



Foto: Sebastián Bogliacino

Experimento de rotaciones de largo plazo, INIA La Estanzuela.

USO DE MODELOS DE SIMULACIÓN PARA EVALUAR LOS CAMBIOS EN EL CONTENIDO DE CARBONO EN EL SUELO

Ing. Agr. PhD Walter Baethgen¹,
Ing. Agr. MSc Valentina Rubio²

¹Columbia University, Vicepresidente de INIA
²Programa de Investigación en Cultivos de Secano,
Programa de Investigación en Producción
y Sustentabilidad Ambiental

El balance de carbono en el suelo es un indicador de la sostenibilidad de los sistemas de producción. Los modelos de simulación, basados en el conocimiento científico sobre la dinámica de carbono de los suelos, permiten realizar proyecciones sobre su evolución en el tiempo y espacio. En este artículo se presentan los principales resultados de la calibración y el uso del modelo Century para las condiciones de Uruguay, utilizando datos de diferentes sistemas de rotación del experimento de largo plazo de INIA La Estanzuela.

INTRODUCCIÓN

El contenido de carbono (C) del suelo determina su calidad física, química y biológica y establece su capacidad de brindar diferentes servicios ecosistémicos. Dentro de estos servicios de destacan la producción de alimentos y fibras, la regulación de la cantidad y calidad del agua, y el mantenimiento de la biodiversidad. Así, el balance de C es un indicador de la sostenibilidad de los sistemas de producción: los

sistemas que no son capaces de mantener o aumentar la cantidad de C en el suelo son insostenibles en el largo plazo. Por otro lado, los suelos pueden jugar un rol fundamental en el secuestro de C y contribuir a la mitigación del cambio climático. En este sentido uno de los grandes retos de los sistemas productivos actuales es la identificación de prácticas de manejo que mantengan o aumenten las reservas de C en los agroecosistemas, sosteniendo o incrementando su productividad y contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

Un desafío para utilizar el balance de C como indicador de sostenibilidad es que los cambios observados en el C del suelo son muy lentos y se requieren muchos años para poder evidenciar sus variaciones así como los impactos que causan. Esta es una de las razones por las que los experimentos de largo plazo son tan valiosos. INIA cuenta con una serie de experimentos de largo plazo, entre ellos el más longevo de América Latina, en el que desde el año 1963 se ha realizado un monitoreo continuo del contenido de C del suelo. Esto nos brinda una oportunidad única para entender la dinámica de C en nuestros suelos.

Sin embargo, establecer experimentos de largo plazo para evaluar todas las posibles condiciones de suelo, clima y evaluar muchas prácticas de manejo es simplemente imposible, y es ahí donde los modelos de simulación cumplen un rol fundamental. Los modelos de simulación, basados en el conocimiento científico sobre los mecanismos que regulan la dinámica de C de los suelos, permiten realizar proyecciones sobre la evolución de C en el tiempo y espacio. De esta manera, la calibración de estos modelos, utilizando información generada en experimentos de largo plazo, es fundamental para evaluar la sostenibilidad de diferentes sistemas de producción.

En este artículo se resumen algunos de los principales mensajes del trabajo publicado en el Soil Science Society of America Journal (Baethgen *et al*, 2021) donde se reportan los resultados de la calibración y el uso del modelo Century para las condiciones de Uruguay.

METODOLOGÍA

En nuestro trabajo, la calibración y validación del modelo Century fue realizada utilizando datos observados en el experimento de largo plazo de INIA La Estanzuela generados entre 1963 y 2015. A grandes rasgos los sistemas de rotación (CS) seleccionados para este estudio fueron:

- 1) CS-1: rotación continua de cultivos anuales sin fertilización;
- 2) CS-2: rotación continua de cultivos anuales fertilizados con N y P;
- 3) CS-5: rotación de cultivos y pasturas perennes con 50% del tiempo bajo cultivos y 50% bajo pasturas;
- 4) CS-4: con 37% de tiempo bajo pastura de trébol rojo y raigrás y 63% bajo cultivos anuales hasta 1983. Luego de 1983, la rotación estuvo 67% del tiempo bajo pasturas (trébol rojo en algunos años y la misma mezcla de pasturas perennes), y 33% del tiempo bajo cultivos anuales.

Los cultivos de invierno utilizados fueron: lino (hasta 1974), cebada y trigo, mientras que los cultivos de verano incluyeron sorgo, girasol, maíz y soja.

