



Foto: Lucía Salvo

MODELACIÓN DEL BALANCE DE CARBONO Y NITRÓGENO EN EL SUELO Y GASES DE EFECTO INVERNADERO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS Y GANADEROS

Ing. Agr. M.Sc. PhD. María Virginia Pravia¹, Ing. Agr. MSc. Dra. Lucía Salvo², Ing. Agr. MSc. Santiago Álvarez³, Ing. Agr. Dr. Sebastián R. Mazzilli^{3, 4}, Ing. Agr. MSc. PhD. J. Andrés Quincke⁴, Ing. Agr. MSc. Sara Riccetto¹, Ing. Agr. MSc. PhD. Verónica S. Ciganda⁴, Ing. Agr. Dr. Oswaldo Ernst³, Ing. Agr. PhD. José A. Terra¹, Ing. Agr. PhD. Armen R. Kemanian⁵

¹Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA Treinta y Tres, Uruguay, ²Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Udelar, Montevideo, Uruguay, ³Facultad de Agronomía, Udelar, Paysandú, Uruguay, ⁴Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay, ⁵Plant Science, Pennsylvania State University, University Park, PA, US

La calibración local de modelos biofísicos de agroecosistemas contribuye al desarrollo de herramientas para: 1) la estimación cuantitativa de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de las existencias de carbono en el suelo en sistemas de producción con intensidad variable en cuanto al uso y manejo del suelo; 2) dar apoyo a los reportes nacionales de inventarios de GEI en el ámbito internacional; y 3) brindar soporte para la toma de decisiones y la generación de políticas públicas de manejo y conservación de suelos.

INTENSIFICACION AGRÍCOLA Y MODELOS BIOFÍSICOS DE AGROECOSISTEMAS

En Uruguay la superficie agrícola registró un aumento importante en las últimas décadas a expensas del área dedicada a pasturas, mientras que la soja aumentó su frecuencia en las rotaciones, aumentando la presión sobre los recursos naturales.

La creciente intensificación de los sistemas agrícolas, que se constata tanto a nivel local como global, plantea el desafío de aportar soluciones y herramientas para el diseño de sistemas productivos sostenibles.

Las políticas nacionales acompañaron este proceso de intensificación, solicitando la presentación de planes de uso y manejo responsable de suelos.

Estos planes se enfocan en el diseño de secuencias agrícolas que tengan niveles de erosión hídrica estimadas por debajo de los límites de tolerancia como estrategia de conservación de los suelos. Sin embargo, hay incertidumbre respecto a si la implementación de los planes de uso es suficiente para reducir las pérdidas de carbono orgánico del suelo. Además, Uruguay ratificó acuerdos internacionales comprometiéndose a presentar reportes periódicos nacionales de las emisiones de GEI y las existencias de carbono orgánico del suelo. Por lo tanto, es necesario disponer de herramientas validadas a nivel nacional que permitan estimar y modelar la dinámica de carbono (C), nitrógeno (N) y emisiones de GEI bajo diferentes escenarios agrícolas.

Los modelos de simulación de agroecosistemas resultan herramientas útiles al resumir matemáticamente el funcionamiento de los mismos. En tal sentido, representan de manera cuantitativa el estado del arte del conocimiento, y contribuyen a mejorar la comprensión de procesos que se dan en el suelo y su interacción con el crecimiento y desarrollo de cultivos y pasturas.

En Uruguay, se han utilizado modelos de diferente nivel de complejidad y estructura para simular la dinámica de C y N en el suelo. Los modelos AMG, CENTURY, DayCent y Cycles (Baethgen *et al.*, 2003, 2021; Rubio *et al.*, 2014; Pravia *et al.*, 2019) fueron utilizados de acuerdo con distintos objetivos específicos. En particular, el modelo Cycles (Kemanian *et al.* 2024) ha sido validado en Uruguay, con buenos resultados para la simulación de la evolución del carbono orgánico del suelo en rotaciones de largo plazo de la Unidad Experimental de Palo a Pique (Pravia *et al.* 2019).

