. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomias Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>

2.22. Biodiversidad específica de taxas seleccionados (#22: BioSp)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: El objetivo es identificar un grupo biológico que dé información ambiental relevante para interpretar el funcionamiento de los ecosistemas a través de su composición. El taxon seleccionado debe reflejar en lo posible

los más amplios niveles tróficos dentro del ecosistema (terrestre o acuático) y contar con información para su interpretación. En algunos sistemas se prestará especial atención a grupos taxonómicos que constituyen enemigos naturales de ciertas plagas.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado:

Riqueza y diversidad de especies de fauna para evaluar la presencia de todos los niveles tróficos. Para poder realizar la interpretación lo ideal sería elegir aquellos grupos taxonómicos que puedan contar con suficientes técnicos capaces de realizar los estudios, y que se cuente con la suficiente cantidad de información como para interpretar los resultados. Si la escala lo permite (predios grandes) las aves serían uno de los grupos propuestos. En la medida de lo posible sería interesante en algunos predios referentes también análisis de biodiversidad acuática (peces o invertebrados) o anfibios. En predios de escala reducida, los artrópodos pueden ser un grupo adecuado y dentro de ellos, podría analizarse arácnidos o coleópteros, como ejemplo. En caso de contar con la participación de grupos de investigación podría seleccionarse otros grupos adicionales.

Tipo de datos: Datos de campo recopilados específicamente por especialistas en el caso de aves y en el caso de artrópodos y anfibios podría haber colaboración de productores para la toma de muestras y posterior análisis de muestras por especialistas. Como metodología específica, se utilizarían listas o transectas para aves, electropesca para peces, muestreo directo o grabación de sonidos para anfibios, trampas y/o Gvac (aspiración de una superficie o unidad de muestreo determinada) para artrópodos.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/chacra/cuadro/predio.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Recopilación de datos a campo.

Registros necesarios por parte del productor:

Participación en la instalación y revisión de trampas o grabadoras.

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

de Santiago, M.F.; Barrios, M.; D'Anatro, A.; García, L.F.; Mailhos, A.; Pompozzi, G.; Reherrmann, S.; Simó, M.; Tesitore, G.; Teixeira de Mello, F.; Valtierra, V. & Blumetto, O. 2022. «From Theory to Practice: Can LEAP/FAO Biodiversity Assessment Guidelines Be a Useful Tool for Knowing the Environmental Status of Livestock Systems?» *Sustainability*, 14(23): 16259. <https://doi.org/10.3390/su142316259>

2.23. Índice integridad ecosistémica (#23: IIE)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Combina diferentes características ambientales que pueden evaluarse cualitativa y cuantitativamente por un aplicador con una formación básica y puede implementarse rápidamente. Su aplicación implica una evaluación de cuatro componentes: estructura de la vegetación, especies vegetales, suelo y áreas ribereñas. Cada componente del índice está directamente asociado con aspectos clave para la evaluación de la capacidad de los ecosistemas para sustentar la producción, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Es una herramienta simple y robusta para evaluar y monitorear la integridad de los agroecosistemas y la validación primaria demuestra una buena correlación con otras variables ambientales como la diversidad de la vida silvestre y el carbono orgánico del suelo (COS). El IIE permite tener una medición cuantitativa del estado ambiental de un sistema productivo para monitorear su estado a lo largo del tiempo. Como es una herramienta aplicable por alguien con una capacitación básica, podría ser ampliamente utilizado por técnicos e incluso productores para tener

un indicador de referencia. Como el resultado es descomponible en sus cuatro dimensiones (suelo, estructura de la vegetación, especies y cursos de agua) es posible evaluar e intervenir por separado en aquellos que necesitan ser mejorados. Por lo tanto, puede ser utilizado como herramienta de evaluación, pero también de gestión.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Integridad ecosistémica.

Tipo de datos: Datos de campo colectados *ad hoc*.

Periodicidad del registro: Bianual, pero podría ser anual si se quiere comprobar progresos intermedios.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/chacra/cuadro/predio.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Aplicación de protocolo de campo del IIE y digitalizar información.

Registros necesarios por parte del productor:
-

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Blumetto, O.; Castagna, A.; Cardozo, G.; García, F.; Tiscornia, G.; Ruggia, A.; Scarlato, S.; Albicette, M.; Aguerre, V. & Albin, A. 2019. Ecosystem Integrity Index, an innovative environmental evaluation tool for agricultural production systems. *Ecological Indicators*, 101: 725-733.

2.24. Índice de contribución a la conservación (#24: ICP)

Aplicable en sistemas: ganadero.

Breve descripción: El ICP – Índice de Contribución a la Conservación de los Pastizales Naturales del Cono Sur (en forma abreviada Índice de Conservación de Pastizales Naturales) – es una herramienta desarrollada para medir el aporte que un productor hace a la conservación de los pastizales naturales en la región del Cono Sur de Sudamérica, tomando en cuenta las características de su establecimiento.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: El índice observa aspectos puros de conservación, pero también otros directamente asociados a la producción, como la condición forrajera de los pastizales, es decir, su capacidad para convertirse en carne o leche de manera eficiente.

Tipo de datos: Porcentaje de pastizal natural remanente o naturalmente presente en un determinado predio. El valor final del índice estará intervenido por atributos que provienen de tres fuentes, aquí denominados «sistemas»:

1. Sistema Pastizal: Revisa la condición o calidad de los pastizales naturales.
2. Sistema Predial: Considera composición del resto del campo, la fracción que no corresponde a pastizales naturales.
3. Sistema Externo: Evalúa la posible ubicación del establecimiento de acuerdo con su participación en Áreas de Valor Ecológico Especial o en zonas de alta transformación.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Predio.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Porcentaje de pastizal natural presente en el establecimiento, coberturas de especies forrajeras, coberturas de especies invasoras y heterogeneidad estructurales (estratos), diversidad de coberturas distintas al pastizal natural (ver Parera y Viglizzo, 2014).

Registros necesarios por parte del productor:

=

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Parera, A. y Carriquiry, E. 2014. Manual de prácticas rurales asociadas al índice de conservación de pastizales naturales (ICP). del Cono Sur de Sudamérica. Montevideo: Aves del Uruguay. 204 p.

Parera, A. y Viglizzo, E. 2014. Índice de contribución a la conservación de pastizales naturales del Cono Sur de Sudamérica (ICP): criterios y parámetros para su desarrollo. En: Parera, A.; Paullier, I. y Weyland, F. (eds). Índice de contribución a la conser-

vación de pastizales naturales del cono sur: Una herramienta para incentivar a los productores rurales. Montevideo: Aves Uruguay. 181 pp.

2.25. Índices de Paisaje (#25: PAI)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Este indicador pretende caracterizar la estructura y configuración del paisaje, a través de dos métricas: el tamaño medio de un parche determinado del paisaje (por ejemplo, una parte de un cultivo o de un pastizal) y el grado de conectividad/fragmentación entre parches similares. La cobertura de suelo objetivo puede ser cualquiera de las que corresponden a hábitats naturales (pastizales, bosques nativos, humedales) o a otra cobertura de particular interés (cultivos, montes comerciales). La conectividad se refiere al grado de conexión física entre parches. En un sistema «conectado» es posible desplazarse en un mismo tipo de cobertura (pastizal o bosque, por ejemplo) sin tener que atravesar otro tipo (un cultivo).

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Fragmentación o conectividad de hábitats naturales.

Tipo de datos: Cartografías generales (por ej. Proyecto MapBiomás).

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Establecimiento, cuenca y/o paisaje.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Identificación y validación del polígono que corresponde a los límites del predio.

Registros necesarios por parte del productor: -

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Baldi, G.; Guerschman, J.P. & Paruelo J.M. 2006. Characterizing fragmentation in temperate South America grasslands. *Agricultural Ecosystems and Environment* 116(3-4): 197-208.

2.26. Calidad de agua de escurrimiento (#26: CalAg)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: En los sistemas de producción agropecuaria el escurrimiento ocurre cuando el agua de la lluvia, o del riego mal dimensionado o mal aplicado, no infiltra en el perfil del suelo, sino que se moviliza sobre la superficie siguiendo la pendiente y, a través de las vías de desagüe natural o artificial, alcanza luego cursos de agua superficial, embalses, lagos y/o lagunas. El agua de escurrimiento puede contener y transportar nutrientes (nitrógeno y fósforo), así como productos agroquímicos, tanto en forma soluble como asociados a las partículas del suelo que son arrastradas, y que potencialmente afectan la ecología acuática de los cuerpos de agua. Esto genera problemas que impactan en el ambiente y, eventualmente, en la salud humana y animal. El conocimiento de la calidad del agua que escurre de una cuenca o de un predio es un indicador de sostenibilidad, ya que cuantitativamente nos muestra la presencia de agentes contaminantes en el agua que son exportados de esa cuenca o predio.

El muestreo de agua y su posterior análisis, realizado en una misma fecha en el punto de entrada y en el punto de salida de un curso de agua dentro de un predio, facilita conocer el efecto predial sobre la calidad del agua.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Mantenimiento de la calidad e integridad física, química y biológica de los cuerpos de agua superficial.

Tipo de datos: Análisis de agua realizado en laboratorio: demanda biológica de oxígeno (DBO), P total, N total, Sólidos Suspendidos Totales (SST). Si se dispone de sonda para mediciones *in situ*, también: pH, turbidez, O₂ disuelto, conductividad eléctrica. En cuencas y predios de elevada intensidad de utilización de fitosanitarios, considerar incluir la determinación

específica de alguno de sus principios activos.

Periodicidad del registro: Mensual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Predio/cuenca.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Fecha de muestreo del agua (en el caso que se disponga de la sonda registrar los valores medidos *in situ*).

Registros necesarios por parte del productor: Muestreo del agua.

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

McFarland, A. & Hauck, L. 2001. Strategies for Monitoring Nonpoint Source Runoff. TIAER, USDA. Available at: <http://tiaer.tarleton.edu/pdf/tr0115.pdf>

2.27. Eficiencia en el uso del agua (#27: EUA)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: La eficiencia en el uso del agua, entendida como el cociente de la productividad primaria neta (PPN) tanto con la precipitación (PPN/PPT), como con la evapotranspiración (PPN/Etr), ha sido identificada como una medida de la degradación de tierras y de la desertificación. Se basa en estimaciones simultáneas a nivel de potrero de PPN, PPT y Etr. En sistemas bajo riego se puede incorporar una eficiencia en el uso de agua de riego a partir del cómputo de la producción y de los volúmenes de agua aportados.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Eficiencia en el uso de los recursos.

