

PRODUCCIÓN SUSTENTABLE

La salud del suelo y la sustentabilidad de los agroecosistemas

El suelo es fundamental para la producción agropecuaria y también para proveer otros servicios ecosistémicos claves que contribuyen al bienestar social y a la preservación de un medio ambiente saludable. El camino para preservar este recurso es incentivar la intensificación ecológica o sustentable, las buenas prácticas agrícolas, la agroecología o cualquier corriente que ayude a diseñar agroecosistemas sustentables.

POR GERVASIO PIÑEIRO^{A,B}, PRISCILA PINTO^{A,B,C}, PAULA BERENSTECHER^{A,D}, TOMAS DELLA CHIESA^{A,E} Y SEBASTIAN VILLARINO^F

^A INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FISIOLÓGICAS Y ECOLÓGICAS VINCULADAS A LA AGRICULTURA (IFEVA), CONICET Y UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES (UBA).

^B CÁTEDRA DE ECOLOGÍA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES (UBA).

^C DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE WISCONSIN. MADISON, ESTADOS UNIDOS.

^D DEPARTAMENTO DE MÉTODOS CUANTITATIVOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES (UBA).

^E CÁTEDRA DE CLIMATOLOGÍA Y FENOLOGÍA AGRÍCOLAS DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES (UBA).

^F FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS (FCA), CONICET Y UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA (UNMDP).

El suelo es considerado el bio-material más complejo del planeta debido a que está compuesto por una rica mezcla de minerales, materia orgánica, organismos vivos, gases, agua y nutrientes. Quizá sea debido a esta complejidad, y a que no lo vemos porque se encuentra “debajo de la tierra”, que su relevancia para nuestra vida no es, tal vez, suficientemente reconocida. Sin embargo, el suelo es un componente esencial del ecosistema para la provisión de “servicios ecosistémicos”, entendiendo este concepto como las funciones, capacidades o aspectos de los ecosistemas que se relacionan con los beneficios que brindan a las sociedades humanas.

Un suelo saludable es aquel que mantiene su capacidad para proveer servicios ecosistémicos, es decir, es un suelo que no se encuentra degradado. Uno de los principales indicadores de la salud es el contenido y calidad de la materia orgánica, debido a que este componente afecta prácticamente a todas las propiedades del suelo relacionadas con su funcionamiento en el ecosistema. Por lo tanto, para lograr una producción sustentable debemos manejar las secuencias de cultivos y las prácticas de manejo a los fines de mantener o incrementar la materia orgánica del suelo. Cuando estos contenidos son los adecuados (por encima de umbrales mínimos), la mayoría de las propiedades y procesos necesarios para lograr un

buen funcionamiento del suelo se ven favorecidos.

La producción agropecuaria depende en gran medida de la salud del suelo, ya que los suelos sustentan la vida que se encuentra sobre ellos. La vegetación encuentra en el suelo un ambiente con nutrientes, agua y oxígeno, que es adecuado para su crecimiento. Sin embargo, la importancia del suelo para la humanidad no reside únicamente en su relación con la producción agropecuaria, sino en que además es fundamental para proveer otros servicios ecosistémicos claves que contribuyen al bienestar social y a la preservación de un medio ambiente saludable. Por ejemplo, el suelo tiene un rol clave en la regulación del ciclo hidrológico, a través de su capacidad para infiltrar y almacenar agua. Esta capacidad regulatoria, o servicio ecosistémico, nos permite obtener fuentes de agua para el consumo humano y evitar eventos extremos como inundaciones o sequías. Otro servicio ecosistémico muy importante del que participa el suelo es la regulación climática, debido a que el suelo almacena grandes cantidades de carbono (es el principal reservorio de carbono terrestre) y, por lo tanto, sus variaciones a escala global tienen una enorme potencialidad para emitir o secuestrar dióxido de carbono (CO₂), el principal gas de efecto invernadero. Por lo tanto, la salud del suelo afecta no solo a la producción de granos, carne y fibras, sino que también a múltiples

aspectos relacionados al bienestar de la sociedad en general.

