

Informe final publicable de proyecto

Modelación del balance de C y N en el suelo y gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas y ganaderos

Código de proyecto ANII: FMV_3_2020_1_162660

Fecha de cierre de proyecto: 01/07/2024

PRAVIA NIN, Maria Virginia (Responsable Técnico - Científico)

CIGANDA BRASCA, Veronica Solange (Investigador)

MAZZILLI VANZINI, Sebastián Ramón (Investigador)

QUINCKE WALDEN, Juan Andrés (Investigador)

SALVO ALVAREZ, Lucía (Investigador)

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA. INIA TREINTA Y TRES (Institución Proponente) \\\

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE AGRONOMÍA \\\

MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN GENERAL DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES \\\

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA. INIA TREINTA Y TRES

Resumen del proyecto

La intensificación de los sistemas agrícolas para atender la creciente demanda mundial de alimentos y energía incrementa la presión sobre los recursos naturales, planteando el desafío global de aportar soluciones y herramientas para el diseño de sistemas productivos sostenibles. 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, cuestionando la sostenibilidad de los sistemas. Las políticas nacionales acompañaron este proceso de intensificación, exigiendo la presentación de planes de uso y manejo responsable de suelos (PUMS), enfocados al control de la erosión. Sin embargo, estos planes no consideran explícitamente el balance de carbono (C) y nitrógeno (N) orgánico del suelo, ni las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Al mismo tiempo, Uruguay ratificó acuerdos internacionales comprometiéndose a presentar reportes periódicos nacionales de las emisiones de GEI y existencias de C orgánico del suelo (Cs). Existe entonces la necesidad de profundizar y disponer de herramientas validadas para la estimación de estos balances a nivel nacional. En este proyecto se utilizó información de diferentes experimentos de largo plazo existentes en el país para profundizar en la calibración y validación local del modelo biofísico Cycles, evaluando los balances de C, N y GEI. Luego, se aplicó esta herramienta para casos de estudio seleccionados sobre chacras comerciales, considerando sus correspondientes PUMS. Conformando un equipo interinstitucional, los resultados de este proyecto contribuyen al desarrollo de herramientas para: i) la estimación cuantitativa de emisiones GEIs y Cs en sistemas de producción con intensidad variable en cuanto al uso y manejo del suelo; ii) dar apoyo a reporte de GEIs y Cs de compromisos asumidos internacionalmente; y iii) el soporte de la toma de decisiones y generación de políticas públicas de manejo y conservación de suelos.

Ciencias Agrícolas / Agricultura, Silvicultura y Pesca / Ciencias del Suelo / modelos de simulación

Palabras clave: balance de carbono orgánico en el suelo / simulación / ciclos biogeoquímicos /

Antecedentes, problema de investigación, objetivos y justificación.

ANTECEDENTES

El carbono orgánico del suelo (Cs) representa un pilar fundamental para el desarrollo de la agricultura sustentable. Es el principal indicador de la calidad del suelo y su potencial productivo, afectando las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y la biósfera. La retención de nutrientes en la materia orgánica del suelo y su disponibilidad para las plantas a través del ciclo del carbono (C) constituye la base para el manejo de nutrientes hacia una agricultura sostenible sobre principios ecológicos (Drinkwater et al., 2008). Las emisiones gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), constituyen ineficiencias para el sistema, siendo pérdidas en el ciclo de C y N al igual que las pérdidas de nutrientes por lixiviación. Para avanzar hacia la intensificación sustentable de los sistemas agrícolas y agrícolas pastoriles, resulta fundamental ahondar en estudios que permitan comprender mejor el ciclo del C y N, atendiendo especialmente estas pérdidas al ambiente.

A escala global, el suelo contiene la mayor reserva terrestre de carbono (Schlesinger y Bernhardt, 2013). Pequeños cambios en el contenido de C del suelo y en sus flujos desde y hacia la atmósfera, podrían implicar que los suelos representen una importante fuente o sumidero de C, afectando la concentración de dióxido de carbono de la atmósfera y por lo tanto el clima (Lal, 2004). La idea de que los suelos y la agricultura puedan representar al mismo tiempo soluciones para problemas globales como el cambio

climático, la falta de seguridad alimentaria y la polución ambiental, da lugar a varias iniciativas internacionales que apuntan hacia la conservación y el incremento del Cs (Lal, 2016). En particular, el acuerdo de París compromete a los países firmantes como Uruguay a realizar esfuerzos voluntarios con el objetivo de limitar el incremento de la temperatura global por debajo de los 2°C respecto de la era preindustrial, y continuar sus esfuerzos para limitarlo a 1.5°C. Para esto, los países deben presentar periódicamente sus inventarios nacionales de GEI, dando cuenta del compromiso de realizar acciones locales para conservar y aumentar los sumideros y reservorios de GEI a través de las llamadas Contribuciones Nacionales Determinadas (NDC) a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Sin embargo, uno de los principales desafíos es la falta de datos locales sobre las tasas logrables de retención de carbono asociadas a diferentes prácticas de manejo y usos de la tierra. Para elaborar los Inventarios Nacionales de GEI, los métodos más refinados (Tier3, IPCC, 2006) prevén la utilización de modelos de simulación para estimar el balance de C y GEI.

Un modelo de simulación de agroecosistemas resume esquemáticamente el funcionamiento de los sistemas utilizando ecuaciones. Representado de manera cuantitativa el estado del arte del conocimiento científico, resultan excelentes herramientas para mejorar la comprensión de procesos que se dan en el suelo y en el crecimiento y desarrollo de cultivos y pasturas.

En Uruguay, modelos de diferente nivel de complejidad y estructura han sido utilizados para simular la dinámica de C y N en el suelo. Los modelos AMG, CENTURY, Day-Cent y Cycles (Baethgen et al., 1994; Baethgen et al., 2000; Baethgen, 2003; Pravia, 2009; Rubio et al., 2014; Pravia et al., 2019) fueron utilizados de acuerdo con distintos intereses específicos.