Tipo de datos: La PPN puede ser derivada de datos satelitales mediante el uso del modelo de Monteith. Se usarán eficiencias en el uso de la radiación específicas para cada cobertura. Se estimará a su vez la eficiencia en la absorción de PAR (APAR). La precipitación se obtendrá del producto «Climate Hazards Infrared Precipitation» (CHIRP, Funk et al., 2015),

con una resolución espacial de 0.05 grados (aproximadamente 5566 metros) y con un paso diario. Para la evapotranspiración se utilizará el producto «Penman-Monteith- Leuning Evapotranspiration V2» (PML_V2, Zhang et al., 2019) con una resolución espacial de 464 metros y frecuencia de 8 días.

Periodicidad del registro: Anual, ciclo cultivo.

Grado de cobertura espacial de la observación: Dependiendo de los datos colectados, cuadro/chacra o establecimiento.

Registros/análisis a realizar por técnicos: -

Registros necesarios por parte del productor:

Por cada ciclo de cultivo y por cuadro se necesita: datos del ciclo (fecha siembra, fecha de fin del cultivo), registro de precipitaciones prediales, registro de horas y volumen de agua empleado en el riego, sistema de riego empleado (aspersores, microaspersores, goteo).

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Le Houérou, H.N. 1984. Rain use-efficiency: a unifying concept in arid-land ecology. *Journal of Arid Environments*, 7(3): 213-247.

Verón, S.R.; Paruelo, J.M. & Oesterheld, M. 2006 Assessing desertification. *Journal of Arid Environments*, 66(4): 751-763.

2.28. Huella del agua (#28: WaterF)

Aplicable en sistemas: ganadero, lechero.

Breve descripción: La huella del agua de un producto (litro de leche o kg de carne) representa la cantidad de agua que fue utilizada para la obtención y aprovechamiento del mismo. Se puede calcular la huella del agua «azul» y del agua «verde». También la huella del agua «útil» (agua azul + agua verde). El agua azul es el agua superficial presente en presas, lagos, ríos y acuíferos. El agua del suelo también se considera agua azul si proviene de manantiales, si fue aplicada a través de riego o si su presencia se debe a la ocurrencia de procesos hidrológicos tales como inundaciones. Esta es el agua de bebida de los animales,

limpieza del tambo, enfriamiento de la leche, etc. El agua verde es el agua proveniente de las precipitaciones y que se encuentra almacenada en el suelo, y que puede potencialmente ser transpirada o evaporada. El alcance del cálculo de la huella hídrica varía en función del interés del estudio. Se puede considerar el agua utilizada solamente en el proceso de producción primaria (es decir hasta la portera del predio), hasta el final del procesamiento industrial o hasta su consumo o disposición final. En este documento se considera la huella hídrica de agua útil (azul + verde) hasta la portera. De manera simplificada, la huella hídrica del agua útil comprende:

- El agua consumida directamente por los animales.

- El agua que se utiliza para producir los alimentos que consume el ganado, tanto los que se producen en el predio, como los que se traen del exterior del mismo.

- El agua que se utiliza para lavado de animales e instalaciones.

- El agua que se aplica mediante riego.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado:

Volumen de agua útil que se usa para producir una unidad de producto (1 kg de carne o 1 litro de leche corregida por grasa y proteína).

Tipo de datos: Registro de productores y/o simulaciones con modelos.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Predio.

Registros/análisis a realizar por técnicos:

Consumo animal, cantidad de agua que se utiliza para producir los alimentos, cantidad de agua que se utiliza para lavado de animales e instalaciones, cantidad de agua de enfriado de la leche por placa y cantidad del agua que se aplica mediante riego. Esta información se puede medir directamente o estimar a través de ecuaciones.

Registros necesarios por parte del productor: Volumen del tanque de agua utilizado, número de veces/día que se utiliza todo el volumen del tanque, volumen

de agua registrado en factura OSE (si corresponde), cantidad de animales y categorías, producción anual (leche, carne, granos).

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencia

FAO. 2019. *Water use in livestock production systems and supply chains – Guidelines for assessment (Version 1)*. Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Rome

2.29. Rendimiento hidrológico (#29: RH)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, lechero.

Breve descripción: El rendimiento hidrológico estima el excedente hídrico de una unidad territorial (cuena, predio) a partir de un balance hídrico del suelo. El excedente hídrico puede perderse como escurrimiento superficial o como drenaje profundo. Los datos de RH están a nivel de píxel de 500 metros y pueden ser escalados a predios, cuencas o cualquier unidad administrativa o ecológica.

Para ello, se utilizan datos derivados de productos satelitales de evapotranspiración, precipitación y contenido de agua en el suelo.

$$RH = \ddot{A}St \gg 1 + PPTt0 - ETRt0 - CCt0$$

Donde RH es el rendimiento hidrológico (mm día⁻¹), $\ddot{A}S$ es el agua disponible en el suelo, PPT es la precipitación (mm día⁻¹), ETR es la evapotranspiración real (mm día⁻¹), CC es la capacidad de campo, y t0 y t-1 representan los períodos de estimación.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Rendimiento hidrológico, salida de agua líquida del sistema.

Tipo de datos: La evapotranspiración se estima mediante modelos basados en sensores remotos Penman-Monteith-Leuning (PMLv2), el producto MODIS y el modelo INTA-SEPA. La evaluación del desempeño de estos mode-

los en Uruguay en base a 6 criterios (capacidad de diferenciar la dinámica estacional de coberturas del suelo, la resolución espacial y temporal, el grado de acople con la precipitación y la productividad (IVN) y la correspondencia con estimaciones de evapotranspiración en campo) muestra que el de mejor desempeño es el producto MODIS. La precipitación se obtiene de productos globales tales como «Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station» (CHIRPS). Este set de datos provee estimaciones diarias de precipitación (mm día⁻¹) con una resolución espacial de 0.05° x 0.05° (5 x 5 km², aproximadamente) desde 1981.

Periodicidad del registro: Estacional, anual o ciclo cultivo.

Grado de cobertura espacial de la observación: Dependiendo de las dimensiones datos colectados, cuadro o establecimiento.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Identificación y validación del polígono que corresponde a los límites del predio.

Registros necesarios por parte del productor:

-

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial

Referencias:

Gallego, F.; Sans, G.C.; Di Bella, C.M.; Tiscornia, G. & Paruelo, J.M. 2023. Performance of real evapotranspiration products and water yield estimations in Uruguay. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101043.

2.30. Análisis Ciclo de Vida (#30: LCA)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: El análisis del ciclo de vida es un tipo de estudio que calcula los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o de una actividad. Considera toda la historia del producto o actividad a estudiar, empezando desde su origen hasta que termina siendo un residuo. Permite por tanto conocer dónde

están las etapas o elementos más críticos del proceso y así poner foco en ellos y buscar soluciones alternativas.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado:

Emisiones de GEI, Balance C/Huella de C/ Eutrofización/Acidificación

Tipo de datos:

- Flujos de producción: productos, categorías animales, tipos de cultivos.
- Insumos: fertilizantes, raciones, fitosanitarios, zoonosanitarios, maquinaria, energía, otros.
- Manejos: tipo de manejos o prácticas, frecuencia.

Periodicidad del registro: Se obtiene para cada ciclo anual de producción, pero deben registrarse cotidianamente las actividades realizadas que impliquen uso de insumos o maquinaria, así como el uso de insumos (combustibles, fertilizantes, etc.).

Grado de cobertura espacial de la observación: Predio.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Facilitar una planilla de registro y verificar la registración.

Registros necesarios por parte del productor: Insumos usados, energía eléctrica, horas de maquinaria (tipo de labor).

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

ISO. 2006. *ISO 14040:2006(es). Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia*. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>

FAO. 2016. Environmental performance of large ruminant supply chains: Guidelines for assessment. *Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership*, Rome, Italy.

2.31. Modelos de Estados y Transiciones (#31: MET)

Aplicable en sistemas: ganadero.

Breve descripción: Los modelos de estados y transiciones (METs) describen la heterogeneidad estructural de los pastizales

derivada del manejo ganadero con el objetivo de evaluar su estado de conservación/degradación. Representan la dinámica de las comunidades en respuesta a acciones de manejo y condiciones climáticas. A escala de establecimiento, constituyen un instrumento para el manejo adaptativo en el campo natural. A mayores escalas, los METs constituyen una herramienta para el diagnóstico del estado de salud y conservación del campo natural. Los METs representan la dinámica de la vegetación como un conjunto de estados y las transiciones entre diferentes estados. A su vez, dentro de cada estado se pueden identificar diferentes fases.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado:

Grado de conservación de pastizales naturales (aspectos estructurales).

Tipo de datos:

-Para la determinación de los estados y sus fases se seleccionaron un conjunto de 14 indicadores estructurales de la vegetación, éstos son medidos en el campo en parcelas de 5x5 metros.

-Los 14 indicadores son: 1) Número de estratos de la vegetación (N° est); 2) Altura del estrato 1 o basal (Alt E1); 3) Altura del estrato 2 (Alt E2); 4) Altura del estrato 3 (Alt E3); 5) Cobertura del estrato basal (%) (Cob E1); 6) Cobertura del estrato 2 (%) (Cob E2); 7) Cobertura del estrato 3 (%) (Cob E3); 8) Suelo desnudo % SD; 9) Cobertura de gramíneas en el estrato basal (%) (G); 10) Cobertura de especies anuales (%) (An); 11) Cobertura de especies invasoras (*Lolium multiflorum*, *Cynodon dactylon*, *Eragrostis plana*, *Senecio madagascariensis*, *Ulex europaeus*) (%) (Inv); 12) Número e identidad de las especies dominantes del estrato basal (especies cuyas coberturas sumadas superan el 50% de la cobertura total) (N° dom 1); 13) Número e identidad de las especies dominantes del estrato 2 (N° dom 2); 14) Número e identidad de las especies decrecientes frente al pastoreo (especies de plantas de pastizal cuya frecuencia disminuye de manera significativa en régimen de pastoreo por ganado

doméstico): *Bromus auleticus*, *Deyeuxia viridiflavescens*, *Paspalum plicatulum*, *Mnesithea selloana*, *Melica brasiliana*, *Poa lanigera*, *Nassella neesiana* (N°) (dec).

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero.

Registros/análisis a realizar por técnicos:

Registro de las 14 variables en al menos 10 estaciones por comunidad dentro del potrero.

Registros necesarios por parte del productor:

-

Tipo de predio en donde estimarlo: Referente.

