



Foto: INIA

INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE UN PREDIO PILOTO DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA-GANADERO

Lic. Dr. Pablo Baldassini^{1,2}
Ing. Agr. PhD. Verónica Ciganda¹

¹Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA La Estanzuela
²LART, IFEVA, Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires y CONICET, Argentina

En este artículo se describen una serie de indicadores calculados para la evaluación de la sostenibilidad ambiental de un predio piloto del sistema de producción agrícola-ganadero utilizando información sistematizada de producción y manejo y datos derivados de muestreos de campo, sensores remotos y bases geospaciales. El trabajo se realizó en el marco de un proyecto interinstitucional que contó con la participación de INIA, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), el Instituto Plan Agropecuario (IPA) y la Sociedad Rural de Río Negro (SRRN).

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, desde distintos sectores de la sociedad se empezó a observar una creciente preocupación por el cuidado y protección de los recursos naturales. Esto ha derivado en una demanda creciente de "calidad ambiental" sobre los procesos de producción, materializado en distintas certificaciones y etiquetado

de los sistemas y de los productos agropecuarios. A su vez, las cadenas de valor, tanto de mercados locales como globales, son cada vez más exigentes respecto a la trazabilidad de los productos agropecuarios, con especial énfasis en los fitosanitarios aplicados. En este marco, la producción agropecuaria tiene el desafío de avanzar hacia sistemas productivos con alternativas sostenibles que garanticen la producción de alimentos

y la conservación de los ecosistemas, minimizando así los efectos negativos hacia el ambiente.

En este contexto, los indicadores de desempeño ambiental surgen como una alternativa rápida, objetiva y reproducible que permite analizar el estado actual y la tendencia temporal de diversas variables asociadas a una o varias dimensiones ambientales (e.g., agua, aire, suelo y biodiversidad) presentes en los sistemas de producción agropecuarios. En este trabajo se buscó evaluar la sostenibilidad ambiental de un predio piloto del sistema de producción agrícola-ganadero del litoral del país, mediante el cálculo de una serie de indicadores.

Estos indicadores fueron escogidos en base a su simplicidad y facilidad de cálculo, y se basaron en información reportada de la historia de uso a nivel de potrero y predio (i.e. secuencia de cultivos y pasturas utilizadas), de las prácticas de manejo (i.e. uso y dosis de fertilizantes y plaguicidas, composición del rodeo, carga y manejo pastoril) y de los resultados productivos (i.e. rendimientos), derivada de una encuesta predial realizada específicamente para tal fin.

Asimismo, se utilizó información derivada de muestreos de campo, datos provistos por sensores remotos a bordo de satélites y bases de datos geoespaciales. En este artículo se describen los aspectos más relevantes para el cálculo de cada uno de los indicadores (Cuadro 1) tanto a escala de potrero como de predio, se indica su desempeño general, y se discuten los resultados de algunos de ellos. Finalmente, se indican diferentes aspectos a considerarse en futuros trabajos orientados a extrapolar y escalar el análisis a otros predios y regiones del país.



Foto: Pablo Baldassini

Figura 2 - Muestreo de suelo hasta los 30 cm en 17 potreros del predio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en un predio bajo un sistema de producción agrícola-ganadero perteneciente a la Sociedad Rural de Río Negro (SRRN) y ubicado en ese departamento (Figura 1). Se calcularon un total de 16 indicadores basados en información recolectada a campo (8), en información de manejo y producción registrada y compartida por la SRRN (6) y en información provista por sensores remotos a bordo de satélites y base de datos geoespaciales (4) (Cuadro 1). Los muestreos de campo se realizaron entre setiembre y noviembre de 2022, se relevaron 17 potreros bajo distintos usos productivos (9 bajo uso agrícola-ganadero, 3 de campo natural, 3 de campo natural mejorado, y 2 verdes permanentes) (Figura 1).