En particular, el modelo Cycles ha sido validado en Uruguay, con buenos resultados para la simulación de la evolución del Cs en rotaciones de largo plazo de la Unidad Experimental de Palo a Pique (Pravia et al 2019). Para 20 años de simulación, las estimaciones en los primeros 15 cm de suelo el modelo obtuvo un error de 4.7 Mg C ha⁻¹ a⁻¹, similar al modelo estadístico de las observaciones a campo. Este trabajo incluyó la calibración de parámetros para el crecimiento de 13 especies forrajeras y cultivos. Sin embargo, no se contó con datos de campo para evaluar los resultados del balance de N y GEI estimado por el modelo. La calibración y validación del modelo utilizando otros experimentos en el país que contengan esta información, permitiría utilizarlo para estimar el balance de C, N y las emisiones de GEI de diversos sistemas de producción.

Siendo un modelo basado en procesos, el modelo Cycles permite estudiar en detalle estos balances. Puede simular rotaciones de monocultivos, cultivos de cobertura y forrajeros, asociaciones de cultivos, y pasturas multi-específicas, contemplando los efectos de las prácticas de manejo sobre procesos biogeoquímicos (Kemanian et al. 2022). 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. Varios de sus módulos tienen su raíz en CropSyst (Stöckle et al. 2003) y C-Farm (Kemanian y Stöckle 2010). El crecimiento de las plantas en Cycles se basa en la eficiencia de uso de radiación y transpiración (Stöckle et al. 2008), cuyos módulos empalman con el ciclo de C y N en el suelo (Kemanian et al. 2005; Kemanian y Stöckle 2010; White et al. 2014), la infiltración de agua y su redistribución. El transporte de agua y energía se basa en algoritmos adaptados de Campbell (1985). El ciclaje de C y N se basa en algoritmos que contemplan la teoría de saturación de carbono (Hassink and Whitmore, 1997; Kemanian & Stöckle, 2010; Pravia et al., 2019), y permiten simular las pérdidas de N₂O (Saha et al , 2017).

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 N₂O. Además, se trata de un modelo en pleno crecimiento y expansión de uso. Recientemente se ha desarrollado una versión del modelo a escala de paisaje, Cycles-L, que simula el transporte de agua y nutrientes a través de la superficie del terreno, en profundidad y su descarga en cursos de agua, permitiendo el estudio de estos procesos a escala de paisaje (Shi et al., 2023).

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El carbono orgánico es un importante indicador de la calidad del suelo y de la sostenibilidad de los agroecosistemas a nivel local. A escala global, el secuestro de carbono orgánico del suelo (Cs) es una alternativa para mitigar el cambio climático. Los sistemas de producción presentan entonces el desafío de mantener y/o aumentar las reservas de Cs y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). A nivel país se han asumido compromisos internacionales para contribuir con la mitigación del cambio climático. A nivel internacional, los modelos de simulación pueden ser utilizados para elaborar los Inventarios Nacionales de GEI a presentar ante la CMNUCC.

La calibración y validación de un modelo que simule la dinámica de Cs, N y GEI para las condiciones edafoclimáticas generales del país, permitiría evaluar el impacto que generan distintas alternativas de uso y manejo de suelos, conocimiento fundamental en la búsqueda de una intensificación sostenible de los sistemas agrícolas. En términos de política públicas, Uruguay viene recorriendo un camino reconocido internacionalmente en relación a la conservación de los suelos. El mismo está enfocado al control de la erosión a través de la exigencia de presentación de los planes de uso y manejo responsable de suelos (PUMS). Sin embargo, no hay un monitoreo del balance de Cs, ni de las emisiones de GEI en las diferentes rotaciones propuestas en dichos PUMS. Esto podría realizarse a través del uso de modelos adaptados a nuestras condiciones, que simulen la evolución de estas variables de interés.

Para evaluar el funcionamiento de los modelos biofísicos de simulación en condiciones edafo-climáticas específicas, debe realizarse su calibración y validación. En este sentido, los experimentos de largo plazo (ELP) son una herramienta fundamental. Uruguay cuenta con un conjunto de ELP que proveen una fuente de información única para evaluar el impacto de diferentes prácticas de manejo en la evolución del Cs y GEI. Se dispone de datos con alta frecuencia de registros de Cs, incorporándose recientemente registros de GEI (Salvo y Bayer, 2014; Ciganda et al 2022).

Sin embargo, la información sobre ELP no había sido sistematizada en forma conjunta y si bien hasta el momento se habían realizado estudios puntuales utilizando modelos de simulación de Cs y N, los mismos no contemplaban la validación de estimaciones de flujos de GEI. Además, estos trabajos habían sido aislados, ya que hasta el momento no se contaba con un grupo de investigadores trabajando en forma conjunta a nivel nacional en la modelación de agroecosistemas y sus externalidades. Para avanzar en este aspecto, el presente proyecto conformó un equipo de investigadores de distintas instituciones para comenzar a encarar este desafío en forma conjunta, trabajando sobre una base de datos con el nivel de detalle y sistematización necesaria. Esta base de datos se podría continuar construyendo con información sistematizada en este formato, complementando la información existente en los ELP de rotaciones de cultivos y pasturas en el país. La interacción interinstitucional es una pieza fundamental para avanzar de forma coordinada sobre este camino iniciado anteriormente por esfuerzos aislados.

OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto fue utilizar información generada en experimentos de largo plazo para profundizar en la comprensión de los ciclos biogeoquímicos del C y N a través del modelo de biofísico Cyles.

Durante este proceso, se propuso identificar componentes y/o procesos de los ciclos biogeoquímicos de C y N que requirieran necesidades específicas de investigación para una mejor estimación de los balances de C, N y GEI de los sistemas de producción del país, contribuyendo así al desarrollo de herramientas para el soporte a la toma de decisiones y generación de políticas públicas de manejo y conservación de suelos.

Se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Sistematizar la información generada y del manejo de los experimentos de larga duración a ser utilizados para la calibración y validación del modelo de simulación.
- Calibrar, y validar las estimaciones del balance de C y N en el suelo y emisión de GEI en sistemas agrícolas y agrícolas-ganaderos para el modelo Cycles.
- Evaluar el impacto de la implementación de los PUMS, y de posibles manejos alternativos, con relación a los cambios en el C y N del suelo y emisión de gases de efecto invernadero en diferentes condiciones edafo-climáticas.
- Fortalecer las capacidades de recursos humanos existentes en la utilización y manejo del modelo de simulación en estudio.