Referencias:

Altesor, A.; Gallego, F.; Ferrón, M.; Pezzani, F.; López-Mársico, L.; Lezama, F.; Baeza, S.; Pereira, M.; Costa, B. & Paruelo, J.M. 2019. An inductive approach to build State-and-Transition Models for Uruguayan grasslands. *Rangeland Ecology & Management*, 72(6): 1005-1016. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.06.004>

Altesor, A., et al. 2019. ¿Pastizales degradados o conservados? Una descripción objetiva de la heterogeneidad generada por el manejo ganadero. En: Altesor, A.; López-Mársico, L. y Paruelo, J.M. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Montevideo (UY): INIA. p.51-72. (Serie FPTA-INIA; 69).

2.32. Diversidad de tipos funcionales de ecosistemas (#32: TFE)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Los tipos funcionales de ecosistemas (TFE) se definen como un grupo de ecosistemas que comparten características funcionales, incluyendo la cantidad y temporalidad del intercambio de materia y energía entre la comunidad biótica y su ambiente. Se definen independientemente de la estructura de la vegetación y pueden definirse en base a diferentes aspectos de los flujos de materia/energía. El enfoque aquí expuesto se centra en la dinámica de la producción

primaria, uno de los atributos funcionales esenciales y más integradores de los ecosistemas. El número de tipos funcionales de ecosistemas y su abundancia relativa define la dimensión funcional de la biodiversidad.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: La caracterización de los elementos de la biodiversidad como unidades funcionales permite la evaluación de los efectos de los cambios en el uso del suelo y la variabilidad climática.

Tipo de datos: Índice de vegetación normalizado (NDVI) a partir de teledetección, con la identificación de tres rasgos de las curvas estacionales del NDVI: la integral anual, el rango anual relativo del NDVI y la fecha de máximo NDVI.

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Predio, cuenca, paisaje.

Registros/análisis a realizar por técnicos:

Identificación y validación del polígono que corresponde a los límites del predio o el caso. Cálculos y análisis.

Registros necesarios por parte del productor:

=

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Alcaraz-Segura D.; Paruelo, J.M. & Cabello J. 2006. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography*, 15(2): 200-212.

Alcaraz-Segura, D.; Paruelo, J.M.; Epstein, H.E. & Cabello, J. 2013. Environmental and human controls of ecosystem functional diversity in temperate South America. *Remote Sensing*, 5(1): 127-154.

Baeza S.; Paruelo J.M. & Altesor, A. 2006. Caracterización funcional de la vegetación del Uruguay mediante el uso de sensores remotos. *Interciencia*. 31(5): 382-388.

Paruelo, J.; Jobbágy, E. & Sala, O. 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems*, 4(7): 683-698.

2.33. Índice de Oferta de Servicios Ecosistémicos (IOSE) y tendencia IOSE (#33: tIOSE)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: El índice de oferta de servicios ecosistémicos (IOSE) es un indicador sinóptico de la oferta de SE de regulación y soporte. Ha sido validado específicamente para SE relacionados con las dinámicas de carbono y agua, y la biodiversidad. Genera estimaciones de procesos ecosistémicos críticos o servicios intermedios a partir de la integración de la información provista por sensores remotos sobre dos aspectos centrales del funcionamiento ecosistémico: las ganancias totales de carbono y su variación estacional.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Dinámicas de carbono y agua, biodiversidad.

Tipo de datos: El IOSE se define como el producto de promedio del NDVI-I y del (1-NDVI CV). En donde el «NDVI-I» es la integral anual del Índice de Vegetación Normalizado (una medida de las ganancias totales de C del ecosistema) y el «NDVI CV» el coeficiente de variación intra-anual de este índice espectral (una medida de la estacionalidad de las ganancias de C).

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Predio, cuenca, paisaje.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Identificación y validación del polígono que corresponde a los límites del predio o el caso. Cálculos y análisis.

Registros necesarios por parte del productor:
=

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Paruelo, J.; Texeira, M.; Staiano, L.; Mastrángelo, M.; Amdan, L.; Gellego, F. 2016. An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *Ecological indicators*. 71:145-154.

2.34. Apropiación Humana de la Productividad Primaria Neta (#34: AHPPN)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Cuantifica la parte de la Producción Primaria Neta (PPN) de los ecosistemas utilizada directa o indirectamente por los seres humanos y refleja los cambios en la energía disponible para la red trófica. Permite informar respecto del impacto humano sobre los ecosistemas y sirve como aproximación a la intensidad de uso del suelo. La apropiación humana de la PPN cambia entre distintos usos del suelo. Las estimaciones globales han mostrado un aumento de la apropiación a lo largo del tiempo; en particular para nuestra región se ha estimado una apropiación del 40% de la producción anual para los pastizales del Río de la Plata, siendo máxima en usos del suelo de tipo agrícola y forestal, con una apropiación entre el 70-80 %.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Energía disponible para servicios ecosistémicos (SE) de soporte.

Tipo de datos: $HANPP = NPP_0 - NPP_{REM} = NPP_0 - (NPP_{ACT} - NPP_H)$

La HANPP es el resultado de la diferencia entre la PPN en ausencia de influencia humana (PPN₀) y la PPN de la vegetación real que queda después de la actividad productiva, o productividad remanente (PPN_{REM}). El NPP_{REM} se calcula como el NPP de la vegetación actual (NPP_{ACT}) menos el NPP apropiado directamente por los humanos como productos (NPP_H). Mapas de uso del suelo y estimación de la PPN a partir del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI). Datos espectrales provistos por sensores remotos y datos secundarios (por ej., DIEA, DICOSE).

Periodicidad del registro: Anual.

Grado de cobertura espacial de la observación: Potrero/chacra/cuadro, predio, cuenca, paisaje.

Registros/análisis a realizar por técnicos:
Identificación y validación del polígono que corresponde a los límites del predio o el caso. Cálculos y análisis.

Registros necesarios por parte del productor: -

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Baeza, S. & Paruelo, J.M. 2018. Spatial and temporal variation of Human Appropriation of Net Primary Production in the Rio de la Plata Grasslands. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 145(Part B): 238-249. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.014>

2.35. Eficiencia Emergética /Análisis Emergético (#35: EfEmer)

Aplicable en sistemas: agrícola, ganadero, granjero, lechero.

Breve descripción: Evalúa la producción y consumo de energía en un sistema a partir de caracterizar cada uno de los flujos sobre la base de una unidad común. Cada uno de los aportes de energía, en forma de trabajo, agroquímicos, semillas, etc. es cuantificado en unidades de *emergía* y lo mismo ocurre con los productos (carne, leche, granos, etc.). El concepto de *emergía* (emergy en inglés, derivado de «EM-bodied enERGY») representa toda la energía incorporada en un producto a través de su ciclo de vida. El análisis emergético permite a su vez computar los aportes de productos «no adquiridos» (por ej. el N proveniente de la mineralización): esto incluye a los insumos y a los productos. La *emergía* solar se utiliza para determinar el valor del trabajo ambiental y humano dentro de un sistema sobre una base común: la energía solar equivalente necesaria para producir cada servicio o producto. La *emergía* solar de los productos y servicios se calcula multiplicando las unidades de energía (por ejemplo, joules de petróleo) por los ratios de

emergía por energía, las unidades de masa (por ejemplo, gramos de maíz) por los ratios de *emergía* por masa (*emergía* específica), y los pesos/dólares por la *emergía* por unidad de dinero. Gracias a esta técnica, las contribuciones naturales y económicas necesarias para producir rendimientos agrícolas pueden cuantificarse y compararse sobre una base común de *emergía*-joules solares (emjoules). Los flujos de *emergía* pueden ser catalogados como «productos», insumos renovables, no renovables o adquiridos. El cociente entre la *emergía* de los productos y los distintos tipos de insumos permite el cálculo de distintas eficiencias.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado: Eficiencia emergética y magnitud relativa de aportes de fuentes externas de insumos.

Tipo de datos: Datos similares a los involucrados en el cálculo de márgenes brutos económicos. Tablas de transformidad (Jeq/unidad insumo).

Periodicidad del registro: Anual

Grado de cobertura espacial de la observación: Predio, cuenca, paisaje.

Registros/análisis a realizar por técnicos:
Análisis a partir de datos aportados por el productor.

Registros necesarios por parte del productor:
Volúmenes de producción, labores, manejo, etc.

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial.

Referencias:

Brown, M.T. & Herendeen, R.A. 1996. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view. *Ecological economics*, 19(3): 219-235.

Odum, H.T. 2000. Folio #2. Emergy of global Processes. Handbook of Emergy Evaluation: A compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Center for Environmental Policy, Univ. of Florida, Gainesville.

2.36. Nivel genético productivo y ambiental de bovinos y ovinos (#36: Gen)

Aplicable en sistemas: ganadero

Breve descripción: Se obtienen las predicciones genómicas indirectas (PI) para diferentes rasgos relacionados con la producción de carne y lana, resistencia a enfermedades y emisiones de GEI en pool de reproductores (toros y carneros padres) de los establecimientos comerciales. Dependiendo de la especie/raza y de la información disponible (núcleos informativos) se pueden estimar estos valores en predios comerciales y relacionarlos con la población en evaluación genética (cabañas) de cada raza para ubicar el nivel genético de los mismos. Algunos ejemplos en ovinos son pesos corporales, producción de lana (peso de vellón sucio, PVS), resistencia a nematodos gastrointestinales por conteo de huevos por gramo (HPG), consumo de alimento residual (CRA o más conocido como RFI) y emisiones de metano. En vacunos las características son RFI, pesos corporales y eventualmente características reproductivas (en desarrollo). Dentro de los procesos de transiciones agroecológicas o de ganadería regenerativa, esta estimación permite tener una primera «foto» de la genética del predio, que sirva como un insumo para cuantificar el impacto que puede tener la mejora genética animal en las emisiones de GEI del predio por hectárea o por unidad de producto (lana o carne) dentro, por ejemplo, de análisis de ciclo de vida (LCA). En la práctica se envían a genotipar los padres referentes de cada raza/especie (dependiendo del tamaño, unos 20 padres por raza) y se realizan las estimaciones de su valor genético promedio y de la distancia genética de estos predios con la población evaluada. A los productores se les reporta gráficamente como están ubicados para cada característica en relación con esta población.

Proceso/servicio ecosistémico evaluado:
Emisiones de GEI, producción de carne y lana.