En cada uno de los potreros se tomó una muestra compuesta de suelo en tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) (Figura 2) y en el laboratorio de INIA La Estanzuela se analizó el % de C, % de N, contenido de P-Bray, el potencial de mineralización de nitrógeno, pH y densidad aparente. Asimismo, se realizó una recorrida para el cálculo del Índice de Integridad Ecosistémica (IIE) y un relevamiento planialtimétrico para evaluar el cuidado del suelo. Además, se tomaron muestras superficiales de suelo y de agua en áreas aledañas a un curso de agua que atraviesa el predio para evaluar el efecto del uso y manejo del predio. Los valores obtenidos para cada indicador fueron escalados entre 0 y 1, considerando los valores mínimos y máximos registrados en todos los potreros analizados o considerando valores de referencia de la bibliografía o de la vegetación prístina circundante (50 km alrededor). Los valores más altos indican un buen desempeño del indicador, mientras que los más bajos indican lo contrario. De esta manera fue posible evaluar el desempeño a nivel de potrero y de predio a lo largo de distintas dimensiones ambientales.

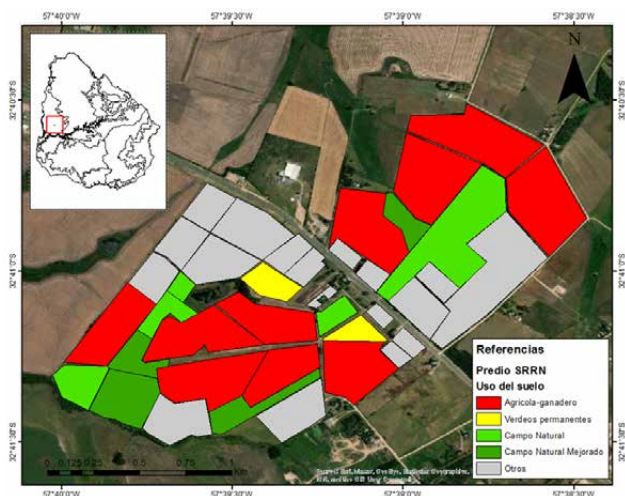


Figura 1 - Potreros muestreados pertenecientes al predio de la SRRN.

Cuadro 1 - Indicadores calculados a escala de potrero y/o predio. Para cada uno de ellos se indica una breve descripción y una explicación general de su determinación y modo de cálculo.