JUSTIFICACIÓN

La calibración y validación de un modelo biofísico de simulación para las condiciones edafoclimáticas de Uruguay brinda la posibilidad de contar con herramientas para cuantificar el impacto que tienen diferentes sistemas agrícolas en el balance del Cs, N y flujo de GEI. Estos podrían ser utilizados en distintos ámbitos de toma de decisiones.

A nivel de gobierno podrían usarse para elaborar los reportes periódicos que Uruguay debe presentar en el ámbito internacional sobre las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC). A partir del estudio de casos de PUMS implementados y exigidos a nivel nacional por el MGAP, se podría estimar el balance de Cs de distintos sistemas. Ponderando el área ocupada por éstos, se obtendría una aproximación más ajustada para los reportes de NDC bianuales. Virtualmente, en un futuro se podrían llegar a modelar todos los PUMS existentes.

La aplicación de un modelo ajustado y validado para las condiciones de nuestro país permitiría complementar la información brindada por los PUMS, agregando información sobre el balance del stock de Cs y N, así como de las emisiones de GEI de los suelos agrícolas. Esto constituirá una evaluación más integral de dichos sistemas productivos, aportando nuevos elementos para la evaluación de impacto de la aplicación de la política actual de conservación de suelos y/o para posibles modificaciones de la misma.

Una ventaja de los modelos de simulación es la posibilidad de evaluar ex ante nuevos escenarios. Esto brinda la posibilidad de pensar nuevas prácticas de manejo o arreglos de sistemas agrícolas, testearlos a través de escenarios de simulación y seleccionar aquellos que se consideren más sostenibles para diferentes áreas productivas. En definitiva, un modelo calibrado y validado para las condiciones de Uruguay tiene aplicaciones en varios niveles de gestión y decisión.

Metodología/Diseño del estudio

ESTRATEGIA E HIPÓTESIS

En una primera etapa se realizó la calibración y la validación del modelo Cycles para simular la dinámica de C, N y GEIs bajo diferentes condiciones edáficas y de uso y manejo del suelo. Se utilizaron cuatro experimentos de largo plazo (ELP) del INIA y de la Facultad de Agronomía, que comprenden diferentes zonas edafoclimáticas del país. Los distintos manejos aplicados en estos ELP han resultado en dinámicas de acumulación y/o de pérdida de C y N del suelo (Díaz-Rosello, 1992; García-Préchac et al., 2004; Franzluebbbers et al., 2014; Salvo et al., 2014; Mazzilli et al., 2015; Pravia et al., 2019).

En cada ELP, se seleccionaron tratamientos de manejos contrastantes, incluyendo aquellos que contaran con mediciones de emisiones de GEI para el ELP de "Fagro-EEMAC" y "Rotaciones Viejas".

En una segunda etapa se elaboraron escenarios edafo-climáticos que representan sistemas agrícolas comerciales de Uruguay, para el estudio de algunos casos seleccionados de charcas con "Planes de Uso y

Manejo Responsable” de suelos (PUMS) presentados ante el MGAP.

Se plantearon las hipótesis:

- H1: La dinámica de C y N del suelo, resultado de las distintas prácticas de uso y manejo del suelo sometidas a estudio en ELPs, puede ser simulada usando el modelo biofísico Cycles.
- H2: El modelo es capaz de captar los cambios en el stock de C y N en el suelo a lo largo del tiempo para los sistemas con manejo contrastante, mostrando resultados comparables a las observaciones en cuanto los stocks finales y la dirección del cambio de stock a la largo del tiempo.
- H3: La parametrización resultante de la calibración de dicho modelo permitirá aplicar la simulación de C y N a escenarios de sistemas comerciales que aplicaron PUMS para la conservación de suelos.

BASE EXPERIMENTAL

Se utilizaron los siguientes ELP para la calibración y validación del modelo Cycles:

- ELP de rotaciones agrícola-ganaderas con laboreo convencional (“Rotaciones Viejas” de La Estanzuela, INIA, Colonia).

Fue instalado en el año 1963 sobre un Brunosol Éutrico Típico con textura franco-arcillo-limosa. Este ELP compara siete tratamientos que comprenden sistemas de agricultura continua y rotaciones de distinta proporción cultivo:pastura, en un arreglo de bloques completos al azar con tres repeticiones (Gentile et al., 2005; Grahmann et al., 2019, Baethgen et al 2021). Se aplicó laboreo convencional durante las primeras tres décadas, pasándose al sistema de siembra directa en 2007 y ajustando las secuencias para incluir cambios técnicos del manejo agrícola como la incorporación del cultivo de soja.

El periodo simulado fue desde la incorporación de la siembra directa en 2007 hasta 2020, donde se contó con información de campo sobre stock de carbono y densidad aparente a lo largo del perfil del suelo, poniendo especial énfasis en el análisis para el periodo de mediciones de óxido nitroso como GEI (Ciganda et al 2022). Por lo tanto, se utilizaron los siguientes tratamientos:

- Agricultura continua con fertilizante (“sistema 2”): rotación cultivos anuales de tres años, incluyendo los cultivos de: maíz, cebada, sorgo, trigo, y soja.
- Rotación cultivo-pasturas (“sistema 5”) de seis años: tres años de la misma secuencia de cultivos que el sistema 2, seguido por tres años de pasturas mixtas de trébol blanco, lotus y festuca.
- ELP de rotaciones agrícola-ganaderas en siembra directa en suelos de lomadas del este (“UEPP”, INIA, Treinta y Tres).

Fue instalado en 1995 en la Unidad Experimental Palo a Pique de INIA Treinta y Tres, sobre un Argiudol Oxyaquico Vértico de textura franca, prácticamente sin historia agrícola previa. Se comparan sistemas de siembra directa de agricultura continua con sistemas de rotación cultivo-pastura, y además con un testigo de pastura permanente (Terra et al. 2006). En 2005, los sistemas de rotaciones se intensificaron incorporando la producción de grano, que sustituyó al objetivo de producción de forraje en la mitad de las parcelas. Las mismas mantuvieron su diseño original en una mitad de la parcela, mientras que en la otra mitad se dio lugar a la producción de grano, incluyendo los cultivos de soja y sorgo en cada una de las respectivas secuencias agrícolas.