Los sistemas que no son capaces de mantener o aumentar la cantidad de carbono en el suelo son insostenibles en el largo plazo.

Las pasturas perennes consisten en una mezcla de festsuca, trébol blanco y raigrás.

Resultados

El modelo Century simuló adecuadamente la dinámica del C en las condiciones de Uruguay para los cuatro sistemas de rotación contrastantes seleccionados a lo largo de 53 años (Figuras 1 y 2).

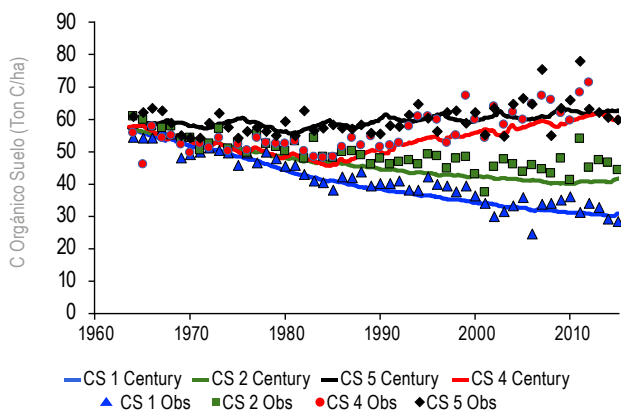


Figura 1 - Carbono en el suelo observado (puntos) y simulado (líneas) para cuatro sistemas de rotaciones.

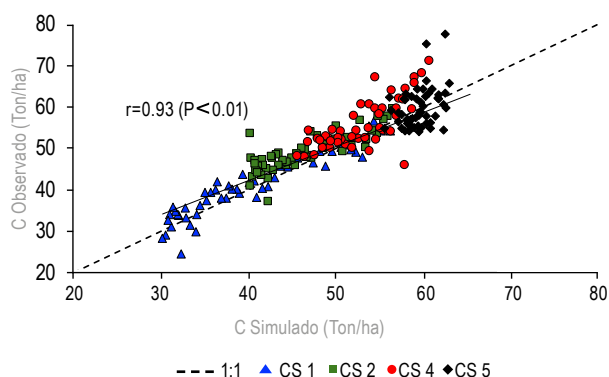


Figura 2 - Comparación del Carbono en el suelo observado y simulado para cuatro sistemas de rotaciones.

La utilización de este modelo nos permite entender mejor los procesos determinantes de los balances de C, cuantificando las principales pérdidas y entradas de C al suelo. En este sentido, se cuantificó el porcentaje de pérdidas de C por erosión y respiración microbiana para tres sistemas. La rotación que incluyó pasturas perennes alternando con cultivos anuales presentó un balance neto positivo de C (0.13 Ton C/ha-año), mientras que las rotaciones sin pasturas resultaron en pérdidas netas de 0.30 y 0.52 Ton C/ha-año (rotaciones fertilizadas y no fertilizadas, respectivamente) (Figura 3).

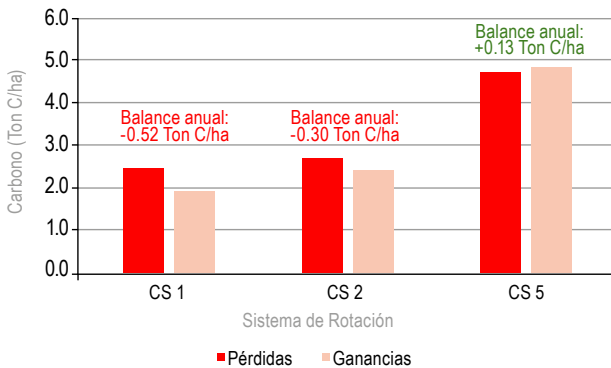


Figura 3 - Pérdidas totales, ganancias totales y balance anual promedio de carbono en el suelo para tres sistemas de rotaciones (promedio de 1963 – 2015).

La inclusión de pasturas duplicó las entradas de C al suelo: en el CS-5 las entradas fueron 4.84 Ton C/ha-año, mientras que en el CS-1 y CS-2 (sin pasturas) las mismas fueron 1.93 y 2.39 Ton C/ha-año, respectivamente. Sin embargo, y como era de esperar, la mayor parte del C que entró al suelo (de las pasturas y de los cultivos) se perdió en forma de CO₂ durante la descomposición de los residuos vegetales por parte de los microorganismos del suelo (respiración) y por lo tanto no es retenido en el suelo en el largo plazo (Figura 4).