Tipo de datos: Se realizará la estimación de las diferencias esperadas en la progenie (DEP o EPD en inglés) genómicos (por predictómica) promedio para las características de interés del predio: emisiones de metano, eficiencia de conversión residual (RFI), consumo de energía metabolizable, producción de carne (crecimiento) y lana (PVS, diámetro de la fibra). Estos están disponibles para algunas razas en ovinos (Merino, Corriedale) y potencialmente en bovinos (Angus y Hereford). En especial en bovinos cada raza puede presentar características diferentes.

Periodicidad del registro: Suponiendo un proyecto de intervención, inicio y fin de proyecto.

Grado de cobertura espacial de la observación: Se muestrean los reproductores referentes (toros y carneros); en términos «espaciales» sería la totalidad del predio.

Registros/análisis a realizar por técnicos: Extracción de muestra biológica para extracción de ADN (e.g. pelo, saliva, sangre). También lo puede hacer el productor.

Registros necesarios por parte del productor:
Extracción de muestra biológica

Tipo de predio en donde estimarlo: Comercial

Referencias:

Vera, B.; Navajas, E.; De Barbieri, I.; Van Lier, E.; Ciappesoni, G. 2022. Agroecological breeding: genomic evaluation in Australian Merino. [abstract]. In: REDBIO México 2022, XI Congreso, «Biotecnología productiva y sostenible». Libro de resúmenes. 12-14 octubre 2022, Yucatán, México. p.29

Vera, B.; Navajas, E.; De Barbieri, I.; Van Lier, E.; Ciappesoni, G. 2022. Predicciones genómicas para rasgos productivos y de valor ambiental en ovinos Merino Australiano. In: REDBIO México 2022, XI Congreso, «Biotecnología productiva y sostenible». Libro de resúmenes. 12-14 octubre 2022, Yucatán, México. p.122.

Vera, B.; Monzalvo, C.; Navajas, E.; De Barbieri, I.; Carracelas, B.; Van Lier, E.; Ciappesoni, G. 2022. Predicción del valor genético de ovinos en predios comerciales para emisión de metano, eficiencia de conversión y características productivas. *Revista INIA Uruguay*, no.71: 34-37. (Revista INIA; 71).

Agradecimientos (taller indicadores INIA/FUCREA): Eduardo Blasina, Patricia Artía, Yesica Bernaschina, Sebastián Mazzili, Martín Aguirrezabala, Lorena Román, Marcelo Buschiazzo, Licy Beux, Diego Echenique, Renzo Pisciotano, Álvaro Méndez, Martín Mattos, Claudio Invernizzi, Santiago Regusci, Juan Dumestre, Rocío Bertoletti, Heber Freiría, Pablo Bieito.

IV. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE INDICADORES SINÓPTICOS A NIVEL PREDIAL Y LA CREACIÓN DE ÍNDICES DE DESEMPEÑO AMBIENTAL

José Paruelo¹, Fiorella Cazzuli², Federico Gallego³, Gonzalo Camba Sans⁴, Santiago Lombardo⁵, Marcelo Pereira⁵, Luciana Staiano⁶

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo ejemplificaremos el uso de algunos indicadores sinópticos derivados de datos provistos por sensores remotos, presentados en el Capítulo III y su integración en un índice a nivel predial. En este caso particular, nos enfocamos en sistemas de producción ganaderos extensivos, a partir de información generada en el marco del proyecto «Gestión del Pasto» el cual es liderado por el Instituto Plan Agropecuario con financiación FPTA - INIA. El objetivo del proyecto es describir el manejo de los recursos forrajeros que realizan los productores ganaderos extensivos y evaluar sus consecuencias en el desempeño productivo y ambiental. Asimismo, el proyecto se propone la generación de «Buenas Prácticas» ganaderas, a través de la identificación de acciones que generen los mejores desempeños económicos, productivos, sociales y ambientales. En este capítulo reseñamos, de manera preliminar, algunos de los aspectos vinculados al desempeño ambiental. A tales efectos, se seleccionaron 30 predios de todo el país, denominados en el marco del proyecto como «Laboratorios de Campo Natural». Complementariamente, en este trabajo se incluyeron predios adicionales en los cuales el Plan Agropecuario evalúa la productividad forrajera mediante

sensores remotos. Por esta razón, este capítulo trabajó analizando un total de 50 predios.

2. CALCULO DE INDICADORES Y UN ÍNDICE DE DESEMPEÑO AMBIENTAL

La evaluación del desempeño en la dimensión ambiental involucra la identificación de indicadores que puedan registrarse a la escala espacial (predios) y temporal (varios años) del proyecto. Estos indicadores incluyen, por un lado, evaluaciones a campo, y por otro, evaluaciones mediante sensores remotos. En este capítulo presentamos los resultados preliminares del cálculo de 5 indicadores sinópticos derivados de datos satelitales:

- Proporción de hábitat natural (HabNat)
- Rendimiento hidrológico (RH)
- Índice de oferta de servicios ecosistémicos (tIOSE) promedio
- Tendencias positivas del IOSE (tIOSE)
- Tendencias no significativas (neutras) del tIOSE (tIOSE)

El detalle de la estimación de estos índices se presenta en el Capítulo III de esta serie técnica. Los valores de proporción de hábitat natural fueron obtenidos del proyecto Map-Biomas Pampa (<https://plataforma.pampa.mapbiomas.org/>) (Baeza et al., 2022). Los datos satelitales para el cálculo de IOSE y su tendencia fueron derivados del sensor MODIS a bordo de los satélites AQUA y TERRA y procesados en Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). La resolución espacial del producto MODIS usado (Colección 6, MODQ13Q1)

¹ Ing. Agr. (MSc, PhD). Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

² Ing. Agr. (MSc, MSc, PhD). Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

³ Lic. (MSc). IECA/FCien. UdelaR.

⁴ Lic. (MSc). LRT-IFEVA- Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información. Facultad de Agronomía (UBA y CONICET).

⁵ Ing. Agr. Instituto Plan Agropecuario.

⁶ Lic. LART-IFEVA- Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información. Facultad de Agronomía (UBA y CONICET).

para el cálculo del IOSE es de 250 m. El rendimiento hidrológico fue calculado usando datos de Evapotranspiración (evaporación del suelo + transpiración), derivados de la versión 2 del modelo Penman–Monteith–Leuning (PML-v2) (Zhang et al., 2019), y de precipitación, obtenidos del producto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station product (CHIRPS; Funk et al., 2015). Los datos de evapotranspiración están disponibles con una resolución espacial de 500 m y los de precipitación para celdas de 0,05° (aprox. 5x5 km). Los detalles de los cálculos del rendimiento hidrológico están disponibles en Gallego et al. (2023).

Los cálculos fueron realizados para 50 predios, 13 ubicados en la Cuenca Sedimentaria Oeste y 37 en la Cuesta Basáltica (Figura 1). Los valores de Proporción de hábitat natural, Rendimiento hidrológico y del IOSE corresponden a la media del período 2017-2019. Las tendencias del IOSE fueron calculadas para el período 2000-2019.

Los valores de los 5 indicadores fueron escalados entre 0 y 1 según Staiano et al. (2022):

$$Ind\ escalado\ i = \frac{Ind\ i - Ind\ min}{Ind\ max - Ind\ min}$$

Donde «*Ind escalado*» es el valor del indicador escalado para el píxel «*i*», «*Ind*» es el valor del indicador para el píxel «*i*», «*Ind mín*» corresponde al valor mínimo que toma el indicador en el área de estudio e «*Ind max*» al valor máximo.

Se construyó un índice de desempeño ambiental a nivel predial a partir de la suma de los valores escalados de los 5 indicadores considerados. De tal manera el valor máximo que puede asumir es 5 y el mínimo 0. Se representó el desempeño ambiental gráficamente a partir de diagramas de araña.

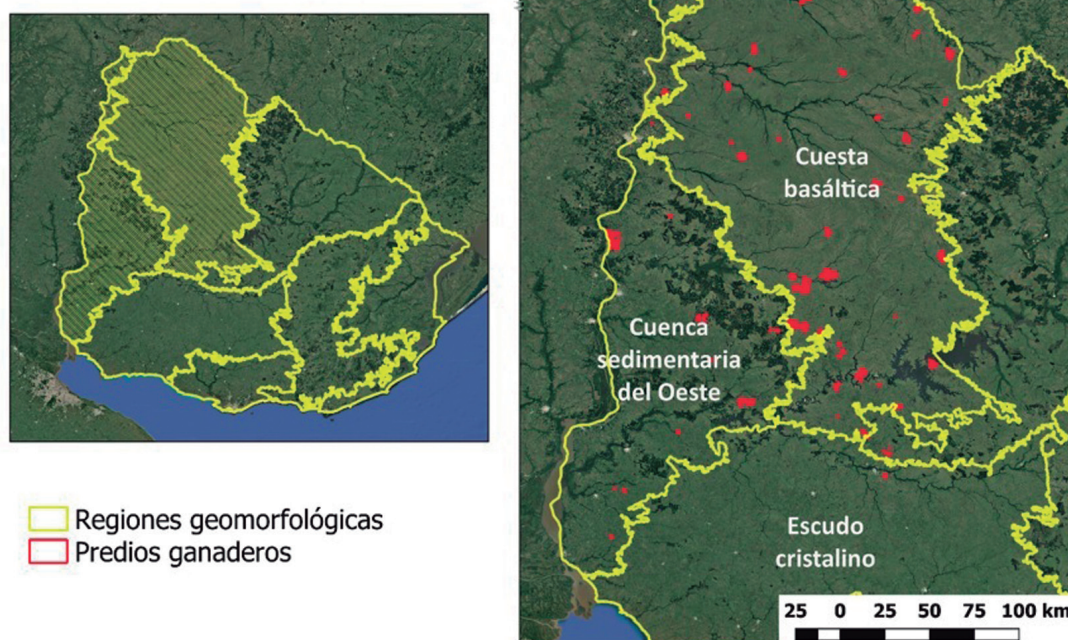


Figura 1. Regiones geomorfológicas y predios incluidos en el análisis del desempeño ambiental a nivel predial.

3. PATRONES GENERAL DE LOS INDICADORES Y EL INDICE

Los patrones espaciales de los indicadores calculados mostraron claras diferencias entre y dentro de las regiones geomorfológicas (Figura 2). En la Cuesta Basáltica predominan valores altos de proporción de hábitat natural, rendimiento hidrológico, IOSE medio y tendencias no significativas en el IOSE, asociados principalmente a pastizales naturales (Figura 2). En la Cuenca Sedimentaria del Oeste, se observa una

menor proporción de hábitat natural, la presencia de valores menores de IOSE promedio y tendencias negativas en el IOSE, asociadas principalmente a áreas transformadas (Figura 2).

