



Principales amenazas para los suelos de uso agropecuario de la Argentina.

¿Cómo afrontarlas y qué oportunidades se presentan?

Main threats to agricultural soils in Argentina. How to face them and what are the opportunities to defend them or to avoid further damage?

Miguel Angel Taboada¹

¹Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Argentina.

Autor para correspondencia:

Correo electrónico: mtaboada@agro.uba.ar

Resumen

Los suelos de nuestro país vienen siendo afectados por procesos de erosión (mas de 100 millones de hectáreas), pérdidas de materia orgánica (30 - 60% del nivel inicial) y balances negativos de nutrientes como nitrógeno, fósforo y azufre, procesos de compactación, y de salinización y sodificación intensificados por la pérdida de bosques y pastizales y pasturas perennes. Le sumamos ahora otros procesos incipientes, como las deficiencias de potasio y micronutrientes como cinc, y acidez superficial. El elevado uso de pesticidas, en particular glifosato en sistemas de siembra directa, genera residuos en suelos y aguas. El potencial de secuestro de carbono por adopción de prácticas de manejo sustentable (rotaciones, fertilización balanceada, cultivos de cobertura, manejo del pastoreo, implantación de especies mejoradoras, etc.) en los suelos de la Argentina puede ser tan elevado como 0,6 a 0,8 toneladas de carbono por hectárea por año en los Molisoles pampeanos. Esta oportunidad que plantea la mitigación del cambio climático puede ser aprovechada por el sector agropecuario, para mejorar la trazabilidad y las huellas de carbono e hídrica de nuestros productos exportables.

Palabras clave: degradación de suelos, procesos incipientes, erosión, contaminación, cambio climático, secuestro de carbono

Abstract

The agricultural soils in Argentina have been affected by erosion (more than 100 million hectares), losses of organic matter (30-60% of the initial level) and negative balances of nutrients such as nitrogen, phosphorus and sulphur, compaction processes, and of salinization and sodicity intensified by the loss of forests, grasslands, and permanent pastures. Now we add other incipient processes, such as deficiencies of potassium and micronutrients such as zinc, and superficial acidity. The high use of pesticides, particularly glyphosate in direct seeding systems, generates residues in soil and water. The carbon sequestration potential due to the adoption of sustainable management practices (rotations, balanced fertilization, cover crops, grazing management, implantation of improving species, etc.) in the soils of Argentina can be as high as 0.6 to 0.8 tons carbon per hectare per year in the Pampas' Mollisols. Farmers can benefit from climate change mitigation by improving traceability and the carbon and water footprints of our agricultural exports.

Keywords: soil degradation, incipient processes, erosion, pollution, climate change, carbon sequestration

INTRODUCCIÓN

No es la primera vez - ni seguramente será la última - que se abordan las principales amenazas para los suelos de nuestro país. Por ejemplo, en forma más o menos reciente se publicaron importantes estudios que alertaron sobre los problemas crecientes de pérdidas por erosión (Casas y Albarracín 2016), o las causas de los cambios hidrológicos y salinización en suelos de la región central del país (Nosetto et al. 2012; Jobbagy et al. 2021; Taboada et al. 2021). Es probable que lo que ha cambiado y que justifica este estudio es el contexto nacional e internacional, que ha determinado que en el presente y el futuro sean otros los factores que operan sobre los suelos. Algunos de estos factores eran, o bien menos relevantes hasta hace unos años, o directamente no estaban presentes o no se consideraban. Vaya como ejemplo las fuertes presiones de producción sobre los suelos considerados fértiles, y el cambio climático donde los suelos son afectados por un lado y son actores relevantes por el otro.

A nivel internacional y en forma relativamente reciente, los suelos han tomado un rol protagónico antes no visto, a partir de la creación por la FAO en 2012 de la Alianza Mundial por el Suelo (<https://www.fao.org/global-soil-partnership/partners/en/>), entre cuyos primeros productos se destaca la renovación de la Carta Mundial de los Suelos Renovada (FAO 2015) y el Informe Mundial del Estado de Degradación de los Suelos (FAO y ITPS 2015). Este autor participó de este estudio como uno de los representantes del Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS, por sus siglas en inglés), y de alguna forma puede considerar a este estudio inspirador del presente en cuanto a su formato y modo de análisis. En este caso, trasladado a una escala a nivel país.

Uno de los objetivos de la presente publicación es aportar información científica relacionada con nuestros suelos, su historia de uso y su estado actual de degradación, a través de la identificación de las principales amenazas que los acechan. El segundo objetivo de esta publicación es realizar una mirada prospectiva a corto (5 años) y mediano plazo (fin de siglo) para nivel de nuestro país. Para esta prospección propongo tener una mirada de mediano a largo plazo, para no quedar invadidos por aspectos coyunturales.

La Argentina posee uno de los 10 territorios más extensos del planeta, cubriendo 2,78 millones de km² a lo largo de 4176 km, lo cual determina que nuestro territorio se extienda por varias latitudes geográficas con climas subtropicales en el noroeste y en el nordeste del territorio (NOA y NEA), climas templados en el centro y climas templado-fríos en el sur. Si bien el ancho máximo es menor (1408 km), existe un gran desnivel en cuanto a alturas por la existencia de la cordillera de los Andes en todo el cordón oeste del territorio con alturas máximas de casi 7000 m, las que descienden hasta llegar al nivel del mar en toda la franja riberena y oceánica en el este. Aproximadamente, las terceras partes del territorio poseen climas áridos y semiáridos, con menos de 600 mm de precipitación anual. Las condiciones de aridez tienen lugar hacia el oeste del río Colorado hacia el norte del país, y hacia el este en toda la Patagonia. Semejante heterogeneidad climática da lugar a una marcada heterogeneidad fisonómico-florística dentro de provincias fitogeográficas con 50

unidades de vegetación como subdivisiones de las provincias fitogeográficas (Figura 1).

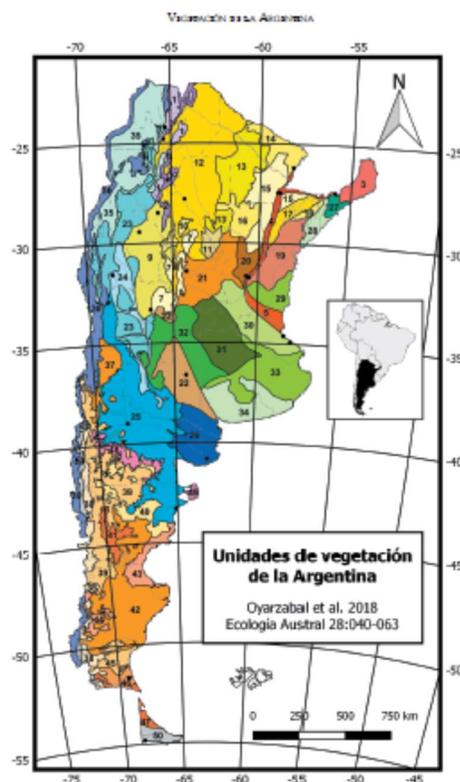


Figura 1. Unidades de vegetación de la Argentina agrupadas en provincias y ecotonos fitogeográficos, dominios y regiones. Se indican los nombres fisonómico-florísticos propuestos y los nombres populares o más conocidos. Las líneas grises punteadas corresponden a los límites de las provincias políticas y las llenas a los principales ríos. Los círculos negros indican las ciudades capitales. Fuente: Oyarzabal et al. 2018.

Si se excluyen las superficies montañosas y las cubiertas permanentemente con agua, La Argentina posee unas 160 millones de hectáreas con suelos que poseen aptitud de uso agropecuario (Casas 1986). De ellos, se están cultivando con cultivos agrícolas unas 35 millones, superficie que se corresponde con los suelos de mayor aptitud o más fértiles. Esa superficie cultivada se corresponde casi totalmente con la distribución del Orden de Suelos Molisoles, que cubre unos 30 millones de hectáreas (Figura 2). El Orden Molisoles incluye suelos minerales altamente fértiles, a menudo evolucionado bajo la vegetación de pastizales, aunque también puede ser asociado a los bosques. Se han desarrollado a partir de varios materiales parentales y en diferentes climas, aunque predominan en climas templados. Sus perfiles tienen un color oscuro y epipedón mólico bien estructurado y una alta saturación de bases de la superficie del suelo. Los molisoles son el orden de suelos más extenso de la Argentina, ocupando (como se dijo) el 30% del territorio (Rodríguez et al. 2019; Rubio et al. 2019).

Ordenes Dominantes en los Suelos de la Republica Argentina

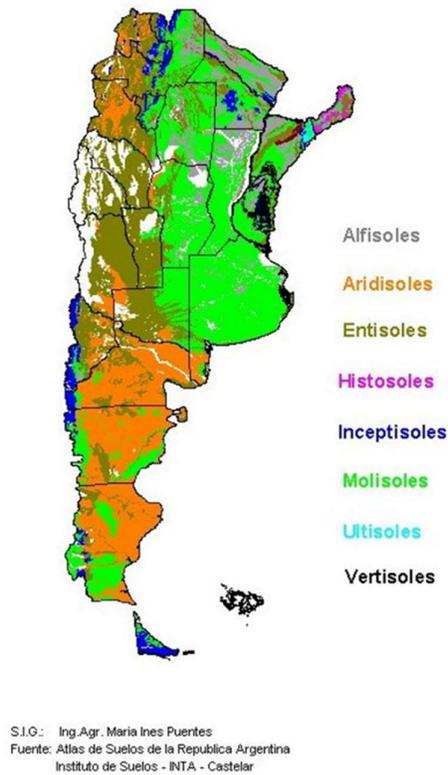


Figura 2. Mapa de los Ordenes de Suelos dominantes de la Argentina (basado en SAGyP-INTA 1990).

HISTORIA DE USO Y PERSPECTIVAS

A diferencia de los suelos de Europa o de Asia, con historias de uso que se remontan a miles de años, pero al igual que los suelos de otras partes de América o de Oceanía, la historia de uso de nuestros suelos se relaciona con la llegada de los conquistadores españoles en el siglo XVI, que en principio trajeron ganado y algunas semillas para consumo de los primeros habitantes. Por muchos años, la principal presión de uso sobre los suelos ocurría alrededor de los centros poblados de europeos, y comenzaban a ocurrir los primeros cambios sobre la vegetación nativa causados por la diseminación de ganado (vacunos y equinos) que vivían libremente. La agricultura no tuvo por décadas un papel importante, en parte por la idiosincrasia de los habitantes europeos que consumían algunas verduras que cultivaban y la carne del ganado cazaban en incursiones periódicas en los campos. Los pobladores originarios eran en su mayor parte tribus nómades, que se dedicaban a la caza y la pesca, la recolección de frutos, y el intercambio de bienes con los invasores europeos en periodos de paz temporaria (De Marco 2010).

No fue sino hasta después de fines del siglo XIX con la expansión de la ganadería conectada a exportaciones de carne refrigerada y la subdivisión de la tierra con alambrados, en que lo entonces era la Argentina que hasta entonces había ocupado una posición periférica y marginal en el imperio español, se transformó en uno de los principales exportadores mundiales de productos primarios, y en uno de los países de mayor crecimiento a escala global (Hora, 2010). Según dice este autor, *“El país poseía una enorme reserva de tierra de superior calidad, particularmente apta para la producción del tipo de bienes que la industrialización y la urbanización de las economías centrales reclamaban en cantidades crecientes. A lo largo del siglo, la incorporación de nuevas tierras a la producción permitió multiplicar más de veinte veces el área en explotación, sin que ésta se viera afectada por rendimientos decrecientes (como suele suceder cuyo el crecimiento avanza sobre tierras menos fértiles) que redujeran los retornos del capital y el trabajo. Y desde mediados del siglo la expansión de la frontera corrió paralela (y en alguna medida también las requirió) al empleo de técnicas productivas más avanzadas que incrementaron la productividad de los factores de producción. Merced al desplazamiento de la ganadería tradicional por la cría de lanares y vacunos refinados, luego complementada por la expansión agrícola, el suelo pampeano adquirió usos cada vez más productivos, e hizo posible un incremento muy considerable del ingreso agrario. Las enormes ventajas comparativas de origen natural que poseía el sector de exportación permitieron que la Argentina se beneficiara con un nivel de ingreso muy superior al que hubiese correspondido a las destrezas y esfuerzos de sus empresarios y trabajadores, y a la calidad de su organización institucional”* (Hora, 2010. p. 258-259).