En este proyecto, se incluyeron tres rotaciones del ELP de UEPP y sus respectivas parcelas desfasadas en el tiempo:

- Cultivo continuo: rotación de dos años de cultivos para grano de soja y sorgo en verano y cultivos de trigo en invierno, o de cobertura de avena o raigrás.
- Rotación cultivo-pasturas: rotación de seis años, incluyendo dos años de cultivos de grano con la misma secuencia que el cultivo continuo, a lo que siguen cuatro años de pasturas de festuca, trébol blanco y lotus.
- Pastura Permanente: siembra en cobertura de festuca, trébol blanco y lotus, que se renueva eventualmente en el largo plazo de acuerdo con la persistencia de las especies de interés (cada seis años o más).

Este ELP se utilizó para estudiar los cambios en el stock de carbono orgánico en el suelo desde la

instalación del ELP en 1995-96 hasta 2021. No cuenta con mediciones de GEI.

Se tomó como antecedente el trabajo realizado por Pravia et al (2019), adaptando los archivos para correr en la última versión de Cycles, y actualizando los archivos de simulación para abarcar los últimos años de manejo del ELP hasta el 2021-2022.

- ELP de rotaciones agrícola-ganaderas en suelos del litoral oeste (EEMAC_LP, Fagro, UdelaR).

Fue instalado en 1993 en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía en Paysandú, sobre un Brunosol Eutrítico Típico, con horizonte A franco arcilloso y pendiente menor al 1%. El diseño experimental fue de bloques completos al azar. Durante 20 años se compararon sistemas de agricultura continua y rotaciones cultivo-pastura, tanto en siembra directa como con laboreo convencional en indicadores de calidad del suelo (Ernst et al., 2020). En el año 2000, los sistemas bajo siembra directa se separaron dentro de secuencias con cultivos de verano C3 y cultivos de verano C4. Las rotaciones bajo laboreo convencional se mantuvieron solamente con especies C3. Por más detalles, ver Salvo et al., 2010.

Del experimento EEMAC_LP se evaluaron seis rotaciones:

- Cultivo continuo con especies de fotosíntesis C3 bajo laboreo (CC_C3_Till), donde las secuencias se encuentran compuestas principalmente por trigo, cebada y soja;
- Rotación de cultivo con pasturas bajo laboreo (ROT-PC_Till), donde la secuencia de CC_C3_Till es rotada cada tres años por pasturas de gramíneas y leguminosas de tres años de duración;
- Cultivo continuo con especies de fotosíntesis C3 en siembra directa (CC_C3_NoTill), en el cual se realiza la misma rotación que en CC_C3_Till sin laboreo;
- Rotación de cultivo con pasturas en siembra directa (ROT-PC_NoTill), en la cual se realiza la misma rotación que ROT-PC_Till sin laboreo;
- Cultivo continuo con especies de fotosíntesis C4 en siembra directa (CC_C4_NoTill), similar a CC_C3_NoTill pero sustituye al cultivo de soja o girasol por gramíneas C4 de verano (sorgo o maíz);
- Monocultivo de soja en siembra directa (CC_Sb_NoTill), este sistema se generó a partir del 2006 desde la parcela CC_C3_No Till, donde solamente se realiza soja.

El período simulado fue entre el 2003 y el 2013 donde existieron muestreos estratificados de Cs a lo largo del perfil. Además entre los años 2011 al 2013 se determinaron las emisiones de GEI (Salvo et al., 2010; Salvo, 2014).

- ELP de agricultura continua en siembra directa en suelos del litoral oeste (Monocultivos, Fagro, UdelaR).

Este ELP evaluó el efecto de dos sistemas de monocultivo contrastantes (maíz-maíz vs. soja-soja) (Mazzilli et al., 2014, 2015). Fue instalado en 2007 en la Estación Experimental Dr. Mario A. Casinoni de la Facultad de Agronomía (UdelaR), sobre un suelo Argiudol Típico franco limoso, con un diseño en bloques completos al azar. Ambos experimentos en la EEMAC fueron realizados a una distancia menor a 200 m y sobre un mismo tipo de suelo.

Del ELP de Monocultivos se evaluaron dos rotaciones durante 10 años, incluyendo dos manejos alternativos durante los dos últimos años:

- Monocultivo de maíz con dos años de Brassica carinata (uno fertilizado) (CC_Mz_F);
- Monocultivo de maíz con dos años de Brassica carinata (sin fertilización) (CC_Mz_SF);
- Monocultivo de soja con dos años de Brassica carinata (uno fertilizado) (CC_Sb_F);
- Monocultivo de soja con dos años de Brassica carinata (sin fertilización) (CC_Sb_SF).

El período simulado del ELP fue entre el 2007 y el 2020, desde la instalación hasta su finalización.

CONSOLIDACIÓN DE LAS BASES DE DATOS

Cada ELP cuenta con su registro de operaciones culturales, rendimientos de cultivos y pasturas, resultados de análisis de suelo, etc. Se consolidó una base de datos en un formato único para los ELPs, interactuando con los responsables técnicos de los mismos. Esta base de datos incluyó el historial de las operaciones de

manejo agronómico para los tratamientos seleccionados en cada experimento.

A partir de esta base de datos en formato excel, se generaron los archivos de entrada de operaciones de manejo para correr el modelo en los tratamientos correspondientes. Asimismo, se generaron archivos de entrada de suelos y de variables agroclimáticas. Estos archivos de entrada se anexan al presente informe.

Suelos

Se prepararon archivos de suelos para su entrada en el modelo contemplando la información observada en la fecha más próxima a la fecha de comienzo de las simulaciones para cada caso. La información contempló el perfil del suelo en profundidad, detallando para cada horizonte las siguientes propiedades físico-químicas: espesor, contenido de arena y arcilla, materia orgánica, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, contenido de nitrógeno como nitrato y amonio. En caso de información faltante para alguna propiedad física, se dejó que el modelo realizara los cálculos usando ecuaciones de estimación (Saxton y Rawls, 2006). Asimismo, en los casos en que hubiera solamente información de los horizontes superficiales para la fecha de inicio del período simulado, se utilizó la mejor aproximación posible de información de los horizontes subsuperficiales del suelo en base a la descripción del perfil de la serie de suelos. Estos aspectos se detallan en los archivos de suelos anexos.

Asimismo, se utilizó la información de suelos más reciente para comparar la salida del modelo con la última fecha en que se hubiesen hecho muestreos, agregando nuevos análisis para las últimas muestras tomadas.