Indicador	Descripción	Determinación	Escala
Capacidad potencial de secuestro de Carbono (CPSC)	Se calculó la diferencia entre el stock de Carbono actual y el Carbono potencial o de saturación como una medida del potencial de secuestro.	El stock de Carbono actual se estimó mediante el análisis del %C y de la DAP de muestras tomadas a campo en tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm). El Carbono de saturación se estimó mediante la ecuación de Hassink & Whitmore (1997): Carbono saturación (g C kg ⁻¹ suelo) = 21.1 + 0.037 x arcilla (g arcilla kg ⁻¹ suelo).	Potrero
Eficiencia en el uso del Agua (EUA)	Medida de la degradación de tierras y de la desertificación (Le Houreou 1984), siendo el cociente entre la productividad primaria neta (PPN) y la precipitación.	La PPN de cultivos agrícolas se estimó a partir del rendimiento, mientras para pastizales se estimó mediante datos satelitales usando el modelo de Monteith (1972). Las relaciones PPN/PPNT se obtuvieron de bibliografía. La precipitación se obtuvo de TerraClimate.	Potrero
Emisiones de Metano (CH ₄)	Indica las emisiones absolutas del gas CH ₄ , producto de la fermentación ruminal de los bovinos, la gestión del estiércol y la excreción de sólidos volátiles.	Uso de ecuaciones del IPCC (2006) para la estimación de las emisiones de GEI en la producción ganadera e información del rodeo, discriminando categoría y peso animal, calidad del alimento consumido (energía digerible) y materia seca consumida.	Predio
Emisiones de óxido nitroso (N ₂ O)	Indica las emisiones directas causadas por la volatilización del nitrógeno en forma de N ₂ O de las deposiciones animales y provenientes de suelos manejados.	Se calcularon las emisiones anuales directas de N ₂ O mediante ecuaciones del IPCC (2006) considerando la cantidad anual de N proveniente de: 1) fertilizante sintético, 2) estiércol y orina animal, 3) residuos agrícolas, 4) mineralización.	Predio
Cuidado del suelo (ICS)	Indica la susceptibilidad a la erosión y se generó a partir del relevamiento planialtimétrico de cada potrero del predio.	Se tomó la superficie total de cada potrero con evidencia de realización de labores agrícolas a favor de la pendiente del paisaje respecto al total del área agrícola-ganadera. Este índice presenta valores entre 0 y 1.	Predio
Índice Integridad Ecosistémica (IIE)	Medida cuantitativa del estado ambiental de un sistema productivo (Blumetto et al. 2019). Combina cuatro componentes asociados con la capacidad de los ecosistemas para sustentar la producción, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.	Se calculó en base a recorridos de campo y el desempeño de cuatro componentes: la estructura de la vegetación, la diversidad de especies vegetales, el estado del suelo y de las áreas ribereñas. El Índice posee una escala del 1 al 5, donde 5 corresponde a la situación original del área antes de ser intervenida para la producción.	Potrero y predio
Índice de Oferta de Servicios Ecosistémicos (IOSE)	Es un indicador sinóptico de la oferta de SE de regulación y soporte relacionados con las dinámicas del Carbono y el agua, y la riqueza de aves (Paruelo et al. 2016).	El IOSE combina dos descriptores del funcionamiento ecosistémico: las ganancias totales de C y su variación estacional, estimados a partir del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) derivado de sensores remotos. Se calculó a partir de imágenes MODIS como: IOSE = NDVIpromedio * (1 - NDVIcv).	Potrero y predio
C potencialmente acumulable (CpaC)	Indica el potencial de secuestro de C (en T C/ha*año) que podría ser incorporado al stock de carbono orgánico del suelo. Se cuantificó estimando el aporte de C aéreo y subterráneo de cultivos y recursos forrajeros perennes.	Se calculó como la suma del C aéreo (rastrajo, material muerto) y subterráneo (raíces y exudados). Para el C aéreo de cultivos se consideró la PPN aérea excluyendo lo que se exporta (Índice de cosecha, IC). Para el C subterráneo se consideró la PPN subterránea y el exudado de raíces Cultivos = (C x PPNA x (1- IC)) + (C x PPNA x Bsub/BAéreo) x 1.65 Recursos forrajeros = (C x PPNA x (1- Consumo animal)) + (consumo animal x (1- digestibilidad)) + (C x PPNA x Bsub/BAéreo) x 0.65	Potrero
Diversidad espacial y temporal de cultivos	Mide la diversidad de coberturas naturales considerando los tipos presentes y su proporción relativa. Se calculó la diversidad espacial a nivel predial y la diversidad temporal a nivel de potrero.	Se utilizó el Índice de Shannon (H'), indicando los valores más altos una mayor diversidad. $H' = -\sum p_i * \log_2 p_i$	Potrero y predio

*Continúa en la página siguiente

Indicador	Descripción	Determinación	Escala
Rendimiento hídrico (RH)	Es una medida del agua que se pierde del sistema. Se calculó a partir de la ecuación de balance hídrico, como la diferencia entre las entradas y las salidas de agua al suelo.	Se calculó considerando el contenido de agua inicial en el suelo, la diferencia entre la precipitación y la ET y la capacidad de almacenaje del suelo. El RH anual se dividió por la precipitación anual para expresarlo en términos relativos.	Potrero
Acumulación y distribución de P superficial del suelo en zonas riparias	Medida del efecto del uso y manejo de la zona riparia sobre el gradiente de distribución del P y sobre la disponibilidad de este nutriente para ser perdido por escurrimiento.	Se marcaron tres transectas transversales al curso de agua dentro del predio, ubicadas al inicio, al medio y al final. Se tomaron tres muestras compuestas (0 - 2,5 cm profundidad) a los 0, 15 y 30 m del curso de agua. Se determinó P-Bray en laboratorio.	Predio
Contribución del sistema productivo a la calidad ambiental de los sistemas acuáticos	Medida del efecto del uso y manejo de la zona riparia sobre la calidad del curso de agua, indicada como el cambio en los valores de las variables registradas al ingreso y salida del predio.	Se tomaron tres muestras de agua, una en el punto de ingreso del curso de agua al predio, una en el medio del curso, y otra en el punto de salida. En laboratorio se determinó P-total y N total.	Predio
Carga de fitosanitarios (RIPEST)	Medida del riesgo ambiental asociado a la toxicidad de distintos pesticidas (herbicidas, insecticidas o fungicidas) y su dosis empleada (Ferraro <i>et al.</i> 2020).	El efecto es medido en Unidades de toxicidad (UT), indicando la toxicidad total para insectos y mamíferos. Se calculó a partir de las dosis individuales reportadas de los fitosanitarios aplicados.	Potrero y predio
pH	Permite evaluar potenciales procesos de acidificación debido a prácticas agrícolas y de manejo, los cuales pueden deberse a distintas causas (Álvarez <i>et al.</i> 2017).	Análisis en laboratorio de muestras tomadas a campo en tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) mediante mezcla suelo:agua en una relación 1:2,5.	Potrero
Resistencia a la penetración	Medida asociada a la pérdida de estructura y de porosidad del suelo, lo que genera una mayor resistencia al crecimiento radicular.	Se evaluó indirectamente a partir de la DAP determinada en muestras tomadas a campo en tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm). La DAP de referencia se estimó mediante el modelo de simulación SPAW (Saxton & Rawls 2006), a partir de valores de textura y %MO.	Potrero
Fertilidad del suelo	Indica la disponibilidad de P y N en el suelo comparando con umbrales de referencia.	Análisis en laboratorio P Bray y % de N de muestras tomadas campo en tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm).	Potrero