Qué es la materia orgánica del suelo y cómo está compuesta

En los últimos años las ideas que teníamos sobre la composición y la dinámica de la materia orgánica del suelo cambiaron sustancialmente. Tradicionalmente se pensaba (y es lo que aún se enseña en alguna de nuestras universidades) que la materia orgánica en el suelo está formada por sustancias húmicas complejas de alta estabilidad, las cuales llamamos humus. Según esta teoría, el humus persiste en el suelo debido a que son moléculas complejas de difícil descomposición por los microorganismos. Debido a esto se pensaba que los residuos vegetales recalcitrantes (con alto contenido de lignina y alta relación carbono/nitrógeno) eran entonces los que más contribuían a la formación de materia orgánica del suelo, debido a su lenta y difícil descomposición. Sin embargo, nuevas investigaciones demuestran que las sustancias complejas denominadas humus observadas en laboratorio, son un producto artificial que se sintetiza durante la extracción del suelo, pero que no ocurre en la naturaleza (Schmidt et al., 2011).

A partir de nuevas técnicas (como la espectroscopia por resonancia magnética, el fraccionamiento físico y el uso de isótopos) se ha demostrado que la materia

orgánica del suelo está formada, principalmente, por moléculas simples, y no por las moléculas complejas de humus. Es decir, el humus casi no existe en los suelos reales, sino solo en los tubos de ensayo donde analizamos los suelos. Además, ahora también sabemos que los residuos que se descomponen más rápido contribuyen más a la formación de materia orgánica del suelo de lo que se pensábamos anteriormente, ya que sus compuestos lábiles, no estructurales y ricos en nitrógeno se incorporan rápidamente a la biomasa microbiana, que es la que luego se transforma en materia orgánica del suelo. La permanencia de estas moléculas simples en el suelo, derivadas de las plantas o de los microorganismos, se debe a “mecanismos de protección”, determinados por su interacción con los microorganismos y los minerales del suelo, los cuales evitan su mineralización, y no solo a su complejidad química o recalcitrancia, como pensábamos antes en la teoría del humus.

Las investigaciones más recientes muestran entonces, que la materia orgánica del suelo es un componente heterogéneo y complejo, y que para abordar esta complejidad resulta útil separarla en dos fracciones: la materia orgánica del suelo particulada (POM) y la asociada a los minerales (MAOM). La POM y la MAOM se diferencian radicalmente en su composición química y su relación con los demás componentes del suelo lo que implica que ambas fracciones están protegidas de la mineralización por diferentes mecanismos (Lavallee et al., 2019). La forma práctica de separar ambas fracciones es a través de un tamiz de 53 micrones, donde la POM corresponde a partículas mayores a 53 μm y la MAOM partículas menores a 53 μm . Es importante que los laboratorios de

suelos realicen este análisis, y por lo tanto informen los contenidos de materia orgánica del suelo separados por cada fracción.

La POM entonces es la fracción de la materia orgánica del suelo con partículas de mayor tamaño, mayores a 53 μm . Está formada por residuos vegetales parcialmente descompuestos. Esta fracción puede permanecer varias décadas en el suelo si presenta compuestos recalcitrantes, ricos en lignina y con una alta relación carbono/nitrógeno. Por esto se dice que la POM está protegida por su composición química. La POM, además, puede estar protegida por su ubicación en el suelo. Esto ocurre cuando se encuentra ocluida dentro de macro-agregados, donde la actividad de la biota del suelo está generalmente reducida.