Manejo agronómico

Se compiló el registro de operaciones de cada ELP, en particular para el periodo de tiempo en el que se cuenta con información de emisiones de GEI y stock de carbono orgánico en el suelo. Los registros compilados incluyeron: la fecha, operación de manejo realizada, dosis y tipo de insumos agregados como semilla o fertilizante en caso de corresponder. Se generó una base de datos en un formato único para los distintos experimentos, que facilita luego la generación de archivos de entrada para su modelación. Se generó un programa en el software R (<https://www.r-project.org/>) para automatizar la generación de archivos de entrada del modelo para las operaciones de manejo, que permite obtener una primera versión del archivo de entrada para el modelo. En una segunda instancia, el archivo generado por esta aplicación es necesariamente revisado para ajustar detalles específicos antes de correr las simulaciones. Este programa de R se anexa como un archivo adjunto al informe.

Información agroclimática

Se utilizó información registrada en las estaciones meteorológicas de cada estación experimental, generando un archivo de entrada de clima para cada sitio experimental para cada día del periodo de estudio, considerando que Cycles es un modelo de paso diario.

Las variables agroclimáticas utilizadas por el modelo Cycles incluyen: precipitación (PP, mm), radiación solar terrestre (SOLAR, MJ m⁻²), temperatura máxima y mínima (TX y TN, °C), humedad relativa máxima y mínima (RHX y RHN, %) y viento (WIND, m s⁻¹). La base de datos cruda contó con información para el período 2002-2021. En los casos en que alguna de las variables presentaba inconsistencias o falta de registros, se utilizaron bases de datos gridadas como NASA-POWER o GLDAS, para la corrección de dichos períodos.

Versión del modelo.

Se utilizó la versión de Cycles 1.3.0 disponible en: <https://github.com/PSUmodeling/Cycles/releases>

Fue necesario ajustar el formato de los archivos de entrada preparados para versiones anteriores (ej. Pravia et al 2019).

AJUSTES DE PARÁMETROS DEL MODELO

Los parámetros asociados al desarrollo fenológico de los cultivos fueron ajustados de tal manera de que el largo de ciclo, el período de floración y la fecha a madurez fisiológica, fueran similares a las relevadas en los experimentos.

Respecto al archivo de suelo, para el ELP de EEMAC, se disminuyó en un 33% la tasa de descomposición de la materia orgánica, para ajustar la descomposición con la realidad de la zona en estudio. Si bien otros

estudios estabilizan el nivel de carbono realizando varias simulaciones previas al año de comienzo de la simulación, en este estudio consideramos que la mejor estrategia era regular la tasa de descomposición sobre los valores reales obtenidos a campo.

Para el ELP de UEPP se utilizó información de calibración de las especies sembradas desarrollada por Pravia et al (2019) para una versión anterior del modelo.

CASOS DE ESTUDIO

Se utilizaron tres chacras comerciales sobre suelos de lomadas del este, comprendidas en las series de suelos de Estación Sanz, Costas de Corrales y Garao de la carta de suelos 1:40.0000. Estas chacras fueron previamente estudiadas por el Ing. Pablo Lacuesta (MGAP) para el periodo 2007 a 2019.

La información de descripción de los perfiles de suelo utilizados fue proporcionada por el equipo de Estudios Básicos de Suelos de la DGRN-MGAP, así como el correspondiente PUMS. En base a esta información se realizaron los archivos de entrada de suelos y de operaciones de manejo para su entrada en el modelo, mientras que se utilizó la información agroclimática del ELP de UEPP, considerando su proximidad geográfica.

Resultados, análisis y discusión

SIMULACION DEL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS

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 que se aproximan las entradas de carbono al suelo.

Por otra parte, 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 nitroso.

En función de los objetivos y alcances de este proyecto consideramos que los rendimientos de los cultivos fueron simulados adecuadamente, aunque en términos generales se observa una sobrestimación de los mismos (Fig. 1, 2, 3 y 4).

Para suelos agrícolas del litoral, el R^2 promedio para los cultivos de cebada, maíz, sorgo, soja y trigo en su conjunto fue de $R^2=0.59$ (Anexo ELP EEMAC, Fig 1 y 2). Sin embargo, para el ELP de Monocultivos, el ajuste de producción de biomasa y grano resultó algo inferior, observándose un CMEE de 28% para el rinde de maíz, 39% del de soja y 50% para carinata (anexo Resumen ensayos EEMAC Mazzilli, ELP Monocultivos).

Sobre suelos de lomadas del este, se obtuvo para los cultivos de soja y sorgo un $R^2 = 0.44$ (Anexo, ELP UEPP Fig 3 y 4), algo inferior al resultado obtenido para los primeros años del ELP UEPP en una versión anterior del modelo (Pravia et al 2019).

El ajuste entre los datos observados y modelados podría mejorar significativamente si se utilizara mayor detalle de registros fenológicos para cada cultivo, permitiendo ajustar el tiempo térmico de cada etapa fenológica. Además, podrían considerarse características específicas de los cultivares sembrados, como el largo del ciclo, lo que permitiría mejorar la descripción de los cultivos en el archivo de entrada del modelo, así como otras variables que afectan la ecofisiología de los cultivos.

Por otra parte, cuando se disminuyó la densidad de siembra de los cultivos para contemplar en la simulación situaciones de implantaciones deficitarias, o plagas que no estuvieran contempladas de otra forma, se obtuvieron valores de rendimiento algo más ajustados con respecto a los rendimientos observados.

BALANCE DE CARBONO EN EL SUELO

ELP EEMAC Fagro, UdelaR

En las mediciones de campo, únicamente el tratamiento de agricultura continua con laboreo se diferenció de aquellos bajo siembra directa con o sin pasturas en la rotación (Salvo, 2010, 2014). En concordancia con los

resultados observados, el modelo simuló un menor stock de carbono orgánico del suelo en los sistemas de agricultura con laboreo con respecto a aquellos bajo siembra directa. Para el fin del periodo simulado, la diferencia entre el stock de COS simulado y observado mostró un RMSE de 4.8 Mg ha⁻¹ COS (rRMSE=10%) en el estrato de 0 a 18 cm (Fig 5). El modelo tendió a subestimar el stock de carbono hacia el final del periodo.