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desempeño ambiental varió según el uso del suelo, presentando mayoritariamente los potreros agrícola-ganaderos los valores más bajos para todos los indicadores (Figura 3). Las diferencias más importantes con los otros usos se observaron en el riesgo de toxicidad por pesticidas (Ripest), en la capacidad potencial para secuestrar Carbono (CPSC), en la diversidad temporal de coberturas (DivTemp) y en el pH del suelo (Figura 3). El campo natural (CN) mejorado mostró los mejores desempeños en gran parte de los indicadores, seguido por el CN y los verdeos permanentes (Figura 3).

El campo natural (CN) mejorado mostró los mejores desempeños en gran parte de los indicadores, seguido por el CN y los verdeos permanentes.

A nivel de predio, los indicadores mostraron un desempeño alto de la oferta de servicios ecosistémicos (IOSE) y en la concentración de N en el agua ([N] agua), intermedio del índice de Integridad Ecosistémica

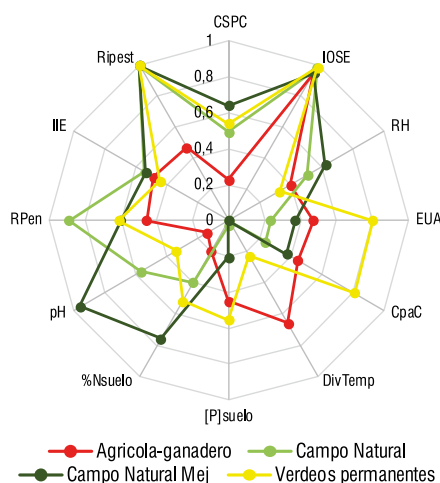


Figura 3 - Indicadores calculados a nivel de potrero y escalados de 0 a 1. El gráfico muestra el desempeño para 12 indicadores promedio por uso (Campo Natural, Campo Natural Mejorado, Verdeos permanentes y Agrícola-ganadero).

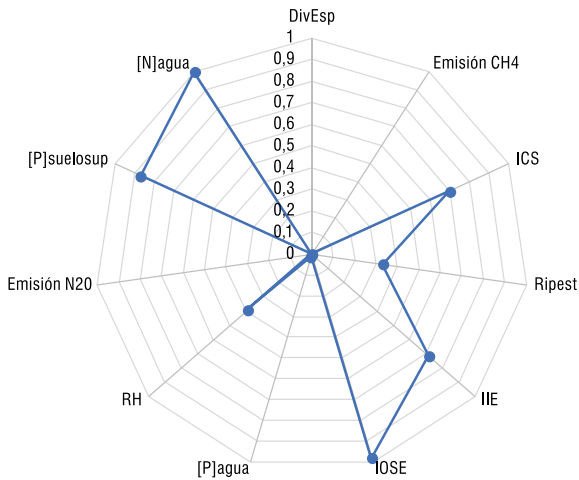


Figura 4 - Indicadores calculados a nivel de predio y escalados de 0 a 1. Los indicadores de diversidad espacial (DivEsp), emisión de CH₄ y emisión de N₂O no fueron escalados al no disponer de valores de referencia.