En cuanto al análisis a nivel predial, se presentan en el Cuadro 1 los valores promedio de cada uno de los indicadores empleados, mientras que en el Cuadro 2 se presentan los mismos indicadores pero escalados entre 0 y 1. El indicador con desempeño más variable entre predios fue la proporción del predio con tendencias positivas en el IOSE

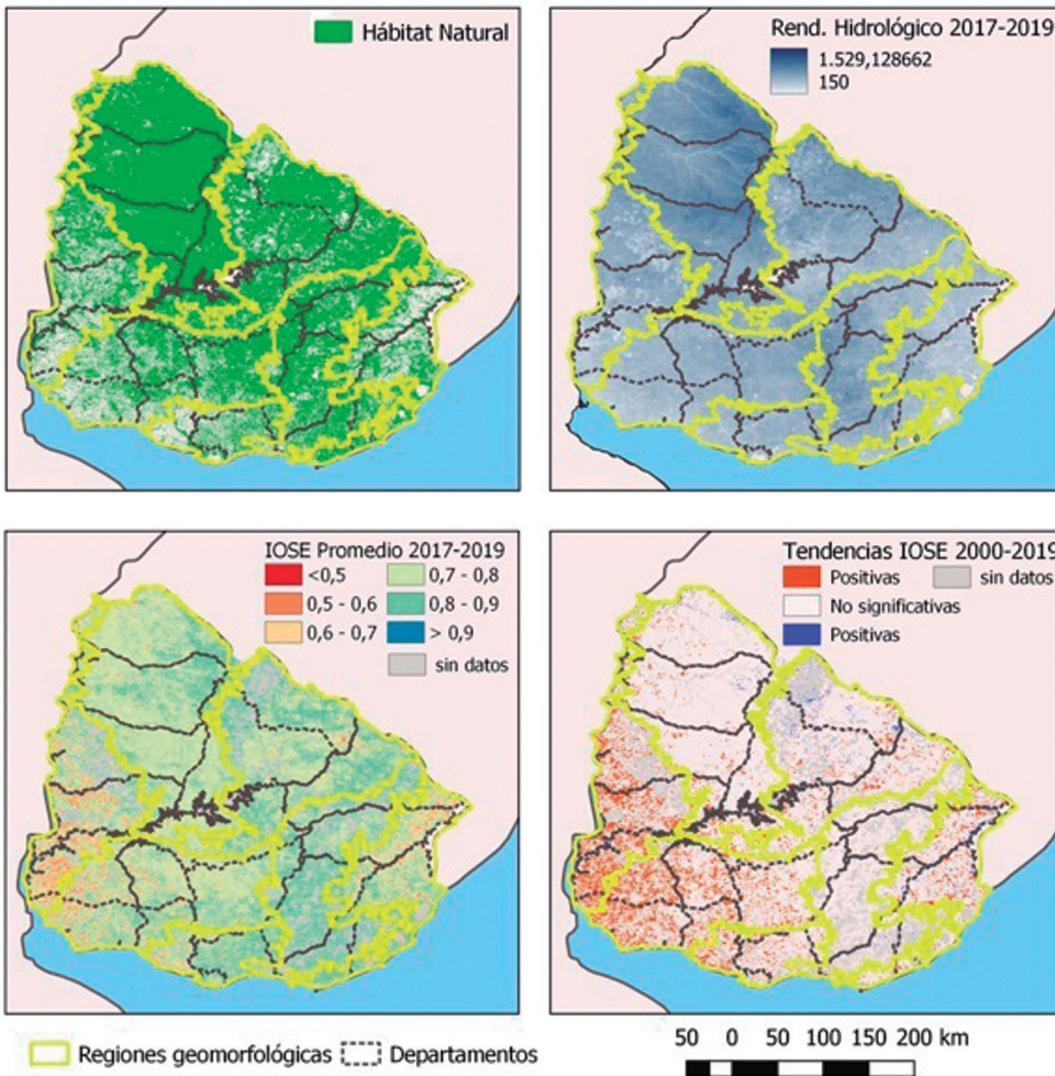


Figura 2. Indicadores empleados para la caracterización del desempeño ambiental a nivel predial.

(Promedio = 0,02, CV = 2,92), seguido por la proporción de hábitat naturales (Promedio = 0,86, CV= 0,24) y por el rendimiento hidrológico (Promedio = 744,89 mm, CV = 0,16) (Cuadro 1). Los indicadores que mostraron menor variabilidad fueron la proporción del predio con tendencias no significativas en el

IOSE (Promedio = 0,93, CV = 0,13) y el IOSE medio para el período 2017-2019 (Promedio = 0,77, CV= 0,04).

El desempeño ambiental de los predios, basado en cada uno de los indicadores, y para dos regiones geomorfológicas contrastantes se muestra en la Figura 3. Este tipo de

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de los indicadores de desempeño ambiental, en valores absolutos.

	Rendimiento Hidrológico	Prop. hábitat naturales	IOSE medio 2017-2019	Prop. del predio con tendencias de IOSE ns	Prop. del predio con tendencias de IOSE positivas
Promedio	744,89	0,86	0,77	0,93	0,02
DesvEst	121,29	0,21	0,03	0,12	0,05
CV (%)	0,16	0,24	0,04	0,13	2,92
Mediana	724,12	0,96	0,77	0,99	-
Min	505,06	0,07	0,70	0,45	-
Max	991,30	1,00	0,84	1,00	0,26

Nota: DesvEst, desvío estándar; CV (%) coeficiente de variación; ns, no significativas; IOSE, índice de oferta de servicios ecosistémicos.

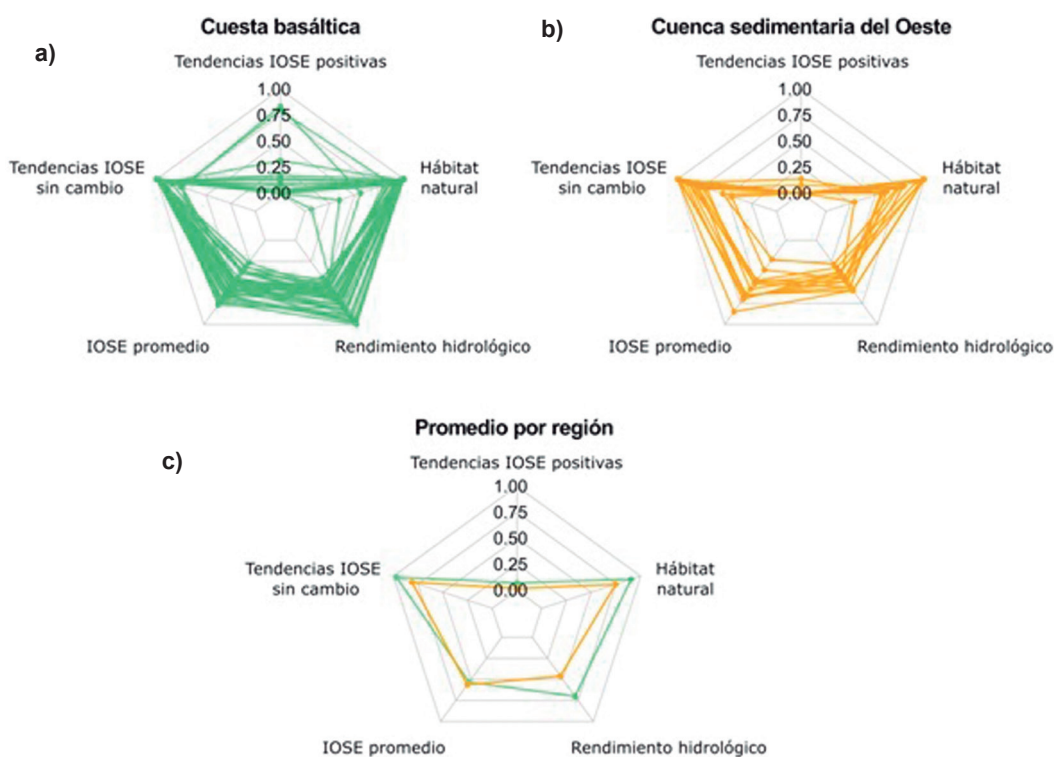


Figura 3. Gráficos «radares» o «araña» de desempeño ambiental de los predios considerados. El panel (a) corresponde a los predios de la Cuesta Basáltica, el (b) a los de la Cuenca sedimentaria del Oeste y el (c) al promedio de los predios para de las dos cada una de las regiones analizadas.

Cuadro 2. Estadísticas descriptivas de los indicadores de desempeño ambiental, en valores escalados (de 0 a 1).

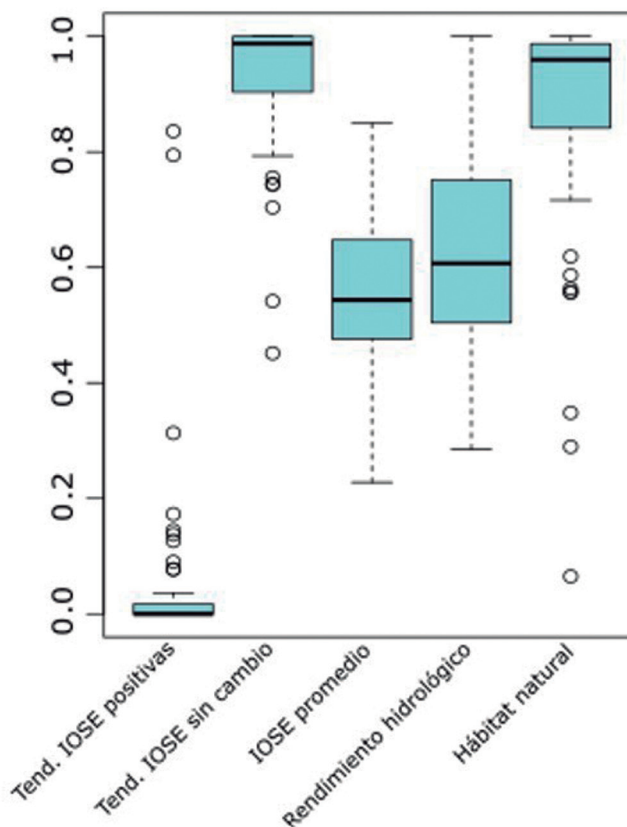
	Rendimiento Hidrológico	Prop. hábitat naturales	IOSE medio 2017-2019	Prop. del predio con tendencias de IOSE ns	Prop. del predio con tendencias de IOSE positivas
Promedio	0,64	0,86	0,54	0,93	0,06
DesvEst	0,18	0,21	0,14	0,12	0,17
CV (%)	0,28	0,24	0,25	0,13	2,92
Mediana	0,61	0,96	0,54	0,99	-
Min	0,29	0,07	0,23	0,45	-
Max	1,00	1,00	0,85	1,00	0,84

Nota: DesvEst, desvío estándar; CV (%) coeficiente de variación; ns, no significativas; IOSE, índice de oferta de servicios ecosistémicos. Algunos valores máximos no suman 1.00, ya que fueron excluidos los casos con forestación.

gráfico genera una «firma», es decir, un conjunto de características específicas de desempeño ambiental de cada predio que permite una rápida comparación entre situaciones o el seguimiento a lo largo del tiempo de la firma de una misma unidad. Este conjunto de características específicas está dado por la forma que toma cada gráfico-radar o de araña.