Pese a lo manifestado acerca del no decrecimiento de rendimientos de cultivos (Hora, 2010), la actividad agropecuaria de la Argentina estuvo basada en el uso de cultivares de moderado potencial de rendimiento, en especial en cultivos como maíz cuyos incrementos de rendimiento entre 1965 y 2010 fueron debidos a una tolerancia del cultivo a altas densidades de siembra (Di Matteo et al. 2016), y uso de sistemas de labranza convencional con arados de reja y de disco, sistemas mecánicos de control de malezas (Satorre, 2005). El moderado potencial de rendimiento de los principales cultivos, sumado a que los suelos aun conservaban gran parte de su fertilidad original, hizo que se pensara en que no se requería el uso de fertilizantes sintéticos (Lavado y Taboada, 2009), a diferencia de lo que sucedía en muchos países en vías de desarrollo donde la denominada “Revolución Verde” permitió el aumento de las producción de trigo y arroz basado en el mayor uso de fertilizantes nitrogenados y agroquímicos, ambos fabricados con combustibles fósiles (Jain, 2010). Este sistema de uso del suelo que se prolongó hasta finales del siglo XX generó importantes pérdidas de materia orgánica en los suelos, entre 30 y 50% de la original, además del avance de procesos erosivos por el agua y el viento que llevaron al desarrollo de cárcavas (Casas y Albarracín, 2016).

El avance de los procesos erosivos de suelo, a un nivel de gravedad antes no experimentado, y el mayor costo de los combustibles, despertó el interés de los productores a finales del siglo XX por los sistemas de la labranza conservacionista,

como los sistemas de labranza vertical y los arados de cincel, y en forma incipiente, de los sistemas de labranza cero, en esa época con muchos inconvenientes para lograr un efectivo control de malezas (Satorre, 2005; Viglizzo et al. 2010). Por esa época se cultivaban unas 16 millones de hectáreas (Figura 3), se producían algo más de 30 millones de toneladas de granos (Figura 4), y el trigo, maíz y soja eran en ese origen los principales cultivos, acompañados por cebada, girasol y sorgo.

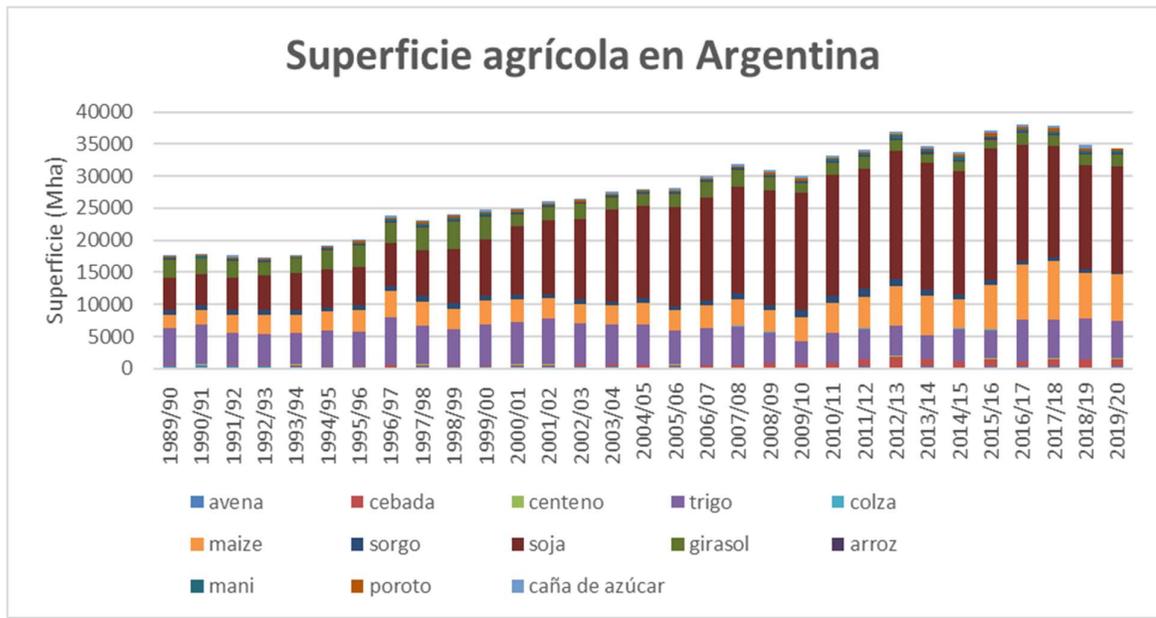


Figura 3. Superficie cosechada anual de cultivos anuales de la Argentina entre 1989/90 y 2019/20. Construido a partir de información del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Disponible en:

<https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/>

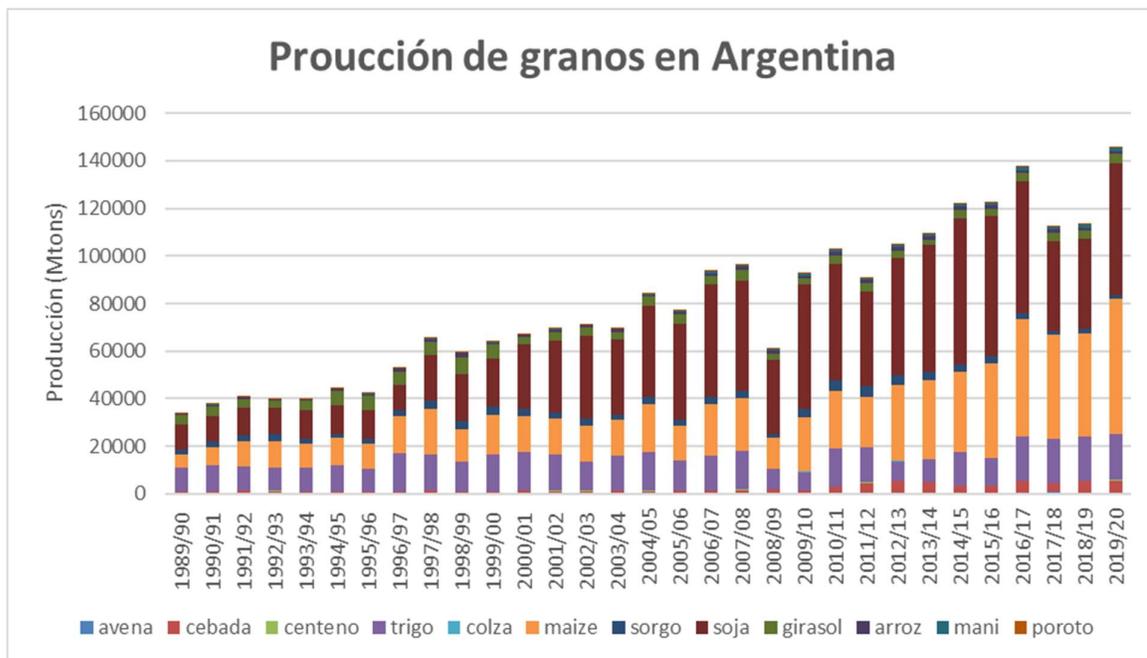


Figura 4. Producción de los principales cultivos de granos en la Argentina entre 1989/90 y 2019/20. Construido a partir de información del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Disponible en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/>

En tres décadas se experimentó un cambio notable en la producción de cultivos, que generó la duplicación del área sembrada, actualmente en 37 millones de hectáreas, y la cuadruplicación de la producción de cultivos de grano que superó los 140 millones de grano. Esta expansión del área de siembra tuvo lugar hacia el oeste pampeano, a costa de la desaparición de pasturas para engorde de ganado, y hacia el NOA a expensas de elevadas tasas de deforestación. Este pico de cambios tuvo lugar entre 2007 y 2010, cuando se alcanzaron los mayores precios de los *commodities* agropecuarios, en especial la soja. Mucho de la deforestación fue para la siembra de verdeos megatérmicos como el Gatton Panic y la grama Rhodes, para dar alimento a la hacienda desplazada hacia esos lugares. En cambio, la pérdida de pasturas fue a expensas del aumento del área sembrada con soja. Todo este modelo de uso se hizo en base a los sistemas de siembra directa, el control químico de malezas con glifosato y atrazinas, y un mayor uso de fertilizantes en la región pampeana. Estos cambios fueron impulsados por la irrupción en 1996 de la soja transgénica, con el gen RR (*round up ready*), y partir de 2005 con la incorporación al mercado de híbridos simples de maíz con mayor respuesta a la fertilización nitrogenada. La siembra directa tuvo una adopción masiva por los productores agropecuarios, llegando a niveles superiores al 90% de la superficie. Las rotaciones se fueron simplificando y se llegó a una gran prevalencia del cultivo de soja (61%) en la campaña 2015/16. En esa campaña agrícola se llegaron a sembrar 34 millones de hectáreas (Fig. 3), el doble que 30 años atrás, aunque como se puede apreciar con una agricultura extensiva muy simplificada en rotaciones.

Estos cambios de modelos de producción generaron un enorme desarrollo de agroindustria, pero también consecuencias no deseadas de tipo social, con desplazamiento de poblaciones, y de tipo ambiental con simplificación del paisaje, pérdidas de biodiversidad, y desequilibrios hidrológicos con mayor incidencia de inundaciones (Viglizzo et al. 2010; Nosetto et al. 2012; Andrade et al. 2017). Hubo un avance de la degradación de tierras por mayores pérdidas de materia orgánica, desbalance de nutrientes, y salinización, pero los problemas erosivos se mitigaron en cuanto a su gravedad, no en superficie (Viglizzo et al. 2010; Casas y Albarracín, 2016).

De acuerdo con Satorre y Andrade (2021), el ritmo de expansión agrícola sobre tierras arables tendió a reducirse en los últimos años, comparado con períodos anteriores. Sin embargo, la superficie sembrada continuó creciendo con una tasa constante cercana a 641.000 hectáreas por año debido al aumento de la superficie sembrada con maíz y a la intensificación del uso del suelo de la mano de la cebada y el trigo en doble cultivo con especies 'de segunda' –soja, y en menor medida maíz– sobre los rastrojos de estos cereales de invierno. Cerca del 25-35% de la superficie de soja fue sembrada sobre cultivos de invierno en los últimos quince años.

Se observa en los últimos años una intensificación de la agricultura extensiva, con la adopción de muchos avances tecnológicos como la agricultura por ambientes y agricultura de precisión, las herramientas *Ag-tech*, como los robots y señalizadores para control de malezas y plagas, la fertilización variable, etc. Sin embargo, esto se une a otra realidad que es la dominancia marcada del alquiler de campos y el uso de contratistas como sistema de producción. La realidad es que la producción de octuplico en 30 años, y para ello fue necesario desarrollar un fenomenal sistema tecnológica para tareas de campo (siembra, cosecha, fumigaciones, etc.), transporte y almacenamiento de granos, puertos y procesamiento. Actualmente, la producción extensiva aparece en transición buscando reconstruirse y atenuar los efectos no deseados. Enfrenta el desafío de satisfacer las demandas futuras cuidando el medio ambiente y asegurando rentabilidad y un desarrollo inclusivo y equitativo con las tecnologías de procesos basadas en conocimientos (Satorre y Andrade, 2021).