(IIE), del índice de Conservación de Suelo (ICS) y de la concentración de fósforo en el suelo superficial en zonas riparias ([P]suelosup), y bajo del riesgo de toxicidad por pesticidas (Ripest) y de la concentración de fósforo en el agua ([P]agua) (Figura 4).

Los potreros bajo uso agrícola-ganadero mostraron la mayor capacidad potencial de secuestrar Carbono (CPSC) (Figura 3), mostrando las mayores diferencias entre el stock actual de Carbono y el potencial alcanzable (Figura 5). Llamativamente, dichos potreros también mostraron mayor capacidad potencial de acumular Carbono (CpaC) que los campos naturales. Esta relación podría estar asociada con la historia de uso pasada que con las actividades actuales. Así, manejos pasados pudieron llevar a reducir el stock de Carbono actual del suelo, mientras que los manejos recientes más adecuados aún no pudieron compensar dichas pérdidas.

Los resultados derivados del análisis integral de los indicadores ambientales calculados sugieren la importancia de incluir en los sistemas productivos más de un cultivo por año (o, en su defecto, del uso de cultivos de cobertura o de servicios) y de integrarse con la ganadería, tanto de manera espacial (i.e., a nivel predial) como temporal (i.e., a nivel de potrero), con el fin de generar planteos productivos sostenibles que permitan mantener los niveles de producción junto con la preservación de las propiedades del sistema y la provisión de servicios ecosistémicos.

CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados derivados de cada indicador fueron comparados con valores de referencia reportados en

Es importante incluir más de un cultivo por año (o en su defecto, el uso de cultivos de cobertura o de servicios), así como integrar la ganadería en estos sistemas.

la bibliografía, calculados a partir funciones y modelos que requieren información de determinados atributos o propiedades del sistema, o derivados de situaciones de referencia de la vegetación prístina (i.e. pastizales) ubicada en áreas circundantes. Dependiendo del tipo de indicador, la referencia más adecuada puede variar. Para algunos (e.g., diversidad espacial y temporal de coberturas del suelo), en cambio, resulta difícil establecer un valor umbral, dado que no se reportan en la bibliografía ni pueden tomarse de la vegetación prístina circundante. Por lo tanto, la evaluación del desempeño de dicho indicador, en un potrero o predio particular, será posible en la medida en que se pueda comparar contra el desempeño de otros potreros o predios aledaños, y su interpretación estará sujeta al grado de asociación que presente con otros indicadores. En este trabajo en particular, la diversidad temporal mostró una correlación negativa significativa (valor- $p < 0.05$) con el %N en el suelo, el pH y el riesgo de toxicidad por pesticida, asociado principalmente al desempeño de dichos indicadores en potreros agrícola-ganaderos.

El cálculo de gran parte de los indicadores evaluados supone la necesidad de contar con información registrada y detallada de los usos y prácticas de manejo de cada uno de los potreros que componen

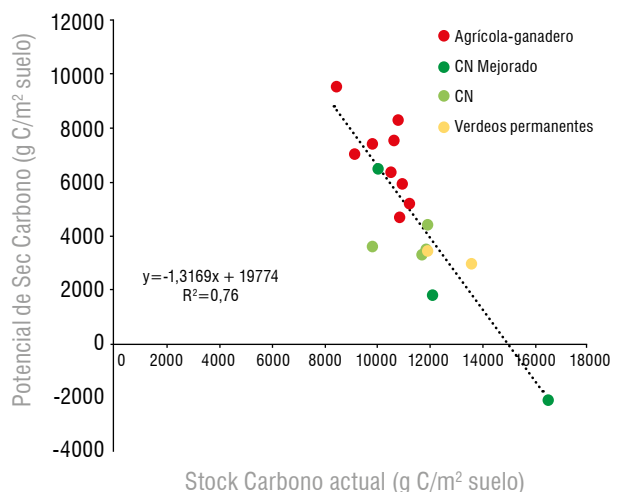


Figura 5 - Relación entre el potencial de secuestro de Carbono y el stock de Carbono actual (en g C/m²).

el predio, tanto para el cálculo del indicador (e.g., carga de fitosanitarios, emisiones de CH₄), como así también para su interpretación, siendo así clave para la evaluación ambiental. Esta información debería ser lo más detallada posible, por lo que se recomienda que al menos se registre a nivel de zafra, y para un periodo de tiempo lo más extenso posible. Del mismo modo, disponer de información espacialmente explícita sobre la delimitación y extensión del predio, y de cada uno de los potreros que lo componen, es un requisito fundamental para su incorporación en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y su integración con bases de datos geoespaciales.