ELP Rotaciones Viejas, INIA La Estanzuela

Para el ELP de Rotaciones Viejas, el modelo realizó una buena aproximación del COS almacenado al final de periodo, captando las diferencias entre los sistemas de producción y sus cambios en el tiempo. Mientras que el sistema de cultivo continuo presentó un stock de COS final observado de 45.4 Mg ha⁻¹, 16% inferior que el sistema de rotaciones (53.8 Mg ha⁻¹), el stock simulado al final del periodo fue de 45.7 Mg ha⁻¹, 18% inferior a las 55.9 Mg ha⁻¹ simuladas para el sistema de rotaciones (Fig 6). En el perfil del suelo acumulado hasta los 100 cm de profundidad el modelo predijo adecuadamente las diferencias entre los sistemas (Fig 7), donde el sistema de agricultura continua presentó un stock de carbono observado al final del periodo de estudio 102.3 Mg ha⁻¹, un 19% inferior respecto de la rotación con pasturas, con un promedio de 126 Mg ha⁻¹. En promedio para ambos sistemas, la simulación del stock final de COS tuvo un CMEE de 5.3 Mg C ha⁻¹, 11% del valor promedio observado para el horizonte 0 a 20 cm, y considerando el perfil del suelo a 100 cm de profundidad, el CMEE fue de 10.0 Mg C ha⁻¹, 9% del valor promedio observado. El cambio en el conjunto de prácticas de manejo implementados durante estos 13 años del periodo de estudio, que incluyeron la introducción de siembra directa, cambios en la secuencia de cultivos y una mayor extracción de la biomasa producida en las pasturas provocó cambios en el stock de carbono en el suelo. Estos cambios fueron adecuadamente simulados en términos de su dirección y magnitud (Fig. 8), donde la intensificación en los sistemas de rotaciones tendió a reducir el stock de COS, mientras que el sistema de agricultura continua se benefició con el cambio técnico mostrando una tendencia a mantener el stock de COS e incluso mostrar un leve incremento a lo largo de los 13 últimos años del experimento que se incluyeron en este proyecto.

ELP "UEPP", INIA, Treinta y Tres.

Para el ELP de UEPP, el modelo simuló en el sistema de agricultura continua una caída del COS de 12% en los primeros 30 cm y de 9% en el perfil acumulado hasta los 60 cm para el periodo 1996-2021. Si bien la trayectoria inicial incluyó el aumento del COS en el horizonte superficial del suelo desde el inicio del ELP hasta 2004, luego se observó un posterior descenso a partir del cambio en el manejo que incluyó la intensificación del uso del suelo y la agricultura para grano hasta el final del periodo simulado. El stock final de COS simulado para los estratos de 0-15 y 15-30 cm estuvo dentro del rango de los valores observados en el muestreo de campo realizado en 2021, mientras que el stock simulado para los estratos subsuperficiales fue sobrestimado respecto al observado al final del periodo de estudio (fig.9).

En los sistemas integrados cultivo-pasturas, el modelo simuló un mejor balance de carbono que en la agricultura continua, aunque aún negativo a largo plazo. La caída promedio del COS fue estimada en el 9% en los primeros 30 cm y del 7% en el perfil acumulado hasta los 60 cm para el periodo 1996-2021. El stock final promedio de COS simulado de 32.2 COS Mg ha⁻¹ (en promedio) para los estratos de 0-15 fue muy similar con un rRMSE 6.7% (2.1 COS Mg ha⁻¹) al promedio de los valores observados (32.2 COS Mg ha⁻¹) en el muestreo de campo realizado en 2021), mientras que el stock simulado para los estratos subsuperficiales fue sobrestimado respecto al observado al final del periodo de estudio (Fig.10). Al no contar con un muestreo de las capas subsuperficiales para cada parcela al inicio del ELP, hay que considerar que los valores de inicialización del modelo para los estratos subsuperficiales tenían un menor grado de precisión, y por lo tanto es esperable encontrar mayores diferencias con los valores observados el muestreo realizado en 2021.

Para el tratamiento de pastura permanente, el modelo estimó un aumento de stock del C orgánico del suelo del 11% para el estrato superficial (0 a 15 cm) hasta el año 2013, que luego se estabiliza. El stock de COS al final del periodo simulado para el estrato superficial (32.0 Mg ha⁻¹ COS) estuvo dentro del desvío de las observaciones del muestreo de suelos de 2021 (Fig. 11). La diferencia entre el stock de COS y el observado

fue de 1.4 Mg ha⁻¹, donde el modelo sobreestimó el stock promedio en un 4.7%, mientras que los valores observados mostraron un desvío de COS de 2.3 Mg ha⁻¹. El aumento de stock estimado por el modelo se diluye al considerar las capas subsuperficiales, estimándose en un 3% para el estrato de 0-30 cm. Para los siguientes horizontes subsuperficiales se observaron mayores desvíos, aunque hay que considerar nuevamente que la información del stock inicial que fuera aproximada a partir de la descripción del perfil no contaba con información específica de cada parcela para los horizontes subsuperficiales, mientras que sí se contaba con esta información detallada para el horizonte superficial hasta 15 cm.

Sería interesante estudiar en mayor profundidad el ajuste del stock simulado para las capas de suelo subsuperficiales trabajando con información inicial del muestreo de capas profundas del perfil del suelo por parcela. De esta manera se podría analizar si las diferencias en el stock que se observan en estas capas hacia el final del periodo de estudio se deben a un desajuste de la información de base de la descripción del perfil del suelo en 1995-96 con respecto a esa parcela específica por variabilidad espacial o a aspectos de la modelación. Sin embargo, para esto sería necesario inicializar la simulación en 2015, fecha del primer muestreo con estas características, lo que acortaría mucho el periodo de estudio para estudiar cambios en el stock de carbono.

CASOS DE ESTUDIO EN CHACRAS

Los casos de estudio de agricultura continua en chacras de lomadas del este resultaron en estimaciones de pérdidas de carbono en el suelo. Estas estimaciones van en la misma dirección que los estudios de campo realizados por el Ing. Agr. Pablo Lacuesta en su tesis de maestría, presentados en los seminarios de suelos en el marco del Programa de Posgrados de Fagro-Udelar y en un seminario técnico sobre 10 años de agricultura en lomadas del este (Seminario Centro Agronómico Regional 33 -septiembre 2023).