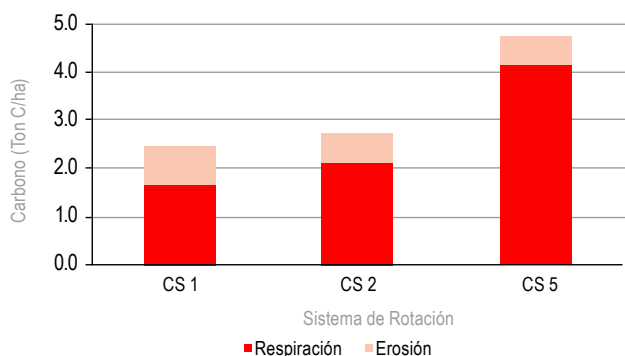


Figura 4 - Pérdidas anuales de carbono en el suelo (Ton C/ha-año) para tres sistemas de rotaciones (promedio de 1963 – 2015).

Una de las ventajas de los sistemas con pasturas es que reducen el riesgo de erosión. En los sistemas sin pasturas las pérdidas de C por erosión fueron el 34% (rotación sin fertilizar) y el 21% (rotación con fertilización) de las pérdidas totales de C. Mientras tanto, en la rotación con pasturas dicho valor fue 13% (Figura 4). La erosión en los sistemas CS-2 y CS-5 fue similar debido a que la preparación del suelo para la siembra de pasturas hasta el año 2008 se realizaba con laboreo convencional o vertical. En estas condiciones la cama de siembra para las pasturas requería varias pasadas de maquinaria aumentando los riesgos de erosión, demostrando que el exceso de laboreo puede eliminar parcialmente los beneficios de las pasturas.



Foto: Ernesto Restaino

Figura 5 - Los sistemas con pasturas tienen un menor riesgo de erosión, lo que favorece la conservación del carbono en el suelo.

El modelo Century también se utilizó para estimar el contenido de C en el suelo en su estado prístino y este valor estimado fue 70 Ton C/ha. Conocer los contenidos de C del suelo en condiciones prístinas tiene gran importancia para entender el potencial de secuestro de C de nuestros suelos.

El modelo permite evaluar diferentes variables asociadas a la sostenibilidad de los sistemas de producción. Las rotaciones que incluyen mayor proporción de tiempo bajo pasturas presentaron un mejor desempeño.

Al momento de instalar el experimento, el suelo contenía 58 Ton C/ha, es decir que el manejo anterior del suelo había resultado en una pérdida de un 20% de su contenido de C original. Luego de 53 años de aplicar la rotación CS-5 el suelo presentó un leve aumento en el nivel C en el suelo (9% más que al inicio del experimento, y 12% menos de C que en la situación prístina), el CS-2 perdió casi un 30% del valor inicial del experimento (y 40% menos del C que en la situación prístina), y el CS-1 perdió el 45% del contenido inicial del experimento (más de la mitad del C en la situación prístina).

Los resultados de este trabajo hubieran sido muy diferentes si las pérdidas por erosión del suelo se hubieran reducido desde el comienzo del experimento. Por ejemplo, si se hubiera disminuido la erosión a la mitad, el CS-2 hubiera resultado en un balance de C casi neutro, y en el CS-5 las entradas netas de carbono hubieran sido tres veces más altas.

Simulación de escenarios

Uno de los usos más valiosos de modelos de simulación calibrados y validados es evaluar los impactos esperados para diferentes escenarios tales como cambios en las tecnologías de producción, variaciones en el clima o cambios en el uso del suelo. La evaluación de estos escenarios permite predecir los impactos de diferentes prácticas de manejo sobre el balance de C y por lo tanto puede contribuir al diseño de sistemas productivos sostenibles.

Para demostrar el potencial de uso de esta herramienta se muestra un resumen de los resultados publicados donde exploramos los cambios esperados en la dinámica del C en el suelo cuando se cambia la proporción del tiempo en el que una rotación se encuentra bajo pasturas y bajo cultivos anuales. Estos escenarios son relevantes para Uruguay, donde el aumento en el precio de granos ha resultado en un crecimiento del área dedicada a cultivos y a una consiguiente reducción del tiempo bajo pasturas en los sistemas de rotación.