La forma de las «firmas de desempeño ambiental» de cada predio es función de la manera en la que los datos son escalados, es decir, de la ponderación que se le asigne a cada indicador (cada vértice de la araña) y de la población de predios considerada. Como se observa en la Figura 4, la distribución de los valores considerando todos los predios

Figura 4. Distribución de los valores escalados de los 5 indicadores para los 50 predios. Línea negra horizontal: mediana; extremos de las cajas: cuartiles (p25 y p75); «bigotes» o extremos de los segmentos: mínimo y máximo de valores excluyendo valores extremos; círculos: valores extremos o outliers.



Cuadro 3. Valores de coeficientes de correlación existentes entre los indicadores considerados en este caso de estudio de desempeño ambiental de los 50 predios analizados. IOSE: índice de oferta de servicios ecosistémicos; t: tendencia; ns: no significativa.

	Rendimiento Hidrológico	Prop. hábitat naturales	IOSE medio 2017-2019	Prop. del predio con tendencias de IOSE ns	Prop. del predio con tendencias de IOSE positivas
Rendimiento hidrológico	1,00	0,00	0,20	0,03	0,36
% hábitats naturales	0,72	1,00	0,00	0,00	0,46
IOSE	0,10	0,31	1,00	0,00	0,00
IOSE t ns	0,17	0,30	0,34	1,00	0,00
IOSE t positiva	0,07	0,06	0,23	-0,23	1,00

El valor de correlación a partir de cual decidir excluir un indicador depende del contexto de análisis y probablemente requiera de análisis complementarios para reducir dimensiones (por ejemplo, a partir de un análisis de componentes principales, entre otros).

juntos, varía entre cada una de las dimensiones consideradas. En tal sentido es importante la generación de firmas de referencia o «firmas estándar». Por ejemplo, las firmas de referencias podrían ser los valores de cada indicador correspondientes a los percentiles 75 (P75) y 25 (P25), o sea a valores que corresponden al 25% más alto (P75) o al 25% más bajo de los valores observados (P25).

Los 5 indicadores considerados en este caso de estudio muestran distinto grado de correlación entre ellos (Cuadro 3). Los indicadores a incluir en una caracterización multidimensional del desempeño ambiental no deberían ser redundantes. Es decir, no deberían utilizarse dos indicadores distintos que varían de manera conjunta. En este caso, los dos indicadores más correlacionados fueron el rendimiento hidrológico y el porcentaje de hábitats naturales ($r=0,72$). Esto indicaría que son parcialmente redundantes, con lo cual uno de los dos podría ser excluido a efectos de simplificar la descripción. Para el resto de los indicadores, si bien la correlación fue significativa los valores fueron bajos.

3. USOS POTENCIALES

Cuatro de los 5 indicadores sinópticos presentados (proporción de hábitat naturales, IOSE promedio, proporción con tendencias positivas en el IOSE y proporción con

tendencias no significativas en el IOSE) fueron seleccionados por el Grupo de Trabajo interinstitucional sobre la Huella Ambiental de la Ganadería en Uruguay (MGAP-MA, 2022). En tal sentido, proveen una mirada acordada entre distintos actores del sector gubernamental, técnico y académico del desempeño ambiental a escala de predio agropecuario. El quinto indicador -rendimiento hidrológico- es de reciente desarrollo y su uso para caracterizar la dimensión hídrica del desempeño ambiental requiere ser legitimado.

El uso potencial de la información provista por los indicadores es múltiple. Como se señalaba en el Capítulo I, el diagnóstico que se genere a partir de ellos y las eventuales acciones que se propongan (las «terapias») deben contar con una evaluación «clínica», o sea, de datos accesorios que complementen y den contexto a los indicadores presentados. Sin pretender agotar las posibilidades de uso de los indicadores sinópticos destacamos tres posibles aplicaciones:

Productores/as individuales: A partir de las descripciones presentadas el/la productor/a puede identificar en dónde es necesario enfocar esfuerzos si su objetivo es mejorar su desempeño ambiental. Siendo los sistemas productivos complejos, no siempre será posible o deseable modificar sólo alguno de los indicadores. El decisor o decisor/a tendrá, a partir de

estos indicadores elementos para evaluar el impacto de sus actividades sobre el desempeño ambiental. Esta evaluación incluye tanto un «análisis vertical» o temporal (es decir, dentro del predio, año tras año) como «horizontal» o espacial (es decir, entre predios, en un mismo año). En suma, a través de los años cada productor/a puede observar la tendencia que tienen los indicadores en su predio, pero también en qué situación se encuentra con respecto de sus «pares».

Políticas públicas: La caracterización del desempeño ambiental puede ser la base de definición de políticas públicas. Por ejemplo, la orientación de incentivos puede estar asociada a tendencias o cambios en el desempeño ambiental. También, el uso de indicadores permitiría tipificar la producción. Para el caso ganadero, la trazabilidad del ganado permite asociar animales a ser faenados con un predio

determinado y al disponer de una caracterización del desempeño ambiental es posible tipificar el producto en términos de, por ejemplo, preservación de hábitats naturales u oferta de SE (Figura 5).

Generación conocimiento: Otro uso de los indicadores e índices de desempeño ambiental es la descripción de patrones geográficos a nivel regional o nacional, – especialmente para aquellos indicadores que se alimentan de datos generados por teledetección. Estos patrones espaciales traducidos a mapas pueden vincularse con datos secundarios (por ejemplo, datos de DICOSE, SNIG o INAC) para generar conocimiento sobre cómo interactúan variables productivas (no ambientales) con variables ambientales. Un ejemplo de esto es el estudio de los compromisos o «trade-offs» entre desempeño ambiental y productivo.

Si bien ya existen prácticas que apuntan

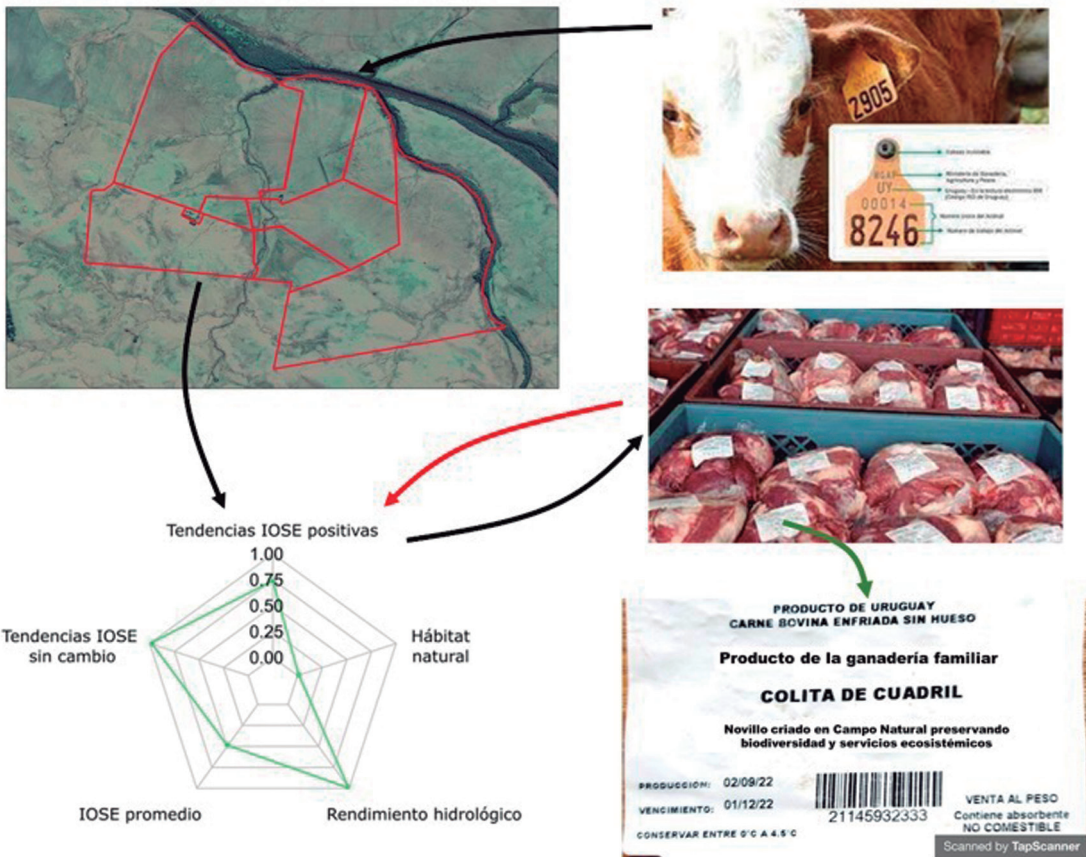


Figura 5. Esquema de cómo podría asociarse una «firma de desempeño ambiental» con el producto final.

a la transición agroecológica de los sistemas ganaderos, contar con una base de datos lo suficientemente grande, que contenga indicadores e índices, no solo ambientales si no también productivo-económicos y sociales, permitirá poder identificar buenas prácticas agropecuarias (BPAs) de manera inductiva. Es decir, a partir de los datos conjuntos reales ambientales, productivo/económicos y sociales, se podrán analizar qué prácticas realizan aquellas empresas que mejor manejan estas tres dimensiones de la sustentabilidad. En el último capítulo de esta serie técnica nos referiremos puntualmente a esta potencialidad de la construcción de bases geoespaciales a nivel predial.