La MAOM, en cambio, es la fracción con partículas de menor tamaño, menores a 53 μm . Está compuesta por moléculas simples de bajo peso molecular, generalmente muy ricas en nitrógeno, como por ejemplo productos derivados de los microorganismos y exudados radicales. Estos compuestos, aunque son lábiles, pueden permanecer durante siglos dentro del suelo debido a distintos mecanismos de protección. Por un lado, estas moléculas se pueden encontrar adsorbidas a las arcillas del suelo, es decir, protegidas por enlaces físicos, o formando compuestos órgano-minerales con diferentes metales del suelo. Se dice entonces que están protegidas por enlaces químicos. Por el otro, las moléculas simples también pueden estar ocluidas dentro de micro-agregados, donde el acceso a los microorganismos está aún más restringido que en los macro-agregados. En este caso, la MOAM se encuentra protegida

por su ubicación. Es resumen, la permanencia prolongada de esta fracción en el suelo se debe a estos tres mecanismos que la protegen de la descomposición microbiana, y no a la recalcitrancia de sus compuestos, como se sostenía anteriormente con la teoría del humus. Sin embargo, estos mecanismos de protección tienen una capacidad limitada. En el suelo existe un límite máximo de acumulación de MAOM, conocido como nivel de saturación. Superado este límite, las sustancias simples que dan origen a la MAOM se encuentran desprotegidas y, por lo tanto, los microorganismos pueden atacarlas y descomponerlas muy rápidamente.

Funciones y servicios que brinda la materia orgánica del suelo

La POM y la MAOM son indicadores de la salud del suelo porque determinan funciones muy importantes para la producción agropecuaria y son además fáciles de medir en el laboratorio. Por ello es recomendable que los productores y productoras con interés en monitorear la salud del suelo cuantifiquen los contenidos de POM y MAOM por separado en el tiempo, y los comparen además con los contenidos en situaciones de referencia como pastizales naturales, evaluando así el estado de su “caja de ahorro” de nutrientes y la salud global del suelo.

La importancia de la POM en la salud del suelo se encuentra muy relacionada con la formación y el reciclaje de los agregados del suelo. Los pequeños restos vegetales que forman la POM estimulan el crecimiento de hongos y microorganismos, que promueven la formación de macro-agregados alrededor de la POM (Six et al., 2004). Estos agregados de mayor tamaño

son los que permiten el movimiento del agua en el suelo y favorecen la exploración de las raíces. Por el contrario, los suelos compactados que presentan menor macroporosidad limitan la infiltración del agua produciendo períodos de anegamiento luego de las lluvias. A su vez, este problema se acentúa cuando los suelos presentan mayor pendiente porque favorece la pérdida de suelo por erosión. Por otra parte, los suelos compactados reducen el crecimiento de las raíces y el volumen de suelo que exploran. Esto también afecta negativamente la salud del suelo porque limita la absorción de agua y de nutrientes de las plantas.

La importancia de la MAOM, en cambio, se encuentra muy relacionada con la provisión de nutrientes. Como vimos anteriormente, esta fracción se encuentra formada por compuestos muy lábiles con una alta concentración de nutrientes. Si bien la asociación con los minerales determina que pueda permanecer durante siglos dentro del suelo, esta fracción no es inerte. Los cambios en los contenidos de MAOM son difíciles de detectar debido a que representa una alta proporción de la materia orgánica total del suelo. Sin embargo, la posibilidad de estudiar su dinámica mediante nuevas tecnologías, como marcadores isotópicos, permitió detectar que una parte se encuentra en continua formación y mineralización (Mazzilli et al., 2015; Jilling et al., 2018). Especialmente, la estimulación del crecimiento microbiano y la acción de algunos compuestos que liberan las raíces, como el ácido oxálico, determinan una alta mineralización de la MOAM en la rizósfera del suelo (Jilling et al., 2021). Como consecuencia de su mineralización se liberan nutrientes que pueden ser rápidamente

absorbidos por las raíces de las plantas. Es por ello que otro atributo a tener en cuenta, y que ha sido propuesto para caracterizar la salud del suelo, es el nitrógeno potencialmente mineralizable que presenta toda la materia orgánica del suelo, o particularmente la fracción MAOM.