Para 20 años de simulación, las estimaciones realizadas por el modelo en los primeros 15 cm de suelo, tuvieron un error (RMSE) de 4,7 Mg C/ha, similar al obtenido por el modelo estadístico utilizado en los datos observados. Ese trabajo incluyó la calibración de parámetros para el crecimiento de 13 especies forrajeras y cultivos.

El modelo Cycles está basado en procesos y permite estudiar en detalle los balances de carbono y nitrógeno. Puede simular rotaciones de cultivos, cultivos de cobertura y forrajeros, asociaciones de cultivos, y pasturas multi-específicas, contemplando los efectos de las prácticas de manejo sobre procesos biogeoquímicos. Es capaz de simular múltiples cultivos y capas de suelo a lo largo de los años, a paso diario y con paso sub-diario para el componente hidrológico. La posibilidad de trabajar con un paso sub-diario es sumamente relevante para la simulación de la infiltración de agua en el suelo, específicamente para la simulación de las condiciones ambientales para la producción de óxido nitroso (N₂O), uno de los principales GEI por su alto potencial de calentamiento global.

MODELANDO EXPERIMENTOS DE LARGO PLAZO (ELP)

Con el objetivo de dar continuidad en la calibración y validación del modelo Cycles, se utilizaron datos de campo de diferentes experimentos de larga duración en el país, evaluando los resultados de la estimación de la evolución del stock de C, N y N₂O realizada por el modelo. Este trabajo contó con el apoyo de ANII (proyecto FMV_3_2020_1_162660) y fue llevado adelante por un equipo de trabajo interinstitucional de INIA, Fagro-Udelar y MGAP. Los experimentos utilizados se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro 1 - Experimentos de largo plazo (ELP) de rotaciones agrícola-ganaderas y sus contrastes utilizados en este proyecto.

ELP, su ubicación, año de inicio y (período simulado)	Suelo	Labranza	Sistemas contrastados
“Rotaciones Viejas” del ELP “José Lavalleja Castro” en INIA La Estanzuela (Colonia). 1963 (2007-2021)	Brunosol Éútrico Típico con textura franco-arcillo-limosa	Agricultura continua en laboreo hasta 2007-2009 y luego en siembra directa	Rotaciones de distinta proporción cultivo:pastura (0 % y 50 %)
Rotaciones de la Unidad Experimental INIA “Palo a Pique”, (UEPP, Treinta y Tres). 1995 (1995-2021)	Argisoles y Planosoles de textura franca, prácticamente sin historia agrícola	Sistemas en siembra directa desde el inicio del ELP	Agricultura continua, rotación larga de cultivos-pasturas, pastura permanente
Rotaciones agrícola-ganaderas en siembra directa (Fagro-EEMAC, Paysandú). 1993 (2003-2013)	Brunosol Éútrico, franco arcilloso	Siembra directa y con laboreo	Rotaciones cultivo-pastura y de agricultura continua donde los cultivos de verano eran C3 o C4
Agricultura continua en siembra directa (Fagro-EEMAC, Paysandú) 2007. (2007-2020)	Brunosol Éútrico franco limoso	Siembra directa	Monocultivo de maíz o de soja



Figura 1 - Vista de los ELP utilizados: **A)** Tratamientos de laboreo convencional y siembra directa en las rotaciones de la EEMAC. **B)** Vista de una de las parcelas del ELP de rotaciones de INIA La Estanzuela donde se observan las cámaras de medición de emisiones de N_2O . **C)** Vista aérea del ELP rotaciones de INIA Palo a Pique.

Durante el proceso de trabajo, se recopiló una gran cantidad de registros generados en los ELP, incluyendo las operaciones culturales, rendimientos de cultivos y pasturas, análisis de suelo, etc. Esta información se incorporó en una misma base de datos, unificándose así su formato de entrada. La consolidación de esta base de datos es un producto importante de este trabajo conjunto entre instituciones, de mucho valor para la calibración y validación de diferentes tipos de modelos de simulación.