En nuestro análisis de escenarios evaluamos los cambios esperados en el balance de C en el suelo al variar la proporción del tiempo bajo cultivos y bajo pasturas, y al introducir cultivos de cobertura. Evaluamos cinco escenarios corriendo el modelo Century por 85 años y partiendo de dos situaciones iniciales contrastantes: (a) el suelo degradado luego de más de 50 años de cultivos anuales en CS-2; y (b) el suelo menos degradado con cultivos en rotación con pasturas, CS-5. Partiendo de estas dos situaciones se evaluaron cinco escenarios:

- CCont: cultivos anuales continuos (100% del tiempo bajo cultivos anuales).
- C9P3: nueve años de cultivos anuales alternando con tres años de pasturas (75% del tiempo con cultivos).

- C6P3: seis años de cultivos anuales alternando con tres años de pasturas (67% del tiempo con cultivos).
- C3P3: tres años de cultivos anuales alternando con tres años de pasturas (50% del tiempo con cultivos).
- CC: utilizando una secuencia de cinco cultivos anuales y dos cultivos de cobertura en ciclos de cuatro años.

Los cultivos utilizados en todos los escenarios fueron: maíz y soja en verano, y trigo y cebada en invierno, mientras que los cultivos de cobertura fueron gramíneas anuales (avena, centeno). En todos los escenarios se utilizaron siembra directa y fertilización de N y P según necesidades.

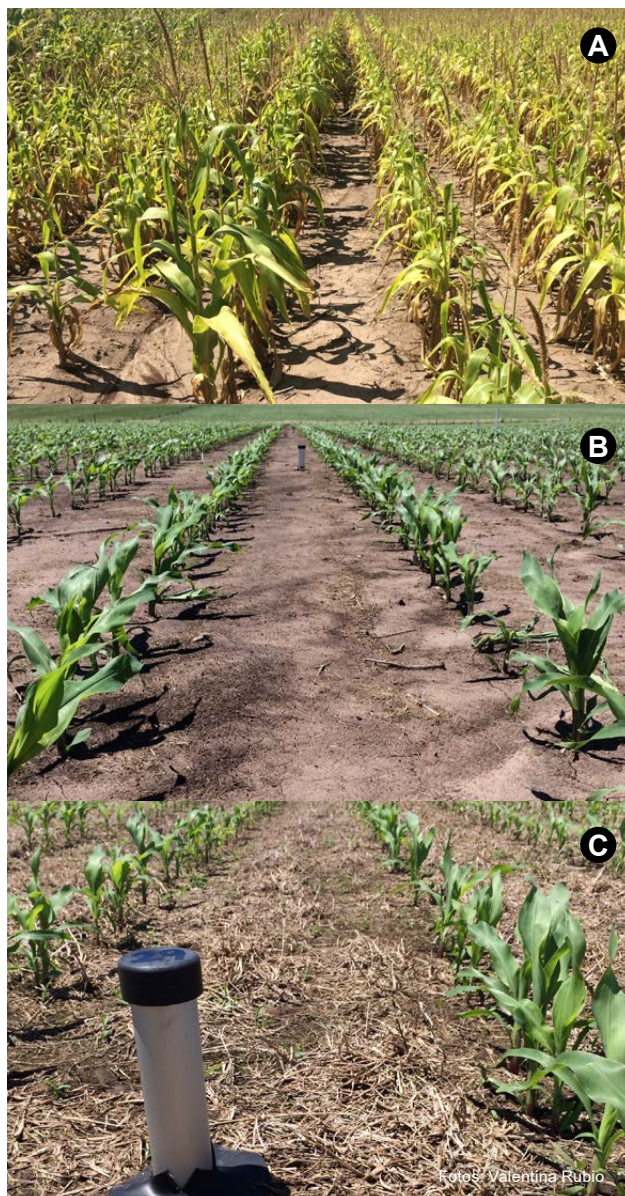


Figura 6 - A) CS-1: rotación continua de cultivos anuales sin fertilización; B) CS-2: rotación continua de cultivos anuales fertilizados con N y P; C) CS-5: rotación de cultivos y pasturas perennes con 50% del tiempo bajo cultivos y 50% bajo pasturas.