Cómo hemos afectado la salud del suelo y los contenidos de materia orgánica

La actividad agropecuaria implica prácticas de manejo muy diversas que pueden perjudicar o beneficiar la salud del suelo, dependiendo del cambio que generen tanto en el balance de la materia orgánica como en las propiedades físicas del suelo, la susceptibilidad a la erosión y la biodiversidad. En este sentido, podemos analizar la historia de uso y manejo del suelo en la región pampeana que, en este balance, ha deteriorado la salud de nuestros suelos.

En primer lugar, el sobrepastoreo de los pastizales nativos propios de esta región conlleva a una reducción en la productividad del ecosistema, lo que representa una reducción en el balance de materia orgánica del suelo y una mayor susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica. Por otro lado, el reemplazo de pastizales naturales por pasturas o cultivos anuales ha cambiado drásticamente la cantidad, calidad y estacionalidad de los residuos vegetales que representan el principal aporte de materia orgánica al suelo y por lo tanto afectan su formación. El reemplazo de la vegetación natural trajo como consecuencia una reducción en la materia orgánica del suelo, así como en la riqueza y diversidad de especies vegetales, animales y de microorganismos. A su vez, el mejoramiento de las espe-

cies cultivadas se orientó en optimizar la productividad en aérea en detrimento de la productividad subterránea. Esta característica es particularmente importante en el balance de materia orgánica del suelo, ya que la biomasa subterránea es aproximadamente entre 3 y 5 veces (dependiendo del método de cálculo) más eficiente para formar materia orgánica del suelo que la biomasa aérea. Con la incorporación de pasturas y cultivos anuales se incorporó una nueva práctica que tuvo un efecto negativo en la materia orgánica del suelo: la labranza. El uso del arado rompe los meso y macro agregados del suelo, lo que reduce los mecanismos de protección de la materia orgánica del suelo y aumenta la descomposición. La labranza afecta particularmente el contenido de POM, cuya protección depende exclusivamente de la oclusión dentro de los agregados.

Desde fines de los años ochenta comenzó en la región pampeana un proceso de intensificación agrícola. Hasta entonces, se utilizaba en la región la rotación agrícola-ganadera, con ciclos de 4-5 años de pasturas y 4-5 años de uso agrícola. Esta rotación temporal entre pasturas y cultivos anuales permitió enlentecer las pérdidas de materia orgánica del suelo ya que los años de pasturas representan un aumento en la productividad anual, mayor tiempo de cobertura del suelo durante el año, mayor producción de raíces y de rizodeposición de los cultivos y mayor diversidad de especies. Con la intensificación agrícola, se produjo una segregación de las actividades (ver Figura 1). La ganadería fue desplazada a suelos con menor productividad o a sistemas de engorde intensivo a corral. Los lotes con suelos con aptitud

agrícola pasaron a ser utilizados con cultivos anuales que ocupan el suelo la mitad del año, aumentando el riesgo de erosión hídrica o eólica, y aportando poco volumen de residuos aéreos y raíces (particularmente el cultivo de soja), y con una diversidad vegetal muy reducida. Esto provocó un fuerte desacople entre la producción agrícola y ganadera, eliminando los beneficios ambientales y productivos asociados a la integración de ambas actividades.

Como consecuencia de la historia agropecuaria de la región pampeana, que va desde pastizales nativos a sistemas productivos con ganadería extensiva, pasando por rotaciones agrícolas-ganaderas y desacople entre sistemas que generaron zonas exclusivamente agrícolas, el impacto neto es negativo en el balance de la materia orgánica del suelo, reduciendo sus contenidos a cerca de la mitad del original bajo pastizal.