Para el uso del modelo Cycles se extrajo el historial de manejo de cada ELP, enfocándose especialmente el trabajo de simulación en los contrastes y periodos de tiempo en los cuales se tuviera información de emisiones de GEI, así como la información del estado inicial de los suelos en cuanto a sus propiedades físicas y químicas. También se contó con información agroclimática registrada en las estaciones meteorológicas de cada ELP.

RESULTADOS

Rendimiento de los cultivos

En función de los objetivos y alcances de este trabajo, los rendimientos de los cultivos fueron simulados adecuadamente, aunque en términos generales se observa una sobrestimación de éstos (Figura 2). Esta diferencia en el ajuste entre los datos observados y modelados podría deberse al poco detalle de registros

La creciente intensificación de los sistemas agrícolas, plantea el desafío de aportar soluciones y herramientas para el diseño de sistemas productivos sostenibles.

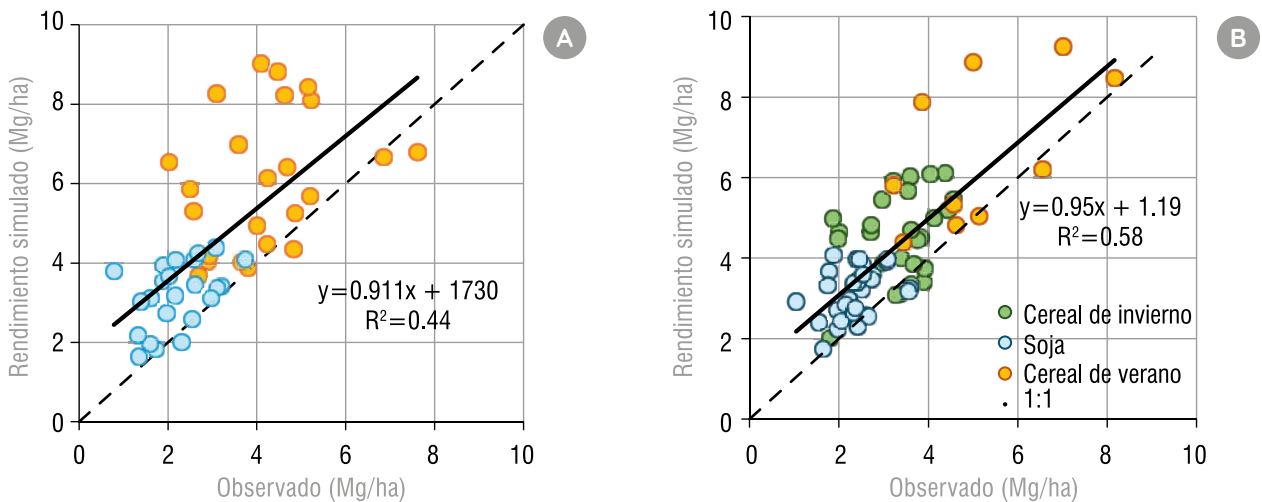


Figura 2 - Rendimiento de grano observado y simulado en los ELP de: **A)** INIA Palo a Pique y **B)** Fagro-EEMAC.

fenológicos para cada cultivo, así como la ocurrencia de plagas o enfermedades que reducen el crecimiento del cultivo y que no pueden ser captadas en la simulación.

La correcta simulación del crecimiento y rendimiento de los cultivos y pasturas resulta fundamental para la estimación del balance de carbono y nitrógeno. Es a partir de los residuos vegetales que se aproximan las entradas de carbono al suelo y de nitrógeno proveniente tanto de la absorción de nitrógeno del suelo como de la fijación biológica vía leguminosas. Por lo tanto, un mayor detalle en los registros fenológicos de los cultivos podría mejorar las estimaciones.