PRINCIPALES AMENAZAS PARA LOS SUELOS DE LA ARGENTINA Y FACTORES QUE LOS IMPULSAN

Antes del siglo XX, el suelo se consideraba casi exclusivamente en el contexto de la agricultura y la producción de alimentos. En los últimos 150 años, a medida que el impacto global de la humanidad sobre los recursos naturales ha aumentado, comenzaron a establecerse conexiones entre el suelo y preocupaciones ambientales más amplias. De acuerdo con una síntesis realizada por Bockheim y colegas (en FAO y IPTS 2015, p. 7), con el avance y complejización de los conocimientos en los últimos 150 años, también se han complejizado las aplicaciones a los suelos, las cuales se han expandido rápidamente en las últimas dos décadas. Tomando el último medio siglo, los avances más destables en cuanto a manejo de los suelos fueron el

estudio de la capacidad de uso de las tierras y de la degradación inducida por el ser humano (GLASOD) entre 1960 y 1985, la mayor comprensión de los procesos que explican la calidad y salud del suelo, y su manejo sostenible (1985-2000), y los conceptos de seguridad del suelo y secuestro de carbono por los suelos en los últimos 20 años. Es por ello por lo que en un editorial Hartemink (2008) haya sostenido que los suelos han regresado en la agenda global.

La seguridad del suelo se ha definido como el mantenimiento o la mejora de los recursos del suelo para que puedan proporcionar suficientes alimentos, fibra y agua dulce, contribuir a la sostenibilidad energética y climática estabilidad, mantener la biodiversidad y brindar protección ambiental general y servicios ecosistémicos (Bouma y McBratney, 2013). Las conexiones entre los suelos y los problemas sociales, como la seguridad alimentaria, la sostenibilidad, el cambio climático, secuestro de carbono, emisiones de gases de efecto invernadero y degradación por erosión y pérdida de materia orgánica materia y nutrientes – son fundamentales para el concepto recientemente desarrollado de seguridad del suelo (McBratney et al. 2014).

La Estrategia Temática de Suelos de la Unión Europea (CEC, 2006) formalizó el concepto de amenazas al suelo y sus múltiples funciones. Se identifican cinco amenazas específicas:

- (1) la erosión por viento y agua;
- (2) la disminución de la materia orgánica;
- (3) desbalance de nutrientes
- (4) la compactación;
- (5) la salinización; y
- (6) los deslizamientos de tierra y material rocoso.

En otra parte de la Directiva, también se identifican como amenazas:

- (7) el sellado del suelo (la cobertura permanente del suelo con una superficie impermeable); y (8) la contaminación del suelo (la introducción intencional o involuntaria de sustancias peligrosas sobre o en el suelo).

La Unión Europea (CEC, 2006) reconoce siete funciones del suelo que son vulnerables a las amenazas mencionadas:

- (1) producción de biomasa, incluidas la agricultura y la silvicultura;
- (2) almacenamiento, filtrado y transformación de nutrientes, sustancias y agua;
- (3) reserva de biodiversidad, como hábitats, especies y genes;
- (4) entorno físico y cultural para los seres y las actividades humanas;

- (5) fuente de materias primas;
- (6) actuación como reservorio de carbono;
- (7) archivo del patrimonio geológico y arqueológico

El proceso de degradación del recurso está asociado con la intensidad de las labranzas, la duración de los ciclos agrícolas, la tendencia al monocultivo, y la no reposición de nutrientes, entre otros factores. La Figura 5 presenta un diagrama esquemático de los impactos que ejerce la agricultura sobre los suelos, las variables de estado y factores que intervienen, y los diferentes tipos de procesos de degradación de suelos resultantes. La agricultura afecta el estado y las propiedades de los suelos pudiendo causar impactos negativos que difieren en su duración, nivel de severidad y grado de reversibilidad. Estos impactos son los que se conocen como procesos de degradación de suelos (Scherr, 1999). La velocidad e incluso la dirección de estos cambios es modulada por variables externas al suelo, como son los cambios de uso de la tierra que alteran los equilibrios existentes, y el cambio o variabilidad del clima fundamentalmente a través de eventos extremos como temporales, sequías y cambios importantes de las temperaturas máximas y mínimas diarias (Andrade et al. 2017).

Las amenazas sobre los suelos del país pueden ser clasificadas como vigentes y las incipientes. Las primeras han sido ya reconocidas por numerosos estudios y sólo cabe identificarlas, analizar su estado actual y probable evolución futura, mientras que las incipientes son aquellas de reciente aparición, a menudo sorpresiva. En este caso se analizan las causas de su aparición y también su probable evolución. Falta otro tipo de amenazas, que son aquellas aun no detectadas, pero que se considera que puede haber un riesgo probable de aparición en un futuro cercano. En este caso, se analiza cuáles serían, por qué aparecerían y como evolucionarían. En todos los casos, se analizan las medidas de control o mitigación.

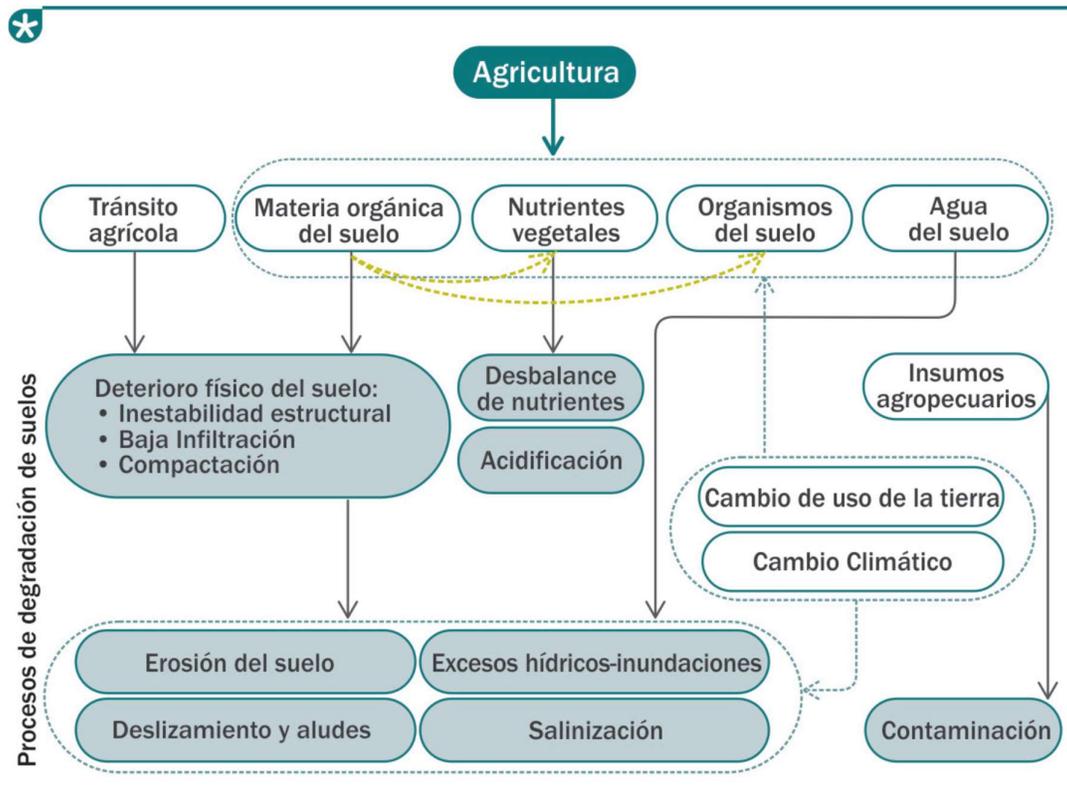


Figura 5. Diagrama que muestra los impactos de la agricultura sobre los suelos, las variables de estado y factores intervinientes, y los diferentes procesos de degradación de suelos resultantes. Fuente: Andrade et al. 2017.

Amenazas vigentes

La erosión por el viento y por agua

De acuerdo con una síntesis de varios metaanálisis realizados (FAO y ITPS 2015), las pérdidas de suelo por erosión son responsables a nivel global de una mediana de pérdidas de rendimiento de cultivos de 0,3%, las que de continuar como hasta se estima que pueden llegar a significar un 10% de pérdida potencial anual del 10% del rendimiento de los cultivos en 2050. Las pérdidas por erosión afectaron a todos los suelos de los continentes puestos bajo cultivo por expansión agrícola en el siglo pasado, lo cual afectó fundamentalmente a América en su totalidad, Oceanía y parte de África. Sin embargo, luego de las pérdidas de suelo sufridas, algunas regiones muestran hoy una tendencia a la mejora, sea por la implementación de prácticas de conservación de suelos, como por la detención del avance de la agricultura sobre suelos frágiles o vulnerables. Esta situación de relativa mejora ha sido mencionada para partes de Europa, América del Norte y Oceanía en el Pacífico Sudoeste. En cambio, en el mismo informe se señala una muy pobre y pobre condición de los suelos en lo que respecta a erosión en Latinoamérica y el Caribe, al igual que en el Norte y Nordeste de África, África y Sur del Sahara, y Asia (FAO y ITPS 2015). O sea

que la Argentina es ubicada en cuanto a la erosión entre los países donde el problema está lejos de ser solucionado.

Efectivamente, puede considerarse que ello es así. Hace pocos años, Casas y Albarracín (2016) realizaron una compilación del estado de degradación de los suelos de la Argentina, sobre la base de un estudio de similares características realizado dos décadas antes por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca a nivel de todas las provincias (SAGyP-CFA 1995). Resulta interesante comparar las conclusiones de ambos estudios, dado que en los 20 años que los separan se produjo la expansión del área agrícola y el incremento de la producción de granos (Figuras 3 y 4). Esta comparación es posible en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Erosión del suelo en la Argentina clasificada por tipos y grado de severidad. Fuente: Casas y Albarracín (2016).

	EROSIÓN DEL SUELO (MILLON HA)				
	Total	Eólica	Hídrica	Ligera-Moderada	Severa
1956 (1)	34,2	16	18,2	27,1	7,1
1986 (2)	46,4	21,4	25,0	22,4	24,0
1990 (3)	58,0	28,0	30,0	27,0	31,0
2015 (4)	105,6	41,0	64,6	72,3	33,3

(1) Instituto de Suelos (1957), (2) PROSA-FECIC (1988), (3) Instituto de Suelos – INTA (1990), (4) Casas R. R. – PROSA-FECIC (2015).

La superficie afectada por erosión hídrica en la Argentina es de alrededor de 72 millones de hectáreas (26 % del territorio nacional) (Gaitán et al., 2017). Si solo se consideran las provincias de la región Chaco-Pampeana, la superficie afectada por erosión llega a alrededor de 45 millones de hectáreas, fundamentalmente erosión hídrica, representando aproximadamente 2/3 partes de la superficie con aptitud de uso agropecuario. La erosión hídrica se origina en pérdidas de materia orgánica y estabilidad estructural, que promueven menores tasas de infiltración y mayores escurrimientos superficiales. Una excepción son los sitios montañosos donde se han desarrollado deslizamientos de laderas y aludes, asociados con deforestación y ocurrencia de eventos extremos del clima. Por otro lado, el sobrepastoreo es causal de erosión eólica en vastas extensiones del país (Villamil et al., 2001; Gaitán et al., 2017). La gravedad de estos procesos es marcada por su escasa o nula reversibilidad.

Entre 1956 y 2015 se observa una triplicación del área afecta por erosión. Hasta 1990 hubo un equilibrio entre la erosión hídrica (51-53%) y la eólica (47-49%), hecho que se alteró en 2015 en que la erosión hídrica prevaleció (61%). Las

formas de erosión severa, que implica pérdida definitiva de suelos y presencia de cárcavas de erosión, fueron minoritarias al inicio (20,8% en 1956), pasaron a ser algo más de la mitad en 1986 y 1990, para volver a descender a 31,5% en 2015. Actualmente un 36% del territorio argentino se encuentra afectado por diversas formas y grados de erosión.

Se puede especular sobre los factores causantes de estos cambios. Por un lado, el aumento del área erosionada total se relaciona estrechamente con el avance del área cultivada, pero en particular, con el avance sobre áreas frágiles o vulnerables a expensas de deforestación en el NOA y en el NEA (Figura 6).