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO: ÓXIDO NITROSO

Emisiones de óxido nitroso en el ELP EEMAC Fagro, Udelar

En términos generales, el modelo copió relativamente bien el patrón de emisiones de N₂O a lo largo del periodo evaluado (Fig. 12). Sin embargo, los picos de emisión fueron subestimados.

Comparando los valores acumulados de emisiones de N₂O observados y simulados a lo largo de 2 años para los diferentes sistemas agrícolas, se encuentra cierta concordancia (Fig.13). Los acumulados simulados fueron similares entre sistemas productivos, concordando con lo observado, donde a pesar de haber mayores variaciones en magnitud, no se encontraron diferencias significativas entre los diferentes manejos (Salvo, 2014). En términos generales los acumulados simulados estuvieron o próximos al acumulado observado, encontrándose las mayores diferencias en el sistema bajo siembra directa con inclusión de maíz.

Variables de control de las emisiones de óxido nitroso en el ELP EEMAC Fagro, Udelar

En este caso se trabajó únicamente con los sistemas en agricultura continua de base soja con y sin laboreo durante un año de evaluación.

El contenido de agua simulado para los primeros centímetros del suelo se ajustó adecuadamente a lo observado.

En términos generales, la simulación del contenido de N₂O en suelo en función del tiempo fue adecuada, excepto en el verano donde se observaron momentos de altas concentraciones que no fueron bien simuladas. Sin embargo, la línea de base estaría siendo algo subestimada. El NH₄ tuvo un menor ajuste entre lo observado y simulado, especialmente en siembra directa. La línea de base simulada fue bastante inferior a la observada.

Emisiones de óxido nitroso en el ELP Rotaciones Viejas, INIA La Estanzuela

Al comparar la evolución en las emisiones de óxido nitroso simuladas y observadas en un mismo par de ejes para el Rotaciones Viejas, INIA La Estanzuela para el año 2020, al igual que para la EEMAC, se observó

que en términos generales el modelo copió relativamente bien el nivel de base y el patrón de emisiones a lo largo del periodo evaluado, tanto para sistemas de agricultura continua como para sistemas integrados con pasturas (Fig. 14a y 14.b, respectivamente). Nuevamente, los picos de emisión fueron subestimados, repitiendo lo observado en el ELP de la EEMAC.

En cuanto a las emisiones acumuladas en el periodo de estudio, los valores simulados se mantuvieron en el orden de magnitud de las observaciones, el entorno de 1.4 a 1.8 kg N ha⁻¹, aunque no se reflejaron diferencias entre los tratamientos.

Conclusiones y recomendaciones

Se logró generar una base de datos con la información generada en distintos experimentos de largo plazo con sistemas de rotaciones agrícolas y agrícola ganaderas en suelos de diferente aptitud agrícola. El registro de la información en los diferentes ELP no fue pensada estrictamente en el uso de modelos. Esto hace que no se cuente con toda la información requerida por el modelo Cycles, generando mayor incertidumbre en la etapa de calibración. En este sentido, la base de datos puede contribuir a mejorar el registro y la sistematización de la información generada a partir de ahora en los diferentes ELP.

A través del modelo Cycles, se profundizó en la comprensión de algunos de los componentes clave en el ciclo del carbono y nitrógeno que explican los balances de C, N y GEI.

Se había propuesto identificar componentes y/o procesos de los ciclos biogeoquímicos de C y N que requirieran necesidades específicas de investigación para una mejor estimación de los balances de C, N y GEI de los sistemas de producción del país. En este sentido, para caracterizar mejor las entradas del carbono al sistema resulta importante la información del manejo de los cultivos que permita realizar una buena estimación de su crecimiento y productividad. Sería recomendable incorporar información más detallada del manejo, la fenología y crecimiento de todos los cultivos y en todos los ELP. Por otro lado, para caracterizar asimismo las salidas de carbono de los agroecosistemas es importante el considerar las operaciones de manejo realizado que afectan tanto la productividad como la extracción de biomasa del sistema, para lo cual un buen registro de producción de grano y forraje es fundamental. Manejos alternativos como el uso de siembra directa, en contraposición al laboreo convencional y el uso de rotaciones resultan herramientas clave para la conservación del carbono orgánico del suelo. Sin embargo, estas prácticas por si solas no aseguran un balance positivo de carbono cuando se combinan con altas salidas de carbono del sistema. Los últimos años del ELP de Rotaciones viejas de INIA LE muestran resultados en este sentido, que fueron captadas por el modelo. Sería interesante sumar otros tratamientos de los ELP para contrastar la proyección del modelo sobre el C orgánico del suelo con más casos de estudio.

El modelo resultó una herramienta útil para proyectar los cambios de stock de carbono del suelo debido al manejo. Los resultados en las primeras capas del suelo fueron razonablemente acertados, ya que mostraron las trayectorias esperadas de acuerdo con la información observada, dentro de los límites de los desvíos de la información observada. Las estimaciones para las capas subsuperficiales mostraron mayor variabilidad, posiblemente asociada a la calidad de la información inicial con menor resolución espacial. Sería interesante continuar este trabajo a lo largo de los años, contando con mayor detalle de información para capas del suelo subsuperficiales, ya que contienen una buena parte del carbono orgánico del suelo. De la misma forma, sería interesante ahondar el estudio realizado, analizando las variaciones en el stock de nitrógeno almacenado en el suelo bajo los diferentes sistemas agrícolas. En este proyecto, no se alcanzó a analizar las mismas con la profundidad necesaria que requiere el tema.

Por otra parte, las simulaciones realizadas con el modelo Cycles para chacras comerciales seleccionadas,

mostraron resultados de cambios en el stock de carbono del suelo que van en la línea de las observaciones realizadas, a pesar de contar con una información de base de menor detalle. Sería muy interesante ampliar el trabajo realizado a un mayor número de casos de estudio para validar el modelo a una escala mayor, contemplando mayor variabilidad de suelos y también trabajar sobre la proyección de posibles manejos alternativos.