4. BIBLIOGRAFIA

- Baeza, S.; Vélez-Martin, E.; De Abelleira, D.; Banchemo, S.; Gallego, F.; Schirmbeck, J.; Veron, S.; Vallejos, M.; Weber, E.; Oyarzabal, M.; Barbieri, A.; Petek, M.; Guerra Lara, M.; Sarrailhé, S.S.; Baldi, G.; Bagnato, C.; Bruzzone, L.; Ramos, S.; Hasenack, H.** 2022. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomass Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>
- Funk, C.; Peterson, P.; Landsfeld, M.; Pedros, D.; Verdin, J.; Shukla, S.; Husak, G.; Rowland, J.; Harrison, L.; Hoell, A. & Michaelsen, J.** 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2: 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gallego, F.; Sans, G.C.; Di Bella, C.M.; Tiscornia, G. & Paruelo, J.M.** 2023. Performance of real evapotranspiration products and water yield estimations in Uruguay. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101043. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101043>
- Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D. & Moore, R.** 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202: 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- MGAP-MA.** 2022. Uruguay, informe sobre la huella ambiental ganadera. Accesible en: Reporte Final Huella de la Ganadería en Uruguay | Ministerio de Ambiente (www.gub.uy)
- Staiano, L.; Gallego, F.; Altesor, A. & Paruelo, J. M.** 2022. Where and why to conserve grasslands socio-systems? A spatially explicit participative approach. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 820449.
- Zhang, Y.; Kong, D.; Gan, R.; Chiew, F.H.; McVicar, T.R.; Zhang, Q. & Yang, Y.** 2019. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017. *Remote sensing of environment*, 222: 165-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.031>

V. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

José Paruelo¹, Fiorella Cazzuli², Carlos Di Bella³

1. LA IDEA DE BUENAS PRACTICAS AGROPECUARIAS EN EL MARCO DE LAS TRANSICIONES AGROECOLÓGICAS

La sostenibilidad de la producción agropecuaria se ha convertido en un objetivo central tanto de la investigación científica como de la agenda política. La sostenibilidad no se puede medir *per se*, sino que se evalúa a través de la comparación con otros casos o sistemas. Como se mencionó en capítulos anteriores, los servicios ecosistémicos (SE) aparecen como uno de los marcos conceptuales a partir de los cuales evaluar la dimensión ambiental de la sostenibilidad.

La discusión de políticas públicas orientadas al uso del territorio rural requiere una mayor capacidad para evaluar la oferta, demanda y distribución social de los beneficios que proveen los ecosistemas a la sociedad. Lo anterior se vincula a la idea de intensificación sostenible, es decir, el aumento de la producción minimizando los impactos ambientales o a la idea de **Transiciones Agro-ecológicas**.

La capacidad de los sistemas agropecuarios de enfrentar cambios (climáticos, económicos, políticos, entre otros) depende de la construcción de «resiliencia» de dichos sistemas. La digitalización del sector y el uso de herramientas vinculadas a la inteligencia artificial (IA) y la minería de datos (MD) surgen como alternativas para contribuir a enfrentar estas crisis y construir resiliencia. «Agrotecnología» (AgTec) es una expresión

que engloba una amplísima gama de nuevas tecnologías que se aplican en el sector agropecuario con la finalidad de aumentar su eficiencia, su productividad y su sostenibilidad.

La construcción de resiliencia está asociada a fomentar la diversidad biológica, económica y cultural; el aprendizaje social a experimentar e innovar para poner a prueba la comprensión y a seleccionar, comunicar y aplicar las soluciones adecuadas. Estas soluciones están asociadas en el sector agropecuario a la idea de «Buenas Prácticas Agropecuarias» conocidas abreviadamente como «BPAs». Los movimientos CREA en Argentina y Uruguay han sido particularmente exitosos en construir capital social y legitimar buenas prácticas (Pacín y Oesterheld, 2014, 2015). Investigadores de INIA han liderado varios programas de co-innovación que buscan, a partir del trabajo conjunto con productores familiares, la implementación de BPA productivas y ambientales.

Las BPA hacen referencia a prácticas de manejo y gestión de predios que aumentan (o mantienen) la oferta de SE de regulación -por ej, el secuestro de C- y los de provisión -por ej, los kg de carne, los litros de leche o las toneladas de grano (ver Capítulo IV de esta serie técnica). En ocasiones las BPA no son percibidas como un cambio agroecológico, pero aun admitiendo que se trata de un punto controversial, las BPA pueden verse como una las etapas 1 y 2 de los niveles de conversión a Agroecosistemas Sostenibles (Transiciones Agroecológicas) que plantea Gliessman (2000) en su libro «Agroecología» (Cap. 22):

- Nivel 1: Aumentar la eficiencia de las prácticas y manejos agropecuarios convencionales para reducir el uso y el consumo de insumos costosos, escasos o perjudiciales para el ambiente.

¹ Ing. Agr. (MSc, PhD). Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

² Ing. Agr. (Mag, Mag, Dra). Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA.

³ Ing. Agr. (Dr). LART-IFEVA- Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información. Facultad de Agronomía (UBA y CONICET).

- Nivel 2: Sustituir los insumos, prácticas y manejos convencionales por prácticas alternativas.

La generación de BPA estuvo tradicionalmente, basada en la opinión de expertos; es decir, a través de un proceso en donde las prácticas a implementar se derivan del conocimiento y/o de la experiencia acumulados. En buena medida se deducen de evidencias/experiencias, tal como puede observarse en «BPA deducidas» en la Figura 1. El sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación (SCTI) tiene un papel muy importante en todo este proceso. La evaluación de BPA en plataformas experimentales tradicionales enfrenta grandes dificultades. En tal sentido el desarrollo de BPA enfrenta un desafío epistemológico: construir paquetes tecnológicos que satisfagan metas económicas y ambientales a partir de técnicas y manejos evaluados en condiciones controladas, o en algunos predios de referencia que operen en sistemas complejos adaptativos. Si bien estos dos abordajes pueden parecer antagónicos a simple vista, pueden ser complementarios.

Un camino complementario para las BPA es su «inducción» a partir del comportamiento de casos que ya operan en el territorio, en vez de su «deducción» a partir de la realización de experimentos controlados. De hecho, una de las premisas del manejo

adaptativo (Williams, 2011) es el monitoreo y análisis de casos de manejo existentes para lograr un proceso de aprendizaje en base a la evidencia. En este sentido, el análisis de las distintas dimensiones de los sistemas (biofísicas, productivas, de gestión y manejo) y de su desempeño productivo, económico y ambiental permitirá realizar una síntesis que identifique las combinaciones de factores que se asocia con distintos resultados. La lógica de la co-innovación ya mencionada o la conformación de grupos de productores que comparten experiencia contribuye a esta lógica.

La generación de BPA de manera inductiva (Figura 1) requiere de la colecta de los datos relevantes de la manera más ágil y en tiempo real y mecanismos que permitan su integración y la evaluación en términos de su desempeño. Estos mecanismos pueden ser informales, no sistemáticos o pueden formalizarse mediante técnicas de minería de datos o Inteligencia Artificial (IA). Estos mecanismos, los informales y los formales, deberían alimentar sistemas de soporte de decisiones que generen recomendaciones individualizadas en función del contexto particular. Claramente el involucramiento de productores en el registro del desempeño del predio y de las prácticas de manejo y gestión son aspectos clave en este sentido.

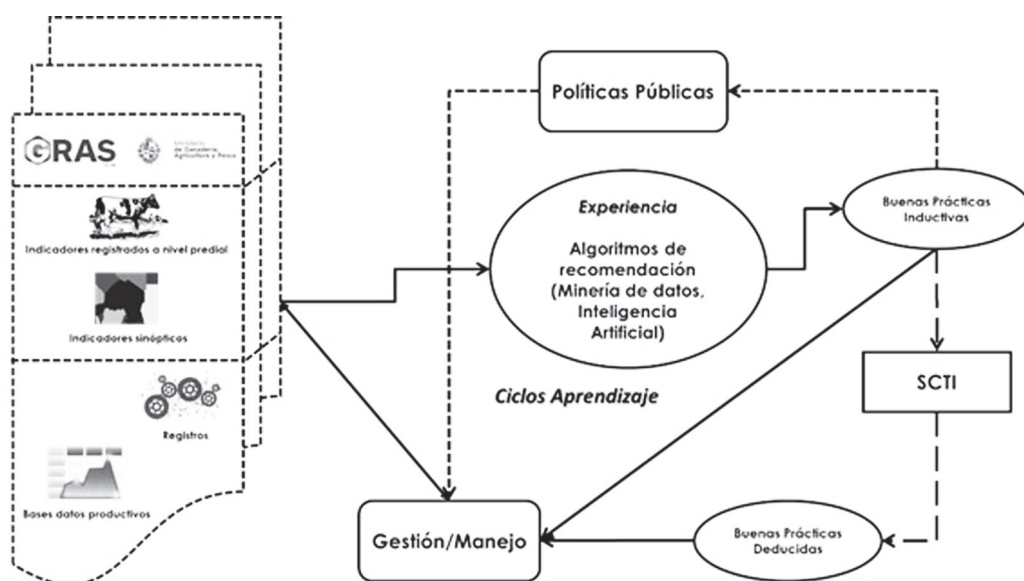


Figura 1. Proceso de deducción e inducción de Buenas Prácticas Agropecuarias.

El desarrollo de esquemas de «investigación participativa», «ciencia ciudadana» y procesos de «co-innovación» son caminos para involucrar e integrar a los distintos actores. La automatización de la colecta de datos, el uso de sensores remotos y el uso de técnicas de inteligencia artificial contribuyen a la eficiencia y eficacia de los ciclos de aprendizaje (Figura 1).

2. ¿CÓMO ACELERAR LOS PROCESOS DE APRENDIZAJE PARA LA GENERACION DE BPA?

La generación de ciclos de aprendizaje es un proceso muy bien establecido en la práctica de los productores agropecuarios. Existen algunos elementos que tienen un impacto muy alto, por ejemplo, el asociativismo y la co-innovación. En estos procesos y como ya se mencionó en la sección anterior, el objetivo es trascender lo estrictamente productivo/económico, buscando integrar en la caracterización del desempeño de predios agropecuarios la dimensión ambiental. Este aspecto es clave en el diseño de procesos de Transiciones Agroecológicas. Para esto es necesario la recopilación y sistematización a nivel predial de datos productivos, administrativos, de manejo, tecnológicos, organizativos, económicos, ambientales y de comercialización.

Los datos recopilados y los que se deriven de plataformas satelitales y modelos estarían disponibles en bases de datos geoespaciales como variables explicativas del desempeño productivo y ambiental. En sistemas ganaderos extensivos, por ejemplo, se enfatizará en datos asociados a la estructura del rodeo, manejo sanitario y reproductivo, índices reproductivos y producción de carne. Los casos recopilados -cuya unidad será el predio- permitirán generar modelos explicativos del desempeño ambiental y productivo.