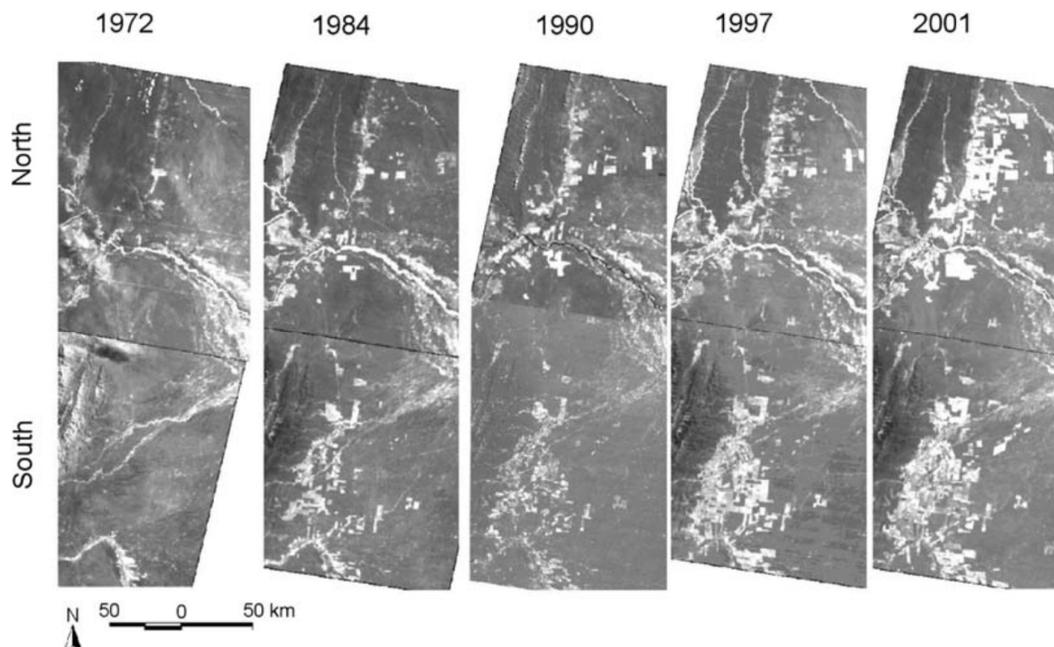


Figura 6. Imágenes Lysat muestran la cobertura del suelo por bosques (áreas oscuras) y áreas sin bosques (áreas claras, agricultura) en 1972–1975 (MSS), 1984, 1989–1992, 1997 y 2001 (TM). Fuente: Grau et al. (2005).

En los últimos 25 años solo las formas moderadas y leves de erosión crecieron, mientras que las severas o graves (ej. cárcavas) se mantuvieron constantes. Esta falta de agravamiento puede atribuirse a la generalizada (más del 90%) adopción de sistemas de siembra directa por los agricultores, que limitó las pérdidas de suelo (Viglizzo et al., 2010). Por un lado, hubo provincias como Entre Ríos donde se fomentaron los planes de conservación de suelos, lo cual facilitó la construcción de terrazas para controlar procesos de erosión (Figura 7 arriba). Por otro lado, si bien la adopción de siembra directa permitió controlar las pérdidas de suelo, la tendencia al monocultivo de soja, o a rotaciones poco intensificadas con escasa o nula presencia de cultivos de invierno, dio lugar al desarrollo de cárcavas en suelos bajo pendiente, aun manejados con sistemas de siembra directa (Figura 7 abajo).

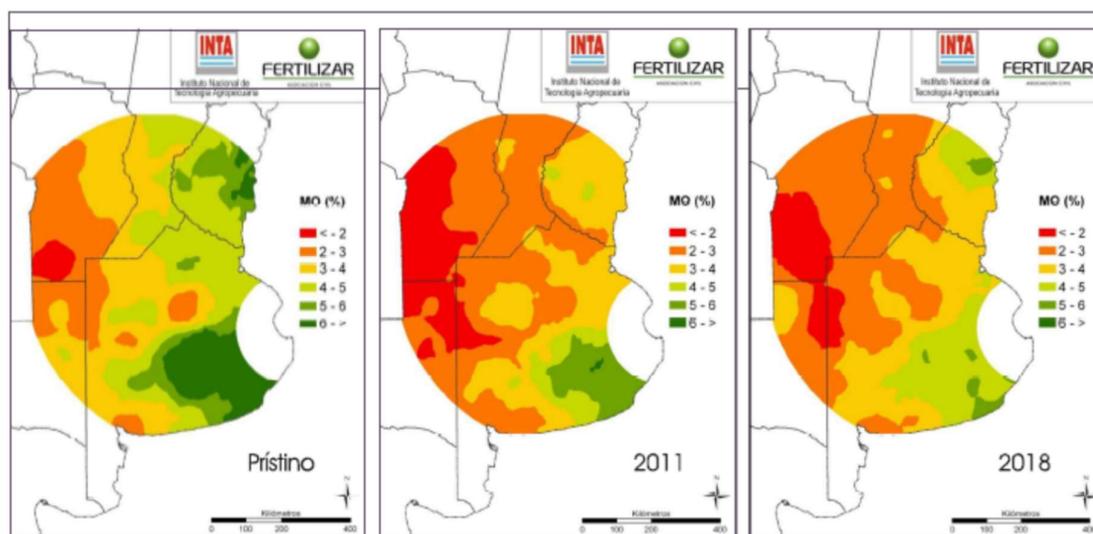


Figura 7. Fotografía de un paisaje con sistemas de terraza para controlar erosión en la provincia de Entre Ríos. Fuente: Panigatti (2010) (arriba); Fotografía de un suelo de la cuenca del río Arrecifes manejado con siembra directa, con rastrojos de un cultivo de soja sembrado a favor de la pendiente, y con presencia de una cárcava de erosión.

Disminución de la materia orgánica

A nivel global el estado de los almacenes de materia orgánica ha sido señalado como de condición pobre en todas las regiones del mundo, excepto en América del Norte y el Sudoeste del Pacífico (FAO y ITPS 2015). En particular, la tendencia es declinante en Latinoamérica y el Caribe y todo el continente africano.

Existen registros confiables que permiten saber que los niveles de materia orgánica de los suelos de uso agropecuario han disminuido sensiblemente ya por el final del siglo pasado. En esa época, el descenso y pérdida de almacenes de carbono fue atribuido al uso de sistemas de labranza agresivos (arados de reja y vertedera, de disco, rastras de disco, etc), para operaciones de siembra y de control mecánico de malezas (Álvarez et al. 2009; Andrade et al. 2017). Se ha mencionado pérdidas de almacén de carbono de 30 a 60%. Una evidencia reciente la provee los mapas editados por investigadores de INTA Balcarce (Figura 8). Esta información puede considerarse actualizada pues proviene de datos aportados por laboratorios de suelos en las muestras que reciben y que pudieron ser localizadas. Se puede observar un lógico achicamiento del área con elevados porcentajes de materia orgánica entre la condición prístina y 2011, pero llama mucho la atención el rápido aumento de las áreas “rojas” y “anaranjadas” en relación con las “verdes” entre 2011 y 2018. Ello muestra que aun con un manejo teóricamente conservacionista con siembra directa, los suelos continuaron perdiendo materia orgánica.



Distribución de los contenidos de materia orgánica (MO) del horizonte superficial (0-20 cm) en suelos prístinos (muestreados en 2011) y con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018. En 2011 y 2018 las muestras se tomaron del mismo lote.

Figura 8. Fuente: Sainz Rosas et al. (2017).

Si se observa con detenimiento los mapas de 2011 y 2018 de la Fig. 8, se percibe que el área “verde” que más desapareció es en provincia de Buenos Aires en el oeste, hecho que puede atribuirse a la desaparición de pasturas plurianuales con el auge de la soja. No se sabe si esta caída de materia orgánica continuará, o si se recuperará con otras rotaciones mas intensas con cultivos de invierno y cultivos de cobertura.

Un área de mejora que se identifica es la actualización de la cartografía de suelos en cuanto a materia orgánica y carbono, dado que la mayor parte de la información que se dispone en el Sistema nacional de Información de Suelos (SISINTA) son datos de hace entre 30 y 50 años de los perfiles muestreados en la época del Plan Mapa de Suelos. Esta información es sumamente útil, pero no captura los cambios sucedidos posteriormente con la siembra directa y el fenómenos de sojización (Satorre 2005; Andrade et al. 2017).

La deforestación es otra causa de pérdida de materia orgánica de los suelos. En un trabajo con 16 puntos de muestreo a 1 metro de profundidad al este de Santiago del Estero, sobre suelos Argiustoles y Haplustoles limosos, Osinaga et al. (2018) hallaron que los almacenes de carbono orgánico en el bosque eran 120,17 ton C/ha, mientras que luego de sólo ocho años de agricultura de verano (soja, maíz y algodón) descendieron a 81,82 ton C/ha. Sin embargo, esa gran pérdida de carbono casi se detuvo 12 años más adelante (20 años de deforestación) con 76,5 ton C/ha. Ello muestra que la mayor parte de las pérdidas de carbono de suelo ocasionadas por la deforestación tienen lugar rápidamente en los primeros años. Otro de los manejos clásicos de la región, la pastura de Gatton Panic para pastoreo de vacunos logró recuperar las pérdidas de carbono parcialmente a 94,6 ton C/ha.

Desbalance de nutrientes

El desbalance de nutrientes afecta a los mismos países que el caso de materia orgánica (FAO y ITPS, 2015), pero sin embargo las causas que los generan son opuestas entre algunos lugares. En la Argentina, debido a restricciones económicas históricas que alteraron las relaciones de cambio entre insumos y productos, lo que prevaleció fueron los desbalances negativos de N, P y S. (Figura 9).

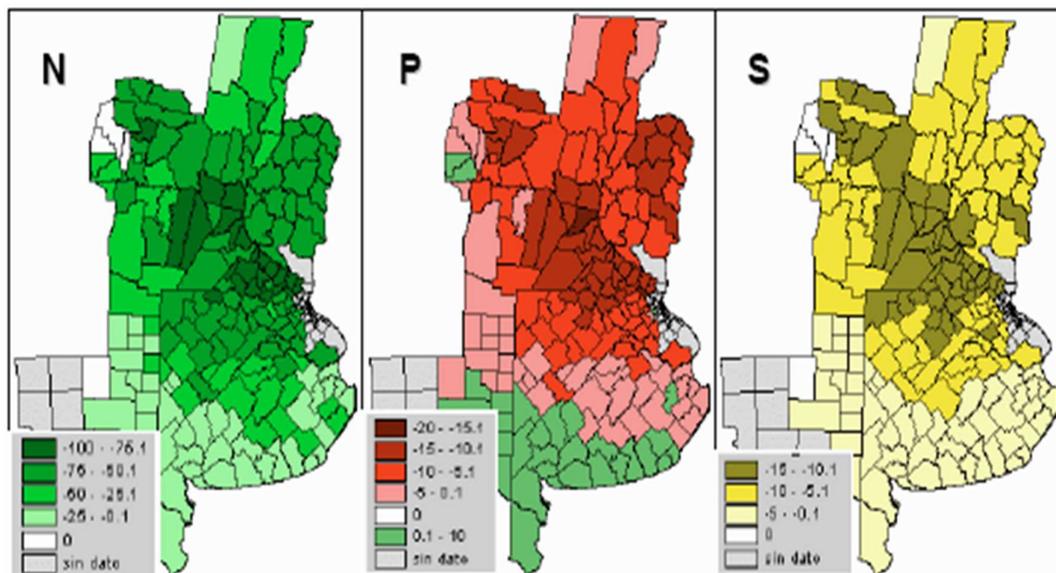
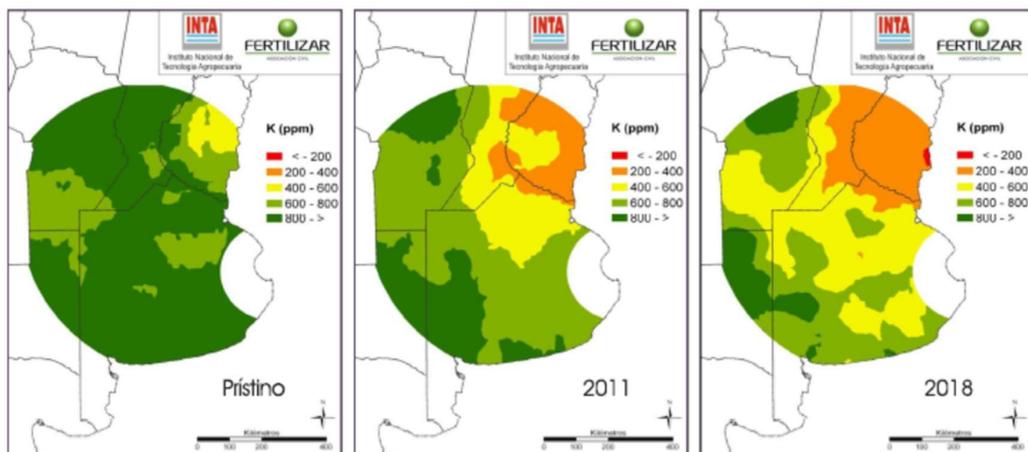