Carbono orgánico en el perfil del suelo

En términos generales, el stock de carbono acumulado en el horizonte superficial del suelo fue adecuadamente simulado para los distintos ELP con un bajo error relativo

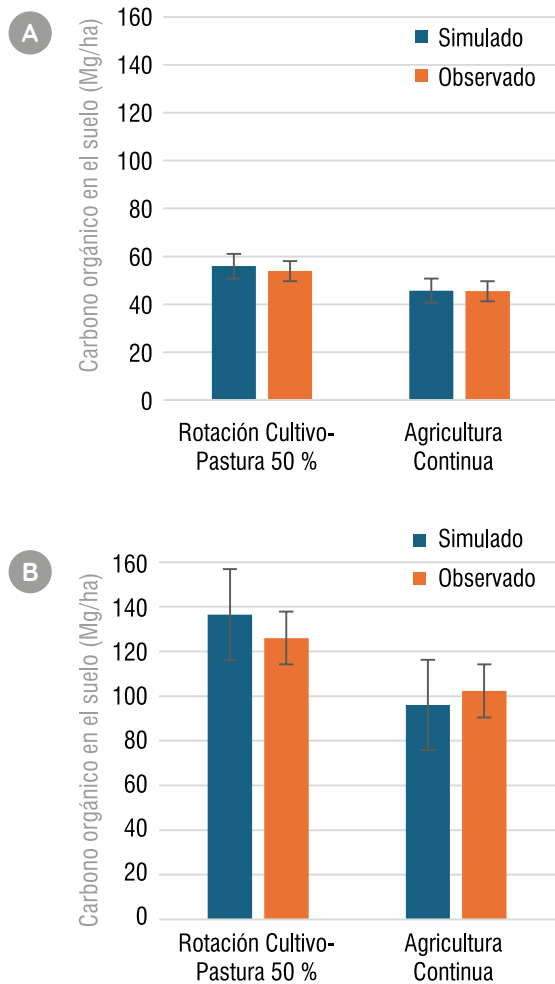


Figura 3 - Stock de carbono final simulado y observado en el ELP de “Rotaciones Viejas, José Lavalleja Castro”. Rotación Cultivo-pastura 50 %: Rotación de 3 años de cultivos y 3 años de pasturas, Agricultura Continua: rotación de cultivos continuos con fertilización. **A)** estrato de 0 a 20 cm de suelo. **B)** acumulado hasta los 100 cm de profundidad.

Los modelos de simulación de agroecosistemas son herramientas que resumen matemáticamente su funcionamiento y contribuyen a mejorar la comprensión de diversos procesos.

(rRMSE 7 a 11 %), con estimaciones dentro del rango de variación de las observaciones. El modelo realizó una buena aproximación del carbono almacenado en el suelo al final del período simulado en cada caso, captando las principales diferencias entre los sistemas de producción y sus cambios en el tiempo.

En las capas subsuperficiales se observó una mayor variabilidad de los resultados. En algunos de los ELP, esto puede deberse a menor detalle en la información de entrada. En la Figura 3 se muestran como ejemplo los resultados del stock de carbono observado y simulado en el ELP de “Rotaciones Viejas” de INIA La Estanzuela.

Emisiones de óxido nítrico

La mineralización de materia orgánica, la fertilización y la demanda de nitrógeno de las plantas, junto con el régimen hídrico determinan el contenido de nitrógeno mineral en la solución del suelo, que resulta clave para la ocurrencia de emisiones de óxido nítrico.

En términos generales, el modelo copió relativamente bien las emisiones acumuladas y el patrón de emisiones de N₂O durante el periodo evaluado en el ELP de la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC) por Salvo y Bayer (2014) y por Ciganda *et al.* (2022) en el ELP de INIA La Estanzuela. Sin embargo, los picos de emisión fueron subestimados (Figura 4).