Cómo recuperar la salud del suelo

Para recuperar la salud del suelo, su materia orgánica y todos los beneficios y servicios que brinda, necesitamos un cambio urgente en el paradigma de producción agropecuario. El paradigma actual de la mayoría, aunque no de toda la producción agropecuaria en Argentina y en el mundo, se sigue basando en los principios de la revolución verde, centrados casi exclusivamente en la obtención de productos cosechables, sin una mirada sistémica ni una evaluación de los impactos ambientales de las actividades agropecuarias. En los últimos años, y debido al evidente impacto ambiental y a las presiones de las

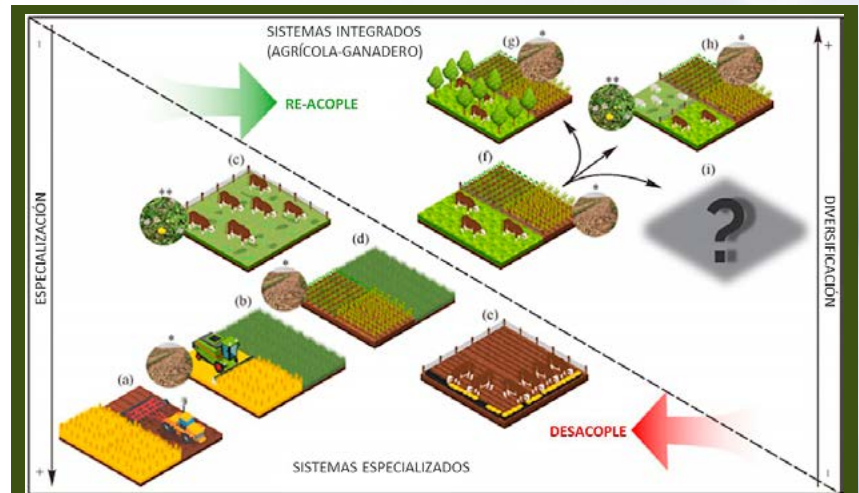


Figura 1. Modelo conceptual para caracterizar el desacople y el (re)acople entre la producción agrícola y ganadera en una gama de posibles escenarios de especialización o diversificación. La combinación de la producción agrícola y ganadera se puede realizar a cualquier nivel del sistema y a diferentes escalas espacio-temporales (es decir, a escala de campo, de establecimiento o paisaje). La probabilidad de que se produzcan sinergias y complementariedades entre los componentes del sistema es mayor a medida que aumenta la diversificación del sistema. Lo mismo se aplica a la complejidad y magnitud de los ciclos biogeoquímicos. Las representaciones del sistema corresponden a: (a) sistema de monocultivo bajo labranzas múltiples; (b) producción de cultivos comerciales especializados bajo labranza cero y rotación de cultivos; (c) producción ganadera extensiva en pastizales nativos; (d) producción especializada de cultivos comerciales con labranza cero, con cultivos de servicios y rotación de cultivos; (e) producción ganadera intensiva en corrales de engorde; (f) sistema integrado con cultivos de servicios y de pastoreo de ganado más cultivos comerciales con labranza cero, con rotación de cultivos; (g) sistema integrado con cultivos de cobertura de pastoreo más cultivos comerciales con labranza cero, más rotación de cultivos e inclusión de árboles en sistemas de silvopastoreo; (h) sistema integrado con diferentes especies de ganado que pastorean cultivos de pastizales y pastizales nativos, más cultivos comerciales bajo labranza cero con rotación de cultivos; y (i) cualquier otra combinación cultivos-ganadería no representada anteriormente (podría incluir sistemas silvopastoriles con especies nativas de pastizales y árboles, integración del ganado en sistemas perennes como huertos y viñedos, etc.) (tomada de Carvalho et al., 2021).

sociedades, algunos productores y productoras han incorporado nuevos insumos o prácticas de manejo que reducen sus “externalidades”. Si bien estas prácticas mejoran sustancialmente los impactos ambientales negativos de los sistemas agropecuarios, en general no están orientadas a recomponer los servicios de los ecosistemas, ni la salud del suelo. En estos casos el objetivo central de los establecimientos agropecuarios sigue siendo maximizar la producción agropecuaria (carne, granos, leche, etc.), poniendo “parches” de manejo para disminuir su impacto ambiental y el deterioro edáfico.