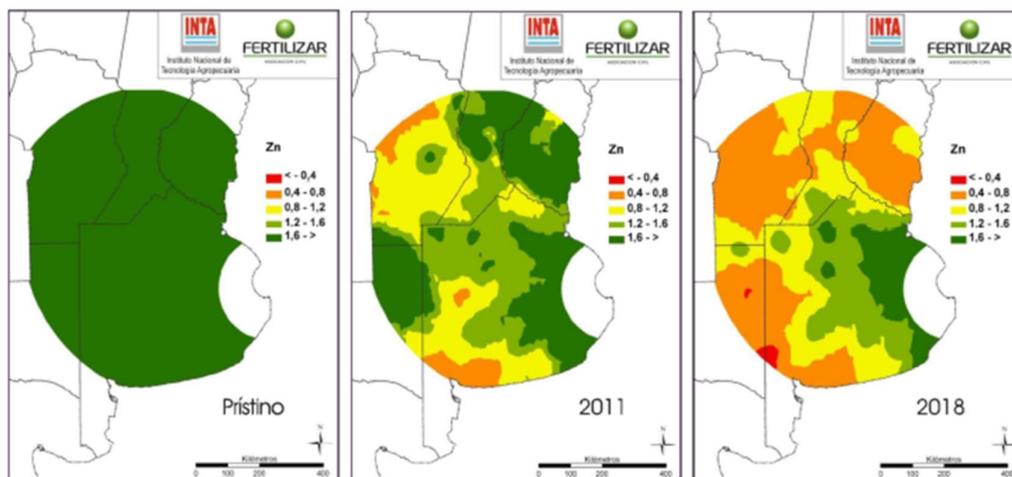
Figura 9. Balances estimados de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) en las provincias y departamentos de la región pampeana argentina para la campaña 2002/03. Los balances se estimaron a partir de la diferencia entre la extracción de nutriente en grano y la aplicación vía fertilización en trigo, maíz, soja y girasol. Elaborado a partir de información de la Fundación Producir Conservando y Fertilizar A.C. (García, 2006).

En el caso del P, la Argentina posee regiones enteras con bajos niveles atribuibles al material parental, como es el caso de la Mesopotamia y el Sudeste Bonaerense. Excepto esos casos, los suelos han podido sostener rendimientos adecuados de trigo y maíz hasta hace tres décadas aproximadamente. Desde la introducción al mercado de híbridos de maíz de alto potencial en la década del 90, y el natural decrecimiento de la fertilidad natural de los suelos por falta de reposición, ello motivo que se generara la necesidad de fertilizar con N y P (Lavado y Taboada 2009). La cantidad de fertilizante nitrogenado usado aumentó unas ocho veces en las últimas décadas. No obstante, los suelos siguen siendo deficitarios en N y P y se requiere la adición de fertilizantes.

Como surge de la Figura 4, la producción de granos pasó a quintuplicarse en 30 años, sin la correspondiente reposición de nutrientes. Ello no sólo afectó a los niveles de N y P, sino también a otros nutrientes que antes se consideraban bien provistos los suelos, como las bases de cambio (K, Ca y Mg), un descubrimiento sorprendente de los últimos años, al igual que la acidificación incipiente de muchos suelos antes con pH neutro (Figura 10).



Distribución de los valores de potasio intercambiable (K) en la capa superficial (0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y agrícolas (muestreados en 2011 y 2018).



Niveles de cinc (Zn) extractable con DTPA (mg kg^{-1} ; 0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y de suelos con prolongada historia agrícola (muestreados en 2011 y 2018).

Figura 10. Sainz Rosas et al. (2017).

Además de mostrar la necesidad de reponer nutrientes antes no considerados deficitarios, se destaca la llamativa ampliación del área deficitaria en Zn, un micronutriente esencial que también es deficitario en otras partes del mundo y afecta la calidad nutricional de muchos alimentos.

Compactación

La compactación de los suelos, entendiéndose por tal a la densificación antrópica de los primeros centímetros de los suelos a causa del tránsito de maquinaria es un proceso de tipo reversible en la mayor parte de los suelos del mundo. De acuerdo con FAO y ITPS (2015), la compactación afecta principalmente a suelos de Asia, Latinoamérica y Caribe y Norte y Nordeste de África. Los procesos de compactación excesiva o severa son los más preocupantes. En general, son causados por el excesivo tránsito de maquinaria agrícola y por el pastoreo de ganado doméstico. En nuestro país, es un proceso difundido en muchos suelos agrícolas manejados con

siembra directa, en los cuales afecta con estructuras laminares y masivas a los primeros 20 centímetros de los suelos. Estas densificaciones y estructuras desfavorables afectan negativamente la infiltración de agua a los suelos, por lo que se relacionan con la erosión por el agua, y el desarrollo de raíces en gran parte del perfil (Peralta et al. 2020; 2021). Una mala condición física de los suelos ha sido señalada como una causa de menores rendimientos en cultivos de soja (Bacigaluppo et al. 2011).

Álvarez et al. (2014) hallaron que la presencia de estructuras desfavorables obedece más que a la presencia de soja, a la mayor frecuencia de cultivos de verano de alto rendimiento como el maíz, cuya cosecha en otoños húmedos promueve la presencia de huellas de rodados y compactaciones en los suelos. Este resultado es interesante, pues da indicios de que la solución no paso tanto por promover más cultivos de invierno como trigo, lo cual está bien, sino en controlar el tránsito agrícola en períodos críticos. La presencia de estas estructuras es fácilmente identificable en el campo (Figura 11).



Figura 11. Izq. Estructuras laminares y masivas en un suelo franco arcillo limoso (Serie Peyrano) manejado con rotaciones con predominio de soja (Fotografía: Guillermo Peralta y Belén Agosti); derecha: idem en un suelo limoso cultivado con soja y algodón oeste del Chaco.

A diferencia de los procesos erosivos que generan daños irreversibles, la compactación y estructuras desfavorables asociadas son en general reversibles, con medias adecuadas de manejo de la rotación y tránsito agrícola. Sin embargo, cuyo persisten en el tiempo generan daños importantes pues se asocian no solo con menores rendimientos agrícolas, sino también con mayores pérdidas por erosión y anegamientos (Figura 12), dado que las estructuras desfavorables poseen siempre bajas tasas de infiltración.



Figura 12. Lote encharcado después de una tormenta. Esto indica una mala condición física del suelo superficial. Fotografía: Alberto Quiroga.

Salinización y sodificación de suelos

Los suelos afectados por sales están distribuidos en todo el mundo y desde hace muchos años se diferencia la llamada salinización primaria, de la salinización secundaria. La primera ocurre en los suelos por causas naturales, ajenas a la actividad antrópica. Es el caso característico de muchas áreas de zonas áridas, en las cuales las sales solubles están presentes en el perfil del suelo simplemente porque no se lavan por falta de suficientes lluvias. La salinización secundaria es causada por la actividad de la agricultura: irrigación, cultivos, forestación y deforestación, producción ganadera, etc. Las causas de ambos tipos de salinización son las mismas. Generalmente, la salinización secundaria es provocada por la rotura del equilibrio hídrico, lo que causa la re-movilización de las sales desde fuentes cercanas (subsuelos salinos, aguas subterráneas, etc.). Los suelos salinos y los suelos sódicos no se encuentran absolutamente separados, pero en general los primeros tienden a predominar regiones áridas y semiáridas y los segundos en las regiones húmedas.

La Argentina es el país de Latinoamérica con la extensión más grande de suelos afectados por sales, tanto salinos como sódicos, con una superficie de 85×10^4 km² (Lavado 1984). Alrededor de 630 000 ha (alrededor de 1/3) del área irrigada está afectada por algún grado de salinización (60%) y sodificación (40%). La mayoría de los suelos salinos se han desarrollado en zonas con menos de 700 mm/año lluvia, mientras que la mayoría de los suelos sódicos se encuentran en zonas con más de 700 mm/año de lluvia. Los suelos sódicos generalmente se han desarrollado también en áreas subhúmedas del Región Pampeana, donde se utiliza el riego complementario para cultivos como la soja, maíz, trigo, caña de azúcar, cultivos de frutas y verduras, utilizando aguas subterráneas poco profundas ricas en bicarbonato de sodio (varios autores citados por Pla Sentis, 2021).

Además de la superficie salinizada bajo riego, existen unos 50.000 km² de suelos áridos afectados por sales (en su mayoría sódicos), en la denominada Pampa Deprimida (Pampa inundable) (Taboada et al. 2017). Se estima que en más de 5.000 km² de esas tierras, los problemas se han agravado en las últimas décadas, con crecientes inundaciones y niveles de agua subterránea que se acercan a la superficie del suelo, parcialmente debido a cambios en el clima, pero principalmente a factores indirectos inducidos por el hombre. Estas incluyen el sobrepastoreo por un aumento de la población de ganado y el aumento de las aguas subterráneas (Taboada et al. 2017). Estos últimos se derivan parcialmente de cambios extensos (millones de ha) en el uso y cobertura del suelo en las zonas aledañas más altas, donde se han reemplazado por cultivos anuales como la soja, con menores tasas de evapotranspiración (Nosetto et al. 2012)

A nivel de la región pampeana, Moscatelli y Cruzate (2000) confeccionaron una serie de mapas que agrupa a los suelos con problemas de alcalinidad y/o pH elevado. Uno de esos mapas se presenta en la Figura 10, que muestra la distribución geográfica de estos suelos en las provincias pampeanas, en función de la profundidad adonde aparece el horizonte con problemas de alcalinidad. En las Provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos, La Pampa y San Luis que abarca una superficie de aproximadamente 90.851.300 hectáreas hay aproximadamente 11,6 millones de hectáreas afectadas por algún grado de alcalinidad.

Amenazas incipientes

Además de las amenazas vigentes descritas, existen otras amenazas que se podrían calificar como incipientes y que generan preocupación futura. Algunas de ellas son de enorme preocupación en otros continentes, como es el caso de la contaminación de los suelos (FAO y UNEP 2021). Otras en cambio son generadas por el cambio climático, tal como es el caso de las inundaciones y los deslizamientos de tierras, en ambos casos generados por los eventos extremos, en este caso fuertes tormentas, con una responsabilidad mayor de los cambios de uso de los suelos (Nosetto et al. 2012; Brea et al. 2013; Barros et al. 2015).

Inundaciones y deslizamientos de tierras

No puede afirmarse que estas amenazas sean desconocidas. Se tiene plena conciencia de ellas, principalmente por la ocurrencia de eventos de tormentas concentradas e inundaciones, en general asociadas con el fenómeno ENSO, donde los denominados años “Niño” se caracterizan por lluvias por encima de la media, a menudo concentradas en algunos sitios, y asociadas por una condición de las tierras y los suelos que las vuelve especialmente vulnerables a sufrir daños.