La extrapolación y escalabilidad del cálculo de estos indicadores a otros predios y regiones del país es de particular interés para el logro de una evaluación integral del sector agrícola ganadero y dependerá del tipo de indicador a utilizar. Aquellos basados en información reportada por los productores respecto a la historia de usos, las prácticas de manejo y los resultados productivos, junto con aquellos que pueden ser calculados a través de información derivada de sensores remotos y bases de datos geoespaciales, presentan una mayor capacidad de escalamiento respecto a aquellos que necesariamente deben ser calculados a partir de mediciones realizadas a campo y/o a partir de análisis de laboratorio (e.g., Carbono orgánico del suelo, pH, índice de integridad ecosistémica, etc.). Este proceso, sin embargo, aumentaría la información disponible, lo que permitiría analizar más certeramente la correlación entre indicadores y evaluar la redundancia entre ellos. De esta manera, se podría avanzar en seleccionar aquellos que provean información de un determinado aspecto con el menor esfuerzo logístico y de recursos económicos.



Figura 6 - Potrero bajo uso agrícola-ganadero muestreado a campo en setiembre de 2022.

Algunos indicadores evaluados permiten caracterizar el estado actual de un potrero o predio, mientras que otros tienen la capacidad de integrar una mayor parte de la historia de uso. Así, el muestreo de suelos y la determinación del %C da cuenta del contenido actual de Carbono, mientras que algunos indicadores basados en información derivada de sensores remotos y base de datos geoespaciales (e.g., IOSE, rendimiento hidrológico) pueden ser calculados para una serie de años previos (desde el año 2000), y analizar cambios en el tiempo.

Esto permitiría caracterizar la trayectoria temporal de ese potrero o predio, independientemente de su estado actual. Sin embargo, es importante considerar que para la caracterización del desempeño de ciertos potreros o predios mediante el uso de esta información, se debe tener en cuenta que la unidad mínima de medida (definida a partir del tamaño del píxel) no trascienda los límites espaciales de los mismos. De esta manera, la adecuada caracterización de ciertos potreros o predios dependerá de su superficie y de la forma o distribución espacial que presenten.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente a la SRRN, por hacer disponible el predio de estudio y la información necesaria, al IICA por financiar la investigación y gestionar los recursos necesarios, así como al IPA por sus aportes y sugerencias. Agradecemos también los trabajos realizados por Silvana Schaffner y Michel Koolhaas, y la contribución del equipo INIA: Claudia Simón, Emiliano Barolin, Héctor (Lalo) Vergara y todo el equipo del Laboratorio de Suelos y Aguas de La Estanzuela.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, R. (2017). Fertilidad de suelos y fertilización en la Región Pampeana.
- Blumetto, O., Castagna, A., Cardozo, G., García, F., Tiscornia, G., Ruggia, A., ... & Albin, A. (2019). Ecosystem Integrity Index, an innovative environmental evaluation tool for agricultural production systems. *Ecological indicators*, 101, 725-733.
- Ferraro, D. O., Duarte Vera, A. C., Pessah, S., & Ghersa, 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.
- Hassink, J., & Whitmore, A. P. (1997). A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil science society of America Journal*, 61(1), 131-139.
- IPCC (2006). guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan.
- Le Houérou, H. N. (1984). Rain use efficiency: a unifying concept in arid-land ecology. *Journal of arid Environments*, 7(3), 213-247.
- Monteith, J. L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of applied ecology*, 9(3), 747-766.
- Paruelo, J. M., Texeira, M., Staiano, L., Mastrángelo, M., Amdan, L., & Gallego, F. (2016). An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *Ecological indicators*, 71, 145-154.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.