Por el contrario, el nuevo paradigma agropecuario debería estar basado en el diseño de agroecosistemas con múltiples objetivos de producción. Estos objetivos incluyen por supuesto la producción de productos cosechables y vendibles (granos, carne, etc.), pero también la producción y recomposición de la materia orgánica del suelo, la regulación del ciclo hidrológico, la regulación del clima, el mantenimiento de polinizadores y enemigos naturales, así como también otros servicios ecosistémicos importantes, estableciéndolos a todos como objetivos centrales a la hora de diseñar los agroeco-

sistemas. Para ello es necesario incorporar realmente la visión “de sistema”, incorporar más diversidad, tener una mirada de mediano y largo plazo, realizar un uso racional de insumos y aumentar el uso de tecnologías de procesos.

La siembra de cultivos de servicios (como cultivos de cobertura, abonos verdes, cultivos trampa, puentes verdes, etc.), la rotación con pasturas, la siembra directa, las rotaciones de cultivos, el aumento de la diversidad de cultivos sembrados, la conservación de áreas de vegetación nativa como refugios, entre otras, son todas prácticas de manejo orientadas a fortalecer la salud de los ecosistemas y sus suelos, recomponiendo diversos servicios ecosistémicos deteriorados. Todos ellos deberán ser considerados en el diseño de los agroecosistemas basados en este nuevo paradigma. La transición hacia este nuevo paradigma será difícil al comienzo, pero diversas experiencias muestran que luego los agroecosistemas mejoran notablemente. La complejidad de estos agroecosistemas no debe desalentarnos, ya que los sistemas simples sabemos que finalmente fracasan y terminan siendo complicados en su manejo por su gran inestabilidad y dependencia. Deberíamos incentivar a la intensificación ecológica o sustentable, las buenas prácticas agrícolas, la agroecología o cualquier corriente que ayude a diseñar agroecosistemas que provean múltiples servicios ecosistémicos, con un fuerte énfasis en la recomposición de la salud del ecosistema y su materia orgánica del suelo.

Es importante reconocer que para lograr estos cambios nece-



sitamos productores y productoras que se comprometan con la sociedad y el ambiente, que entiendan y valoren a los ecosistemas, el suelo y la diversidad y acepten estos desafíos. También necesitamos líneas de investigación que aborden estos temas, articulando los aportes desde las instituciones públicas y privadas. Por un lado, las instituciones públicas de investigación tienen un rol fundamental en la investiga-

ción sistémica y de tecnologías de procesos, mientras que las instituciones privadas de investigación, que desarrollan principalmente tecnología de insumos, deberían complementarse y articular adecuadamente con las instituciones públicas para lograr la sustentabilidad de la producción. Las organizaciones de productores y los gobiernos también deberían ayudar para compatibilizar ambos objetivos.

Referencias

- CARVALHO, P. C. D. F.; SAVIAN, J. V.; DELLA CHIESA, T.; DE SOUZA, W.; FILHO, J. A. T.; PINTO, P.; PIÑEIRO, G. (2021). Land-use intensification trends in the Rio de la Plata region of South America: toward specialization or recoupling crop and livestock production. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. Doi 10.15302/J-FASE-2020380
- JILLING, A.; KEILUWEIT, M.; CONTOSTA, A. R.; FREY, S.; SCHIMEL, J.; SCHNECKER, J.; SMITH, R. G.; TIEMANN, L.; GRANDY, A. S. (2018). Minerals in the rhizosphere: overlooked mediators of soil nitrogen availability to plants and microbes. *Biogeochemistry* 139, 103-122.
- JILLING, A.; KEILUWEIT, M.; GUTKNECHT, J. L. M.; GRANDY, A. S. (2021). Priming mechanisms providing plants and microbes access to mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 158, 108-265.
- LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. (2019). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral associated forms to address global change in the 21st century. *Global change biology*.
- SCHMIDT, M. W.; TORN, M. S.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; KLEBER, M.; KOGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D. A.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D. P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49-56.
- SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79, 7-31.