Prácticamente todos los ríos de Argentina desembocan en el Océano Atlántico debido a la ubicación de los Yes al oeste, que actúan como frontera natural con Chile, y por otras unidades geotectónicas que se extienden de norte a sur, como el Pampeano y las Cordilleras de la Precordillera. Sin embargo, grandes áreas del país se comportan como sistemas endorreicos/arreicos (Figura 11). Casi dos tercios de

Argentina se componen de ambientes semiáridos a áridos, y muchos de sus sistemas fluviales están conectados con ambientes montañosos, como el de la Cordillera Pampeana y la Cordillera Principal y Frontal, así como las Cordilleras Subandina y Cordillera Oriental, que recibe lluvias fuertes y concentradas durante el verano. Generalmente, las inundaciones repentinas en estos ríos causan daños a los centros urbanos y infraestructura de transporte (carreteras, ferrocarriles, puentes) y, en algunos casos, pérdidas humanas (Latrubesse y Brea 2009).

En la mañana del 9 de febrero de 2009, un flujo de agua sobrecargado por detritos, lodo, y troncos provenientes de la sierra por el río Tartagal, fue generado por una lluvia torrencial de 95 mm en cerca de 45 minutos. La inundación duró apenas dos horas, pero 10.000 personas resultaron afectadas, 1100 de las cuales fueron evacuadas, 3 murieron, 8 desaparecieron y un puente, casas y vehículos fueron destruidos (Figura 12).

UN 35% de la tierra en la región pampeana y el Chaco (aproximadamente 950.000 km²) está dominado por grandes llanuras con récord histórico de recurrentes inundaciones y sequías periódicas. El relieve plano, casi chato, es característico de estas áreas en donde los factores locales más que los regionales son más importantes para determinar el drenaje (Usunoff et al. 1999; Latrubesse y Brea 2009).

En años Niño (2001, 2011) y recientemente, coincidiendo con anomalías climáticas de lluvias concentradas en pocos días, millones de hectáreas se inundaron en la región pampeana central. En la Figura 13 puede observarse la elevada proporción de unidades cartográficas con suelos con rasgos de hidromorfismo, o sea potencialmente anegables en la Pampa Húmeda, la Mesopotamia y el Chaco. Si se compara con la figura de cambio de la tierra se verá que una gran parte de esas tierras potencialmente anegables fueron agriculturizadas en años recientes. Este hecho sugiere que ambos hechos -inundaciones y cambios de uso de la tierra- está íntimamente ligados y debieran ser considerados en conjunto para planificar el uso de la tierra (Paruelo et al. 2005; Viglizzo et al. 2010; Nosetto et al. 2012).

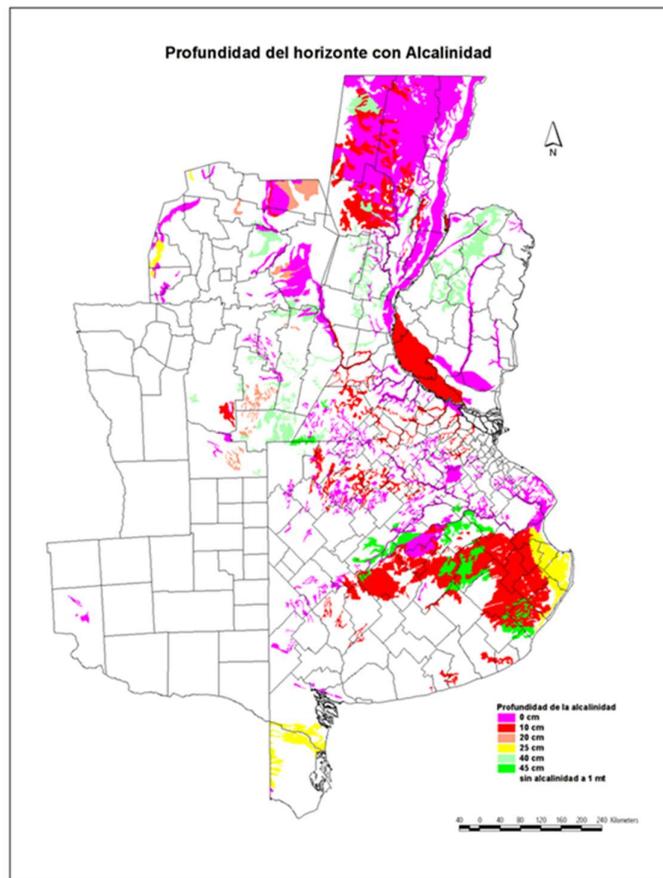


Figura 13. Distribución geográfica de suelos alcalinos en la región pampeana, en función del horizonte adonde aparece la alcalinidad (Moscatelli y Cruzate, 2000).

La recurrencia de estas inundaciones dependerá de las proyecciones climáticas, dominadas por el fenómeno ENSO, por un lado, y de las proyecciones de uso de la tierra, donde la deforestación y la pérdida de pasturas contribuyen a generar desbalances hidrológicos entre la recarga y descarga de los acuíferos (Viglizzo et al. 2010; Nosetto et al. 2012).

Acidificación de suelos

La Argentina posee suelos naturalmente ácidos (pH inferior a 6) en gran parte de la Mesopotamia y en algunos sitios del sur patagónico con muy altas lluvias. En ambos casos, el material parental de los suelos (roca basáltica en un caso y sedimentos volcánicos en el otro) son factores que han incidido fuertemente en el proceso de formación de los suelos, junto con el clima (Panigatti et al. 2010). La acidificación antrópica no ha sido hasta el presente un proceso de degradación relevante de los suelos agropecuarios de nuestro país, naturalmente con reacción neutra en superficie. Ello es así porque no hubo históricamente factores predisponentes de acidificación antrópica, como es el caso de otros países en los cuales se utilizan altas dosis de fertilizantes nitrogenados, o antiguamente eran afectados por lluvias ácidas asociadas por la contaminación industrial (FAO y ITPS 2015).

Este panorama comenzó a cambiar en los últimos años. Dos causas han sido identificadas como causantes de acidificación de los suelos: a) la forestación con eucalipto de suelos de pastizal pampeanos, asociados a una alteración del ciclo del carbono y el enriquecimiento de acidez de cambio en superficie (Jobbágy y Jackson, 2003). Vázquez et al. (2013) y más recientemente Sainz Rozas et al. (2019) alertaron sobre una creciente acidificación de suelos, en este caso asociado con pérdidas de bases de cambio (calcio, magnesio, potasio) debido a la mayor exportación por cosechas de los últimos años, que han sido repuestos ni con fertilizantes ni con encalado.

Puede ser proyectado que en la medida que estos factores de acidificación no se controlen, o reviertan con, por ejemplo, reposición de bases de cambio y encalado, la acidificación puede ser un problema importante para atender en un futuro próximo.

Contaminación de suelos

La contaminación o polución de los suelos tiene distintos orígenes a los que hay que prestar atención (Figura 14). Como surge del esquema de la Figura 5, la contaminación de los suelos es el resultado del mal uso de insumos agropecuarios.

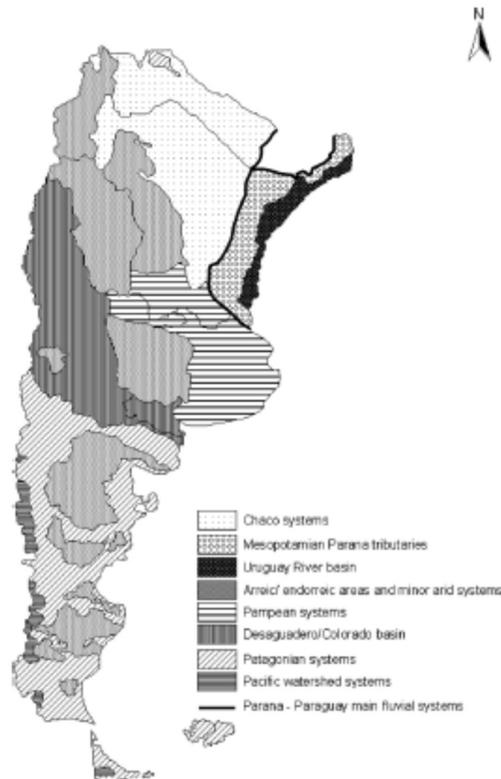


Figura 14. Principales regiones hidrológicas de la Argentina. Fuente: Latrubesse y Brea (2009).

A diferencia de lo que sucede en otros países y regiones, adonde la contaminación de suelos es un problema preocupante para solucionar, sea por uso excesivo de fertilizantes y abonos, y antibióticos para animales, o en países con mayor densidad poblacional el riesgo de contaminación industrial con metales pesados y químicos orgánicos, o incluso elementos radiactivos (FAO y UNEP, 2021), en la Argentina los problemas de contaminación recién están asomando. Ello no significa en absoluto que no se les deba prestar debida atención, dado que no solo pueden generar riesgos sanitarios a seres humanos, animales y plantas, sino que también su descuido puede originar problemas para el acceso a mercados que exigen la trazabilidad de la cadena de producción de alimentos.

El sobreuso de fertilizantes sintéticos, en especial los nitrogenados, han sido vinculados a pérdidas por lixiviación hacia los acuíferos y a problemas de eutrofización de cursos de agua (Figura 15).



Figura 15. Puente destruido por una tormenta y deslizamiento en Tartagal, Salta. Fuente: Latrubesse y Brea (2009).

En una reciente revisión de Wang et al. (2019), se alerta que el excesivo uso de fertilizantes nitrogenados, la lixiviación de nitratos y el escurrimiento superficial amenazan seriamente la salud humana y contaminan los medios biológicos. Se recomienda realizar un mejor manejo de cultivos para sincronizar la disponibilidad de N en los suelos, con la demanda por los cultivos, generando menor descarga en cursos de agua. El exceso de fósforo es otro estresor importante que contribuye junto con el nitrógeno al aporte de clorofila en fitoplancton y la eutrofización de cursos de agua (Liang et al. 2020). Por diversas razones, en la Argentina el uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados y fosforados recién está aumentando en las últimas décadas en la Argentina, por lo que no tenemos la historia de contaminación de acuíferos subterráneos y superficiales que tienen otros países, como en Europa, Asia y Estados Unidos (FAO y UNEP 2021). Estos problemas son por ahora observados mayormente en algunas áreas urbanas y suburbanas.

En cambio, en la Argentina ha asomado como un problema grave, con consecuencias de sensibilidad pública, el exceso uso de agroquímicos. Si se observa, la Figura 16 nuestro país aparece ranqueado como los que usan mayor cantidad de pesticidas por hectárea. La cantidad de plaguicidas usados aumentó de 39 a 335 mil kg o litros por año entre 1990-91 y 2011-12, o expresado por hectárea entre 1,95 a 9 kg o litros / ha. Este aumento se debió principalmente al elevado uso del herbicida glifosato asociado con la práctica de la siembra directa (barbecho químico y ausencia de control mecánico) y la utilización de cultivares RR de soja y maíz. Además, la aparición de malezas resistentes ha motivado aumentos en las dosis de glifosato y la utilización de mezclas de productos (Andrade et al. 2017).