En cuanto a las estimaciones de emisiones de GEI, el modelo fue capaz de estimar emisiones de N₂O en el orden de magnitud de las observaciones, por lo tanto, podría ser útil para estimaciones a nivel de agroecosistema. Sin embargo, las estimaciones de picos de emisión no fueron captadas por el modelo. Sería necesario continuar trabajando para tener estimaciones más ajustadas que permitan comparar el efecto de prácticas de manejo en las emisiones. Por otro lado, sería interesante agregar a estas comparaciones información sobre otras formas gaseosas de efecto invernadero. En este sentido, aunque el modelo no contempla emisiones de CH₄, permite estimar las emisiones de CO₂ por respiración del suelo.

Un resultado interesante ha sido el desarrollo de un pequeño equipo de trabajo interinstitucional como puntapié para desarrollar una plataforma que contribuya al desarrollo de este tipo de herramientas de modelación para el soporte a la toma de decisiones y generación de políticas públicas de manejo y conservación de suelos. Se recomienda y se pretende continuar trabajado en otros proyectos relacionados que permitan dar continuidad a la temática evitando que se disipe este esfuerzo.

Referencias bibliográficas

- Baethgen, W.E., A. Morón y R.M. Díaz-Rosello. 1994. Modeling long-term soil organic carbon changes in six cropping systems of SW Uruguay. *International Soil Science Society Transcripts*, Vol 9:300-302. Acapulco, Mexico.
- Baethgen, W. E., and A. Morón. "Carbon Sequestration in Agricultural Production Systems of Uruguay: Observed Data and CENTURY Model Simulation Runs." *Anales de la V Reunión de la Red Latinoamericana de Agricultura Conservacionista*, Florianópolis, Brasil (2000).
- 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.
- Campbell, G.S., 1985. *Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-Plant Systems*. Elsevier Sci 90:148–150. doi: 10.1016/S0166-2481(08)70144-2
- 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 nitroso (N₂O). *Revista INIA Uruguay*, Diciembre 2022, no.71, p. 48-53. (Revista INIA; 71).
- Díaz-Rosello R. 1992. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. *Revista INIA Investigaciones Agronómicas* 1: 103–110.
- Drinkwater, L.E., M. Schipanski, S. Snapp, and L.E. Jackson. 2008. Ecologically-based nutrient management, In: S. Snapp and B. Pound, eds. *Agricultural systems: Agroecology and rural innovation for development*. Academic Press, San Diego, CA, pp 161–210.
- Franzluebbers AJ, Sawchik J, Taboada MA. 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture–crop rotations in temperate North and South America. 2014. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190 (2014) 18–26.
- García-Préchac F, Ernst O, Siri-Prieto G, Terra JA. 2004. Integrating no-till into crop–pasture rotations in Uruguay. 2004. *Soil & Tillage Research* 77: 1–13.
- Gentile RM, Martino DL, Entz MH. 2005. Influence of perennial forages on subsoil organic carbon in a long-term rotation study in Uruguay. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105: 419–423.
- Kemanian, A.R., Manoranjan, V.S., Huggins, D.R., Stöckle, C.O., 2005. Assessing the Usefulness of Simple Mathematical Models to Describe Soil Carbon Dynamics. In: 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases & Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry, Baltimore, Maryland, March 21-24, 2005.
- Kemanian, A.R., Stöckle, C.O., 2010. C-Farm: A simple model to evaluate the carbon balance of soil profiles. *Eur. J. Agron.* 32, 22–29.
- 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>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169924009013>)
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623-1627.
- Lal 2016. Beyond COP21: potential and challenges of the “4 per thousand” initiative. *Journal of Soil and*

- Mazzilli SR, Kemanian AR, Ernst OR, Jackson RB, Piñeiro G. 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biology & Biochemistry* 75: 273-281.
- Mazzilli SR, Kemanian AR, Ernst OR, Jackson RB, Piñeiro G. 2015. Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. 2015. *Soil Biology & Biochemistry* 85: 22-30.
- Mazzilli SR y Ernst OR. 2019. Rapeseed-to-Wheat Yield Ratio in Different Production Environments and Effects on Subsequent Summer Crops Yields. *Agrosystems, Geosciences & Environment* 2:190017.
- Hassink, J., Whitmore, A.P., 1997. A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61, 131-139.
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Publicado por: IGES, Japón.
- Pravia. M.V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio-temporal en la investigación de cultivos agrícolas: i) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad desorgo a escala de chacra. ii) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Universidad de la República, Facultad de Agronomía.
- 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.
- Saha D.; Kemanian, A.R; Rau, B.M; Adler, P.R, and Montes, F. 2017. Designing efficient nitrous oxide sampling strategies in agroecosystems using simulation models. *Atmospheric Environment* 155, 189-198.
- Salvo L, Hernández J, Ernst O. 2010. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil & Tillage Research* 109: 116-122.
- 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>
- Salvo L, Hernández J, Ernst O. 2014. Soil organic carbon dynamics under different tillage systems in rotations with perennial pastures. *Soil & Tillage Research* 135: 41-48.
- Schlesinger W.H. y Bernhardt E.S. Biogeochemistry. 2013. An analysis of global change. Third edition. ISBN 978-0-12-385874-0.
- Shi, Y., Montes, F., & Kemanian, A. R. (2023). Cycles-L: A coupled, 3-D, land surface, hydrologic, and agroecosystem landscape model. *Water Resources Research*, 59, e2022WR033453. <https://doi.org/10.1029/2022WR033453>
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, 289-307.
- Stöckle, C. O., A. R. Kemanian, C. Kremer 2008. On the Use of Radiation- and Water-Use Efficiency for Biomass Production Models. In: L.R. Ahuja, V.R. Reddy, S.A.
- Saseendran, Q. Yu, editors, Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water

Stress Effects on Plant Growth Processes, Adv. Agric. Syst. Model. 1. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. p. 39-58. doi:10.2134/advagricsystmodel1.c2

- Terra, J.A., García-Préchac, F., Salvo, L., Hernández, J. 2006. Soil use intensity impacts on total and particulate soil organic matter in no-till crop-pasture rotations under direct grazing. *Advances in Geoecology* 38: 233–241.
- White, C.M., Kemanian, A.R., Kaye, J.P., 2014. Implications of carbon saturation model structures for simulated nitrogen mineralization dynamics. *Biogeosciences* 11, 6725–6738.

Licenciamiento

Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. (CC BY-NC-ND)