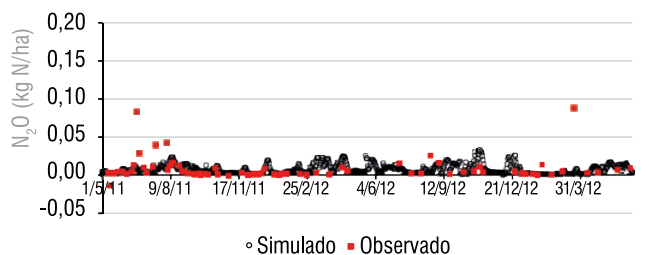


Figura 4 - Emisiones de N₂O observadas (Salvo y Bayer, 2014) y simuladas para el sistema de cultivo continuo en siembra directa del ELP EEMAC-Fagro.

CONSIDERACIONES FINALES

El modelo es útil para proyectar los cambios del carbono almacenado en el suelo debido al manejo, sobre todo en las capas superficiales del suelo.

Se debe profundizar el trabajo para mejorar el ajuste, contando con mayor detalle de información para la fenología de los cultivos, y las capas del suelo subsuperficiales.

En cuanto al ciclo de N, el modelo resultó promisorio para la estimación de emisiones de N_2O acumuladas. En una siguiente etapa, se requiere avanzar en el análisis de la información del stock de nitrógeno en el suelo.

Los siguientes pasos deberían incluir el estudio de casos en chacras seleccionadas considerando sus correspondientes planes de uso y manejo de suelos, donde los primeros avances realizados en acuerdo con la Dirección General de Recursos Naturales - MGAP sobre chacras en lomadas del este muestran resultados promisorios.

REFERENCIAS

Baethgen, W. Utilización del modelo Century para estudiar la dinámica de carbono y nitrógeno In: MORON, A.; DIAZ, R. (Eds). Simposio 40 años de rotaciones agrícolas - ganaderas, 2003. Montevideo (Uruguay): INIA, 2003. p. 9-18 (INIA Serie Técnica; 134).

Baethgen, W.E., Parton, W.J., Rubio, V., Kelly, R.H. and M. Lutz, S., 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), pp.423-437.

Ciganda, V.; Simón, C.; Alecrim, F.; Mariotta, J.; Silva, L.; Barolin, E.; Vergara, H.; Soulier, G.; Qunicke, A. 2022. Efecto mitigador de los sistemas de rotación con pasturas sobre las emisiones del gas de efecto invernadero óxido nítrico (N_2O). *Revista INIA Uruguay*, Diciembre 2022, no.71, p. 48-53. (Revista INIA; 71). [Acceda AQUÍ](#)

Kemanian, A.R., Shi, Y., White, C.M., Montes, F., Stöckle, C.O., Huggins, D.R. Cangiano, M.L., Faé, G. S., Rozum, R. K. N. 2024. The cycles agroecosystem model: Fundamentals, testing, and applications. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 227, Part 1, 2024, 109510, ISSN 0168-1699. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109510>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.11.001>

Rubio, V.; Sawchik, J.; Ernst, O.; Quincke, A.; Siri, G. 2014. Calibración/validación del modelo AMG para simular la evolución del stock de carbono orgánico en suelos del Uruguay [Documento en línea]. Sociedad Uruguaya de Ciencia del Suelo y Rama Uruguaya de la Organización Internacional de Investigación en Laboreo del Suelo (ISTRO). En: 1° Congreso Uruguayo de Suelos 2014-VI. Encuentro de la SUCS. "Intensificando el conocimiento del suelo y medio ambiente para producir más y mejor". Colonia del Sacramento, Uruguay. ISBN 978-9974-99-587-1.

Salvo L, Bayer, C. 2014. Fluxos e balanço de gases de efeito estufa em solo do Uruguai afetado por sistemas de manejo. 127 h. Tesis de Doctorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2014. <http://hdl.handle.net/10183/97845>



Foto: Lucía Salvo

Figura 5 - Cámaras de flujo de N_2O instaladas en la EEMAC.