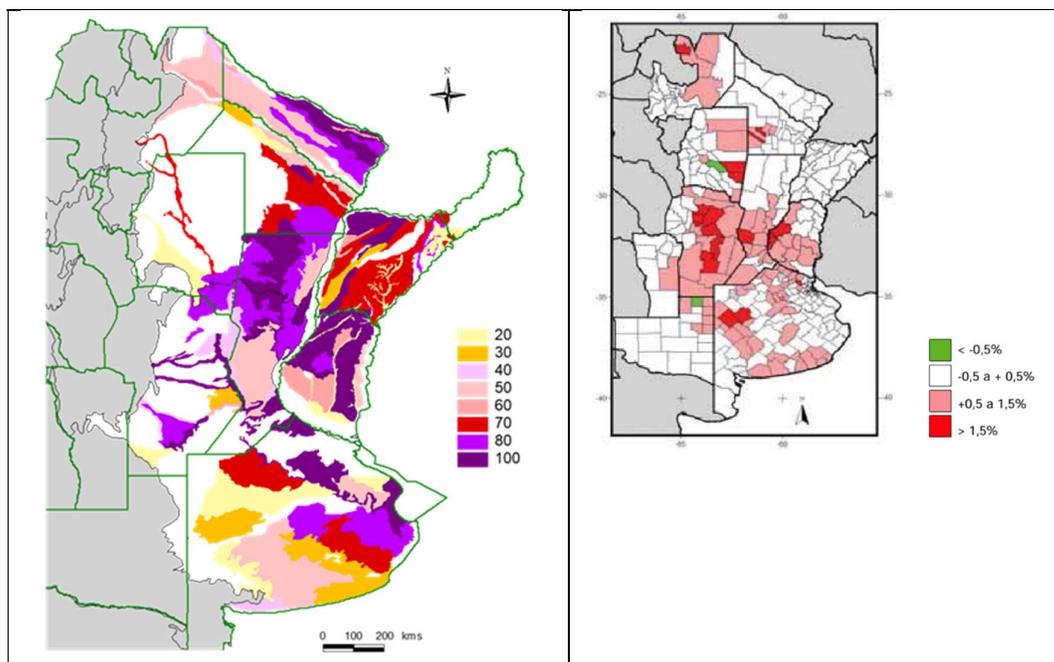


Figura 16. Mapa de unidades cartográficas compuestas en diferentes porcentajes por suelos con rasgos hidromórficos (Godagnone y De la Fuente, INTA Instituto de Suelos) (izq.); Cambio anual del porcentaje de las superficies dedicadas a cultivos por partido o departamento, 1988-2002 (Paruelo et al. 2005). (der.)

No obstante, debe también reconocerse una menor peligrosidad de los productos usados actualmente, en su mayor parte (65%) de banda verde, o sea que no representan peligro. En el caso del glifosato, el estudio de FAO y ITPS (2017) el Panel Intergubernamental Técnico de Suelos de la Alianza Mundial por el Suelo de FAO (FAO e ITPS, 2017) revela que no se ha demostrado que el glifosato y el derivado de su descomposición (AMPA) tengan efectos negativos consistentes sobre los organismos del suelo en las pruebas toxicológicas revisadas. El tema es altamente sensible y controvertido y está falto de información confiable que informe a la población acerca de los impactos del uso de estos herbicidas en la salud humana. También importa por la aparición de barreras comerciales por países que exigen trazabilidad (Andrade et al. 2017).

En lo que respecta a otras fuentes de contaminación, como metales pesados (plomo, cadmio, cromo, mercurio, vanadio, etc.), residuos orgánicos de la industria petrolera y petroquímica, y residuos patógenos. Una rápida búsqueda bibliográfica muestra que este tipo de problemas, desde ya graves, se describen para por ejemplo la cuenca

Matanza - Riachuelo, en la cual la contaminación es de tipo industrial ilegal (Paladino et al. 2018; Cittadino et al. 2020; Ceballos et al. 2021), o en climas y condiciones socio-económicas como las del norte del país donde la transmisión de patógenos es más propensa a ocurrir (Periago et al. 2018). En estos sitios periurbanos existe el riesgo de pasaje a la cadena alimentaria de estos elementos potencialmente tóxicos por el uso hortícolas de los suelos. También se han observado niveles preocupantes de restos de pesticidas, derivadas de la producción de papa en el área de Balcarce, sudeste de la Provincia de Buenos Aires (Gaona et al. 2019).

Sellado de suelos por urbanización

El sellado de suelos se refiere a la pérdida de suelos de aptitud agrícola por el avance de cambios que impermeabilizan los suelos, sean por construcción de infraestructura, como por urbanización. Esta última causa es muy frecuente en países superpoblados, donde se producen cambios de uso motivados por el avance urbano (Scalenghe y Marsan 2009) o por crecidas del nivel del mar por el cambio climático.

Excepto el caso de algunas áreas periurbanas, amenazadas por la construcción de barrios cerrados y *countries*, por un lado, y los así llamados barrios populares, por el otro, el fenómeno de sellado de suelos no parece aun ser una amenaza para el sector agropecuario. Una excepción es la pérdida de suelos -en general no agrícolas- por la prospección petrolera y la construcción de oleo- y gasoductos.

¿CÓMO AFRONTAR LAS AMENAZAS Y PRINCIPALES DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES QUE SE PRESENTAN?

Medidas preventivas y correctivas

Para afrontar las amenazas sobre los suelos, existen medidas preventivas que tienden a evitar o minimizar la ocurrencia de la amenaza, y medidas correctivas y restaurativas que actúan cuyo el problema ya sucedió. En el Cuadro 2 se enumeran sintéticamente las principales a tomar medidas e un listado.

Cuadro 2. Medidas preventivas y correctivas para cada una de las amenazas

Amenaza	Prevención	Corrección y/o recuperación
Erosión hídrica	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura total del suelo con residuos • Labores contra la pendiente • Minimización de períodos de barbecho • Rotaciones con gramíneas • Aumento de la estabilidad de 	<ul style="list-style-type: none"> • Terrazas • Cultivo en contorno • Re movilización de material sedimentado • Estabilización de vías de desagüe.

	<p>agregados superficiales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cultivo en contorno 	
Erosión eólica	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivos en franjas • Cobertura total del suelo con residuos 	<ul style="list-style-type: none"> • Re movilización de material sedimentado • Regeneración del suelo superficial
Disminución de la materia orgánica	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar balances negativos de materia orgánica mediante mayor aporte de residuos • Fertilización balanceada 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar los balances de materia orgánica mediante mayor aporte de residuos • Fertilización balanceada
Desbalance de nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> • Fertilización balanceada 	<ul style="list-style-type: none"> • Reposición de nutrientes por fertilizantes y abonos
Compactación	<ul style="list-style-type: none"> • Tránsito agrícola controlado • Rotaciones con cultivos de invierno y coberturas. • Manejo del pastoreo 	<ul style="list-style-type: none"> • Pasaje de descompactadores y cultivar con cultivos de raíces densas (gramíneas invernales) • Cultivos de raíces de prrofundas
Salinización y sodificación	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura total del suelo • En campos bajos usar rotaciones diseñadas en función del consumo de agua • No disturbar el horizonte A con herramientas mecánicas • Cuyo se riega, no usar laminas excesivas de riego con agua subterrneas • Evitar regar con aguas con elevados contenidos de bicarbonato de sodio • Manejo agrohidrologico del agua superficial 	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivos de raíces profundas • Manejo agrohidrológico • Drenes cuyo corresponda • Lavado de sales cuyo corresponda • Enyesado y corrección de suelos sódicos
Inundaciones	<ul style="list-style-type: none"> • En campos bajos usar rotaciones 	

	<p>diseñadas en función del consumo de agua</p> <ul style="list-style-type: none"> • Manejo agrohidrológico • Evitar cambios de uso de la tierra en tierras de cotas más altas para minimizar la entrada de agua de vecinos, 	
Deslizamiento de tierras	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar cambios de uso de la tierra y descubierta del suelo en campos con pendiente • Estabilizar taludes con gaviones 	<ul style="list-style-type: none"> • Construir represas para almacenar agua durante crecidas • Reconstruir canales y taludes
Acidificación	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar la extracción excesiva de bases de cambio • Evitar el uso de altas dosis de fertilizantes nitrogenados 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrección con encalado
Contaminación	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar el uso de elementos potencialmente tóxicos (metales pesados, químicos orgánicos y patógenos) en el agro • Usar control biológico de plagas • Minimizar el uso de herbicidas. • Usar solo pesticidas de biología azul • Evitar las rotaciones simples que favorecen las malezas resistentes • Usar fuentes no contaminadas de fertilizantes y de abonos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de especies de raíces profundas que extraigan nitratos de la napa • Fitoremediación y bioremediación, en caso que corresponda
Sellado	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar el uso no agrícola de suelos agrícolas • Regular las áreas de uso urbano 	<ul style="list-style-type: none"> • Recuperar áreas afectas por prospección minera y petrolera.

En general, las prácticas de tipo correctivo y restaurativo recurren a prácticas de tipo ingenieril, como diseño de terrazas y represas de agua, con un costo que puede llegar a ser elevado, como por ejemplo si se llega a asumir el costo de transportar suelos sedimentados a las partes de pérdida de suelo.

En cambio, las medidas de tipo preventivo recurren en su mayor parte a las buenas prácticas agronómicas (BPA) , basadas en el manejo adecuado de los residuos y rotaciones agrícolas y ganaderas. No es aconsejable hablar de panaceas en agronomía, pero es posible que la cobertura del suelo y el manejo de suelos bajo cubierta sea de las pocas o la única a aconsejar. Esta medida se relaciona estrechamente con el logro de balances positivos de carbono orgánico y actúa como un “paraguas” que opera evitando daños (Figura 17).



Figura 17. Fuentes de contaminación en los suelos. Adaptado de Rodríguez Eugenio et al. (2018).

Oportunidades que se presentan

El aumento de la temperatura media del planeta, la mayor frecuencia de eventos extremos y las consecuencias graves que está generando sobre los eco- y agrosistemas terrestres y acuáticos ha generado en los últimos años gran preocupación. Las últimas emisiones de dióxido de carbono continúan rastreando el extremo superior de los escenarios de emisión, lo que hace que sea aún menos

probable que el calentamiento global se mantenga por debajo de los 2 °C. Un cambio a una trayectoria de 2 °C requiere una mitigación global inmediata significativa y sostenida, con una probable dependencia de las emisiones negativas netas a largo plazo (Peters et al. 2013).

De acuerdo con el Informe Especial de Calentamiento Global a 1,5 °C (IPCC 2018), los riesgos relacionados con el clima para los sistemas naturales y humanos son mayores para el calentamiento global de 1,5 °C que en la actualidad, pero inferior a 2 °C. Estos riesgos dependen de la magnitud y el ritmo del calentamiento, ubicación geográfica, niveles de desarrollo y vulnerabilidad, y sobre las opciones y implementación de opciones de adaptación y mitigación. Se prevé que la limitación del calentamiento global a 1,5 °C, o al menos a 2 °C reducirá los riesgos relacionados con el clima para la salud, los medios de subsistencia, la seguridad alimentaria, el suministro de agua, la seguridad humana y el crecimiento económico.

Una parte principal de los esfuerzos de mitigación deberá centrarse en el recambio de fuentes de energía, con el reemplazo de combustibles fósiles por energías más limpias o renovables. Pero el objetivo de la neutralidad de carbono para el año 2050 acordado en la COP 21 de París sólo será posible si se adoptan medidas o soluciones adicionales basadas en la naturaleza (NBS o NCS, *nature based solutions*, o *nature climate solutions*, por sus siglas en inglés), ya que los ecosistemas terrestres y los suelos son los únicos capaces de compensar emisiones mediante el almacenamiento de carbono. Esto se observa en la Figura 18, donde se aprecia que si bien la mayor parte de los esfuerzos deben partir de la mitigación de reemplazo de combustibles fósiles, para arribar a la neutralidad de carbono será necesario recurrir a las NBS. Un ejemplo de ello se observa en la Figura 18. La mayor parte de ellos esfuerzos se deberán al reemplazo de combustibles fósiles, pero sólo recurriendo a las NBS será posible no exceder aumentos de temperatura mayores de 2°C (Griscom et al 2017).