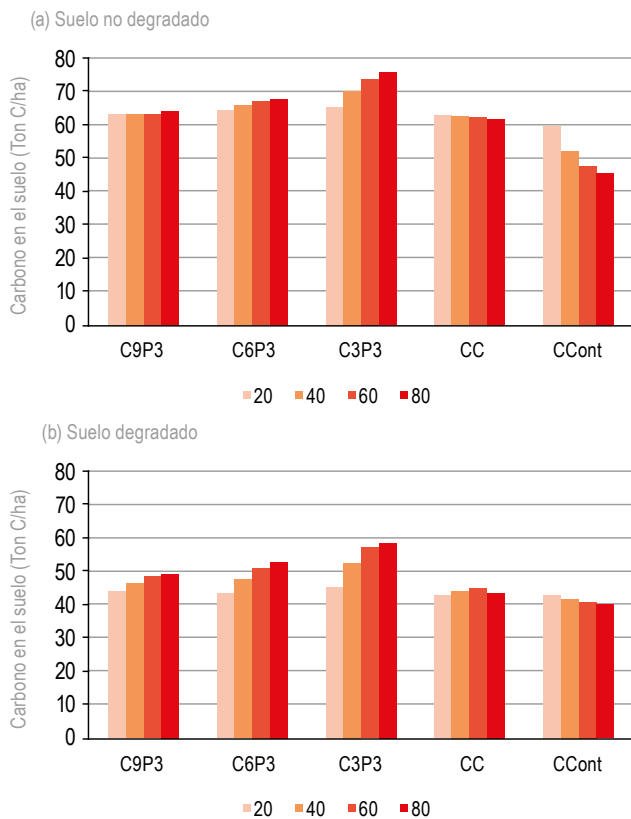


Figura 7 - Cambio en el contenido de carbono en suelo después de 20, 40, 60 y 80 años de rotación partiendo de: (a) un suelo no degradado, y (b) un suelo degradado.

En el suelo menos degradado, al continuar con una rotación de tres años de cultivos alternando con tres años de pasturas (C3P3 en la Figura 7) por 85 años, el C en el suelo aumentó 0.17 Ton C/ha-año, y después de 40 años superó el contenido de C del suelo en la condición prístina. Al pasar a una rotación con ciclos de seis años con cultivos y tres años de pasturas (C6P3), el C en el suelo también aumentó pero a una tasa casi tres veces menor (0.06 Ton C/ha-año), y al alternar nueve años de cultivos con tres de pasturas (C9P3) el contenido de C en el suelo permaneció prácticamente constante. El C en el suelo también permaneció prácticamente constante cuando se utilizó una secuencia que incluyó cuatro cultivos anuales y dos cultivos de cobertura en ciclos de cinco años (CC). Finalmente, el C en el suelo cayó rápidamente (pérdidas de 0.24 Ton C/ha-año) cuando se sembraron cultivos anuales en forma continua (CCont) es decir, sin alternar con pasturas

Partiendo de un suelo degradado, el modelo muestra que, en base a una rotación con tres años de cultivos y tres años de pasturas, el suelo necesita más de 80 años para recuperar el carbono perdido durante 53 años de experimento.



Figura 8 - Perfil de suelo; el contenido de carbono del suelo determina su calidad física, química y biológica y establece su capacidad de brindar diferentes servicios ecosistémicos.

ni con cultivos de cobertura (Figura 7a). Partiendo del suelo más degradado (Figura 7b), la rotación con tres años de cultivos y tres años de pasturas resultó en un aumento en el contenido de C en el suelo a una tasa de 0.23 Ton C/ha-año. Es decir, esta rotación necesitó más de 80 años para que el suelo recuperara el C que había perdido a lo largo de los 53 años de experimento. Las rotaciones de seis y nueve años de cultivos alternado con tres años de pasturas resultaron en aumentos de C en el suelo a tasas menores (0.15 y 0.09 Ton C/ha-año), y la rotación con cultivos de cobertura mantuvo el valor de C en el suelo. La rotación que incluyó solamente cultivos anuales (sin pasturas y sin cultivos de cobertura) presentó una baja tasa de pérdida de C en el suelo y prácticamente también mantuvo el bajo contenido de C inicial.

CONCLUSIONES

El modelo Century resulta una herramienta útil para la evaluación del impacto de diferentes prácticas de manejo en los balances de C. La incorporación de este tipo de herramientas en el diseño de sistemas agrícolas puede contribuir a seleccionar prácticas con mayor impacto en la sostenibilidad de los sistemas. Los resultados de los escenarios evaluados en este trabajo resultan promisorios en cuanto a la capacidad del modelo Century para cuantificar los cambios de C de los suelos al alternar cultivos anuales de alta productividad con pasturas y con cultivos de cobertura.

ARTÍCULO ORIGINAL

Baethgen, W. E.; W. J. Parton; V. Rubio; R. H. Kelly; S. Lutz. 2021. Ecosystem dynamics-of crop pasture rotations in a fifty year field experiment in Southern South America: Century model and field results. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*. 85(2):423-437 <https://doi.org/10.1002/saj2.20204>.