A partir de los datos de cobertura del suelo generados en el proyecto MapBiomass (Vallejos et al., 2021, Baeza et al., 2022) y de otras fuentes (por ejemplo, mapas de comunidades de pastizales de pastizal, Lezama et al., 2019) es posible caracterizar la distri-

bución y diversidad de usos a nivel predial. A partir de tipos funcionales de ecosistemas (TFE) (Paruelo et al., 2001, Alcaraz-Segura et al., 2013) es posible describir la diversidad funcional de capa predio.

Para caracterizar el desempeño ambiental y cuantificar la oferta de SE de soporte se calculan las variables de funcionamiento ecosistémico y provisión de servicios ecosistémicos intermedios. A su vez, es posible estimar a nivel de cada uno de los predios la Apropiación Humana de la Productividad Primaria Neta (AHPPN). Las trayectorias de cambio de los últimos 20 años pueden analizarse como las tendencias temporales del índice de oferta de SE (IOSE) (ver Capítulo III). Estos indicadores sinópticos se complementan con aquellos derivados a nivel predial. Por ejemplo, en base a datos productivos se puede estimar un balance de nutrientes (N y P) y emisiones de metano usando el TIER 2 del protocolo del IPCC y modelos generados localmente (Becoña et al., 2020). Si bien es necesario trabajar en el desarrollo de indicadores, en Uruguay se dispone de antecedentes importantes en el registro a nivel predial para distintos sistemas. De esta recopilación se obtendría un conjunto de indicadores de desempeño ambiental (relevados a nivel predial o sinópticos) que complementan los indicadores de desempeño productivo y los registros de gestión y manejo del predio.

Los datos relevados deben ser organizados y la información de los predios digitalizada y georreferenciada en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta información debe complementarse con bases de datos climáticas y edáficas generadas a nivel nacional (Figura 1).

El ciclo de aprendizaje implica asociar el desempeño productivo y ambiental a la gestión (manejo y prácticas) implementada. Para vincular el conjunto de variables integradas en las bases de datos geoespaciales se puede utilizar un acercamiento basado en aprendizaje automático, o Redes Neuronales Artificiales. Previamente es necesario realizar un análisis de selección de las variables de mayor capacidad de explicar del desempeño. También pueden explorarse métodos más

recientemente basados en Redes Neuronales Artificiales Profundas o Deep Learning. Dada la estructura existente en los datos se ajustarán diferentes arquitecturas de redes.

La colecta de datos es clave para el diagnóstico de situaciones (combinaciones de factores) que maximice el desempeño productivo y ambiental. En tal sentido las plataformas de captura de datos y visualización de la información a distintos niveles (intra predial, predial, municipal, departamental, regional) y para distintos actores (productores, técnicos asesores y decisores políticos) son de gran utilidad. Trabajar en el desarrollo de sensores que automaticen la captura de información asociada al comportamiento de animales en pastoreo (localización, tiempo de rumia, número de bocados) y de la estructura de la vegetación (altura y heterogeneidad del canopeo) puede expandir sensiblemente las capacidades. El uso de sensores «vestibiles» en animales es camino muy promisorio para aumentar y mejorar la captura de datos en tiempo real. Esta aproximación enfrenta, no obstante, el desafío de integrar sensores con bajo consumo y capacidad de transmisión de los datos.

La capacidad de inducir BPA depende de contar con un número importante de casos sobre los que pueda operar el análisis. En tal sentido sería importante generar una plataforma regional interdisciplinaria e interinstitucional que avance en la captura de datos y su integración en sistemas que permitan la generación de BPA Inductivas. Esto permitiría: 1) categorizar y describir la diversidad y dinámica de los sistemas agropecuarios nacionales actuales, 2) capturar los patrones espacio-temporales a escala de predio agropecuario, 3) cuantificar las interacciones que determinan el desempeño del sistema, 4) cuantificar las compensaciones o «trade-offs» dentro de los sistemas rurales, 5) involucrar a los actores en la discusión de alternativas. Estos aspectos son la base para informar acciones efectivas para el diseño de innovaciones y buenas prácticas agrícolas fundadas en la evidencia y, consecuentemente, para el desarrollo de Transiciones Agroecológicas.

3. RELEVANCIA DEL ENFOQUE

El objetivo último de un sistema que compile información del desempeño productivo y ambiental y de la gestión y manejo de predios agropecuarios es la construcción de conocimiento novedoso para el manejo sostenible de los recursos naturales y la simultánea mejora en la eficiencia de producción predial. La sistematización y el análisis de los datos provistos por diversas organizaciones de productores es una base fundamental para comprender los compromisos entre las distintas dimensiones (productivo-económica, ambiental y social) que determinan el desempeño a nivel predial en áreas rurales de Uruguay. La combinación de esta información con una descripción del desempeño bajo diversas técnicas de manejo y gestión permitirá ajustar la definición de buenas prácticas para distintos sistemas productivos y una mejor definición de políticas públicas para el sector (Figura 1).

La experiencia y el conocimiento generados en este tipo de trabajos permitiría producir cambios en distintos procesos del sistema productivo. Para esto es necesario evaluar los impactos, vulnerabilidad, adaptabilidad y resiliencia de los sistemas socio-ecológicos, poniendo a disposición información para los tomadores de decisión. Así, se promueve una gestión del territorio que contemple el diseño de paisajes que garanticen el suministro de servicios ecosistémicos de provisión, regulación, culturales y de soporte de manera equilibrada en el tiempo, y una distribución equitativa de los beneficios y perjuicios que se generan en torno al uso del suelo.

La evaluación integral a nivel de predio del desempeño productivo y ambiental a partir de múltiples dimensiones o indicadores no solamente permite describir la heterogeneidad espacial sino también entender cómo interactúan las distintas variables que definen el desempeño. El nivel de análisis predial tiene un gran potencial en la planificación territorial ya que representa la unidad mínima a la que se toman las decisiones en el sector rural. Pese a la importancia de comprender los aspectos a escala de predio, con el consiguiente valor para los propios productores,

los estudios que analizan múltiples dimensiones a escala de predio en Uruguay son escasos (Evia y Sarandón, 2002, Albicette et al., 2009) o involucran una sola actividad productiva (Modernel et al., 2018).

4. BIBLIOGRAFÍA

- Albicette, M.; Brasesco, R. & Chiappe, M.** 2009. Propuesta de indicadores para evaluar la sustentabilidad predial en agroecosistemas agrícola-ganaderos del litoral del Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 13(1): 48-68.
- Alcaraz-Segura, D.; Paruelo, J.M.; Epstein, H.E. & Cabello, J.** 2013. Environmental and human controls of ecosystem functional diversity in temperate South America. *Remote Sensing*, 5(1): 127-154.
- Baeza, S.; Vélez-Martin, E.; De Abelleira, D.; Bancho, S.; Gallego, F.; Schirmbeck, J.; Veron, S.; Vallejos, M.; Weber, E.; Oyarzabal, M.; Barbieri, A.; Petek, M.; Guerra Lara, M.; Sarrailhé, S.S.; Baldi, G.; Bagnato, C.; Bruzzone, L.; Ramos, S.; Hasenack, H.** 2022. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomias Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>
- Becoña, G.; Ledgard, S.; Astigarraga, L.; Lizarralde, C.; Dieguez, F. & Morales, H.** 2020. EMAG-National model for evaluating environmental impacts of cattle production systems in Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 24(2): 1-19.
- Evia, G. y Sarandón, S.J.** 2002. Aplicación del método multicriterio para valorar la sustentabilidad de diferentes alternativas productivas en los humedales de la Laguna Merín, Uruguay. En: Sarandon, S. (Ed.). *Agroecología: El camino para una agricultura sustentable*. Ediciones Científicas Americanas, La Plata, Argentina. pp. 431-447.
- Gliessman, S.R.** 2000. *Agroecology: ecological processes in sustainable agriculture*. Engles, E. (Ed). Lewis Publisher, Florida, USA.
- Lezama, F.; Pereira, M.; Altesor, A. & Paruelo, J.M.** 2019. Grasslands of Uruguay: classification based on vegetation plots. *Phytocoenologia*, 49(3): 211-229. <https://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/DGRN/>
- Modernel, P.; Dogliotti, S.; Alvarez, S.; Corbeels, M.; Picasso, V.; Tiftonell, P. & Rossing, W.A.** 2018. Identification of beef production farms in the Pampas and Campos area that stand out in economic and environmental performance. *Ecological Indicators*, 89: 755-770.
- Pacín, F. & Oesterheld, M.** 2014. In-farm diversity stabilizes return on capital in Argentine agro-ecosystems. *Agricultural systems*, 124: 51-59.
- Pacín, F. & Oesterheld, M.** 2015. Closing the technological gap of animal and crop production through technical assistance. *Agricultural Systems*, 137: 101-107.
- Paruelo, J.M.; Jobbágy, E.G. & Sala, O.E.** 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems*, 4(7): 683-698.
- Vallejos, M.; Gallego, F.; Barbieri, A.; Bruzzone, S. & Baeza, S.** 2021. MapBiomias Pampa Sudamericano: una iniciativa trinacional para conocer los cambios en el uso y cobertura del suelo. *Revista INIA Uruguay*, no.65: 85-89. (Revista INIA; 65). (<https://pampa.mapbiomas.org/es>)
- Williams, B.K.** 2011. Adaptive management of natural resources—framework and issues. *Journal of environmental management*, 92(5): 1346-1353.

INIA Dirección Nacional

Avenida Italia 6201,
Ed. Los Guayabos,
Parque Tecnológico LATU.
Montevideo
Tel.: 2605 6021
inia@inia.org.uy

INIA La Estanzuela

Ruta 50, Km 11
Colonia
Tel.: 598 4574 8000
Fax: 598 4574 8012
iniale@le.inia.org.uy

INIA Las Brujas

Ruta 48, Km 10
Canelones
Tel.: 598 2367 7641
Fax: 598 2367 7609
inia_lb@lb.inia.org.uy

INIA Salto Grande

Camino al Terrible
Salto
Tel.: 598 4733 5156
Fax: 598 4732 9624
inia_sg@sg.inia.org.uy

INIA Tacuarembó

Ruta 5, Km 386
Tacuarembó
Tel.: 598 4632 2407
Fax: 598 4632 3969
iniatbo@tb.inia.org.uy

INIA Treinta y Tres

Ruta 8, Km 281
Treinta y Tres
Tel.: 598 4452 2023
Fax: 598 4452 5701
iniatt@tyt.inia.org.uy

www.inia.uy