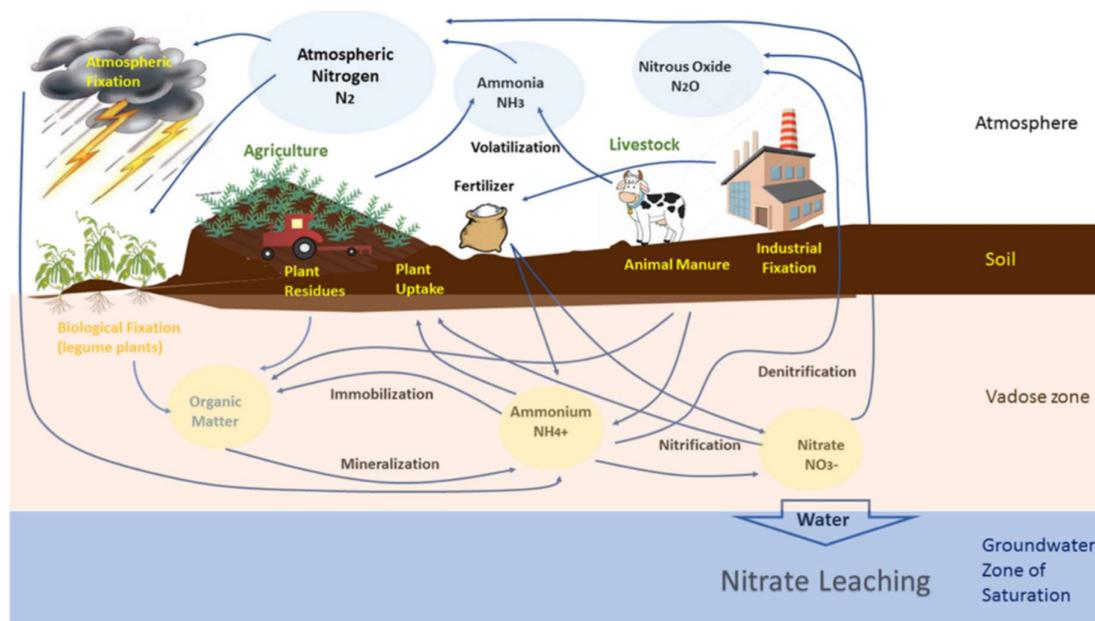


Figura 18. El ciclo de nitrógeno y el proceso de lixiviación de nitratos. Fuente: Padilla et al. 2018.

El Informe Especial de Cambio Climático y Tierra de IPCC (Shukla et al. 2019) analizó la viabilidad de diversas opciones basadas en el manejo de tierras, el manejo de la cadena de valor y el manejo del riesgo, en relación con su potencial de mitigación, de adaptación, de prevención de la degradación de tierras y la desertificación, la seguridad alimentaria (Figuras 19 y 20).

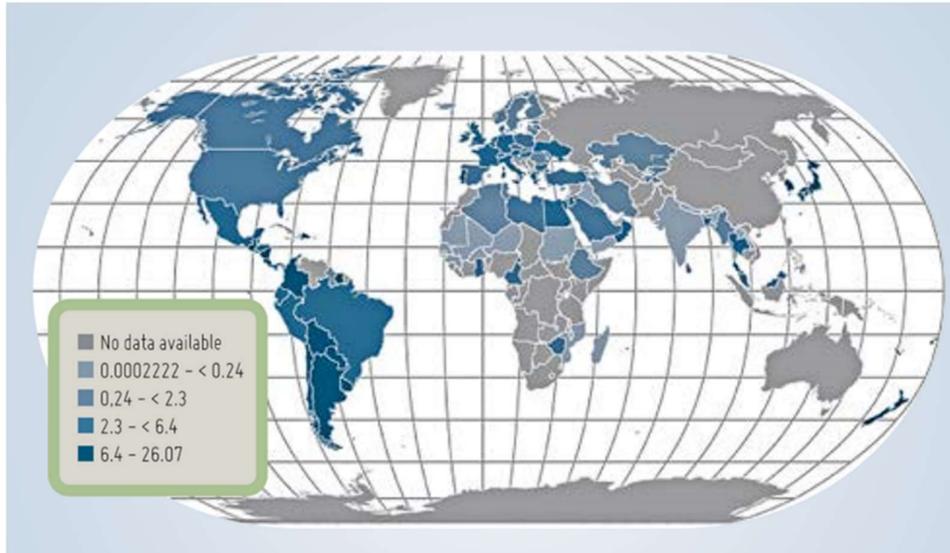


Figura 19. Uso de pesticidas por hectárea de suelo arable. Fuente: FAO 2015.



Figura 20. Protección de los suelos por la cobertura de la tierra y las variables que afecta.

Las NBS están basadas en el manejo de la agricultura, de los bosques, específico de los suelos de los ecosistemas y específicamente dedicadas a reducir las emisiones de dióxido de carbono (Fig. 19). Bajo cada uno de estos caminos existen muchas opciones, que en su mayor parte se encuadran en las buenas prácticas agronómicas. Las opciones basadas en la cadena de valor se basan en cambios en la demanda y la oferta de insumos y de alimentos, que apuntan a la reducción de pérdidas y

desperdicios (aguas arriba de la producción) y a un menor manejo de las cadenas de comercialización y usos de energía. Las opciones basadas en el manejo del riesgo se basan en una mayor diversificación y medios de aseguramiento (Fig. 20).

Se destaca aquí la necesidad de lograr cambios de conducta en la población, no solo en la selección de medios de compra sino también a nivel de las dietas. Se alienta la necesidad de ir a dietas más equilibradas, con mayor uso de vegetales y legumbres y menos consumo de carnes rojas, debido a la elevada emisión de metano entérico y consumo de agua que implican la producción ganadera vacuna (FAO 2019a). Respecto a esto último, resulta al menos contradictorio que sólo se considere este aspecto negativo de la producción ganadera, y se obvие el gran potencial de mitigación por secuestro de carbono en suelos que posee la ganadería basada en pastoreo (Dermer et al. 2019; FAO 2019b, Viglizzo et al. 2019).

En el caso de las NBS se analizó en IPCC el potencial de cada una de ellas para mitigar cambio climático, adaptarse a él, prevenir desertificación y degradación de tierras, y contribuir a la seguridad alimentaria (Smith et al. 2019a; b; McElwe et al. 2020). La adopción de respuestas basadas en el manejo de las tierras (suelos, aguas y vegetación), como el incremento de la productividad de la producción alimentaria, la agroforestería, el manejo mejorado de tierras y de la ganadería, la diversificación agrícola, la mejora de las tierras de pastoreo, el manejo integrado de aguas y el aumento del carbono orgánico del suelo poseen un potencial de moderado (0,3 q 3 Gt CO₂eq por año) y alto (más de 3 Gt CO₂eq por año) a nivel global) para mitigar el cambio climático. Lo más interesante es que no surgen del análisis interacciones negativas con la adaptación al cambio climático, la prevención de la desertificación y la degradación de las tierras, y la seguridad alimentaria. De todas estas opciones, el aumento de la productividad agropecuaria y de los contenidos de carbono orgánico del suelo tampoco ofrecen barreras en cuanto a su costo.

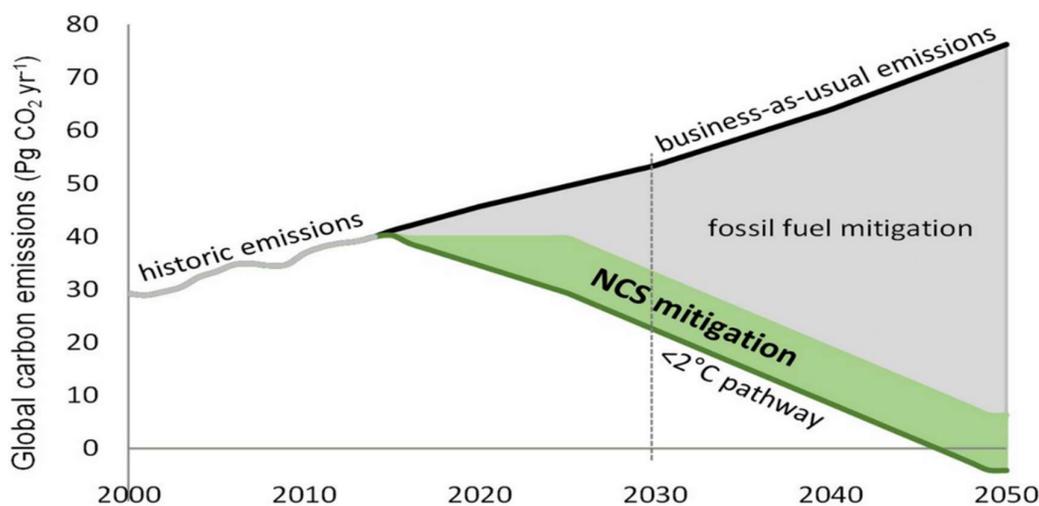


Figura 21. Evolución histórica de las emisiones de gases efecto invernadero, y los posibles caminos de mitigación siguiendo una situación como actual (business as usual) y una adonde se integran las soluciones basadas en la naturaleza (NCS mitigation). Fuente: Griscom et al. 2017. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114(44), 11645-11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>

En este contexto de proponer NBS, en 2020 FAO lanzó el programa RECSOIL (*Recarbonization of Global Soils*), que consiste en un programa de adopción de muchas de las soluciones descritas en la Figuras 19 y 21, pero con un foco en los pequeños productores. RECSOIL está diseñado para abordar los desafíos clave que enfrenta la humanidad hoy en día dentro de un marco propicio integrado por una serie de instituciones y compromisos relacionados con el cambio climático y la sostenibilidad. El principal objetivo del programa es apoyar y mejorar las iniciativas nacionales y regionales de mitigación de GEI y secuestro de carbono (FAO 2019c).

Un insumo básico para lanzar el programa RECSOIL es conocer previamente cual es el potencial de secuestro de carbono de los suelos a nivel global. La FAO lanzó el proyecto del mapa global de potencial de secuestro de carbono. Estos mapas permiten la estimación del potencial de secuestro de carbono orgánico del suelo (0-30 cm) en áreas agrícolas bajo cuatro escenarios de manejo del suelo: un escenario Business as Usual (BAU) y tres escenarios de Manejo Sostenible del Suelo (SSM1, SSM2 y SSM3) adaptadas a cada región (FAO 2022). Desbloquear este potencial depende del establecimiento de mecanismos sólidos para monitorear, informar y verificar (MRV) los cambios en las existencias de carbono orgánico del suelo (SOC) y de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) (FAO 2020). Este MRV Protocol fue desarrollado por un equipo de más de 100 investigadores, con la conducción de quien esto escribe.



Figura 22. Opciones de respuesta basadas el manejo de tierras, desglosado en agricultura, bosques, suelos, ecosistemas y reducción de dióxido de carbono (RDC). (adaptado de Smith et al. 2019).

A partir de la capacidad que posee nuestro país en cartografía de suelos y el MRV de sistemas agropecuarios, la Argentina junto con México han sido casos líderes del mapa de potencial de secuestro de carbono por los suelos (Reynoso et al. 2021). En el caso de la Argentina Peralta y Di Paolo (comunicación personal) han desarrollado

un mapa de potencial de secuestro de carbono para suelos con manejo agrícola y ganadero usando modelización Roth-C (Figura 23). En todos los casos el potencial de secuestro de carbono mostró muy alta variabilidad. El uso de prácticas mejoradoras con respecto al manejo usual. En agricultura, se destaca la adopción de cultivos de cobertura con un potencial de secuestro de carbono de alrededor de 40%. En ganadería, los potenciales de secuestro modelizados fueron elevados, en un rango entre 25% y 60%, con un impacto mayor causado por la implantación de especies mejoradoras. Es interesante destacar el enorme potencial que posee la ganadería en pastoreo, algo ya señalado por Viglizzo et al. (2019), donde nuestro país puede ofrecer hasta unas 160 millones de hectáreas con climas de húmedo árido, y de subtropical a templado frío, en los cuales simplemente con algún tipo de manejo del pastoreo es posible lograr aumentos significativos de carbono orgánico.

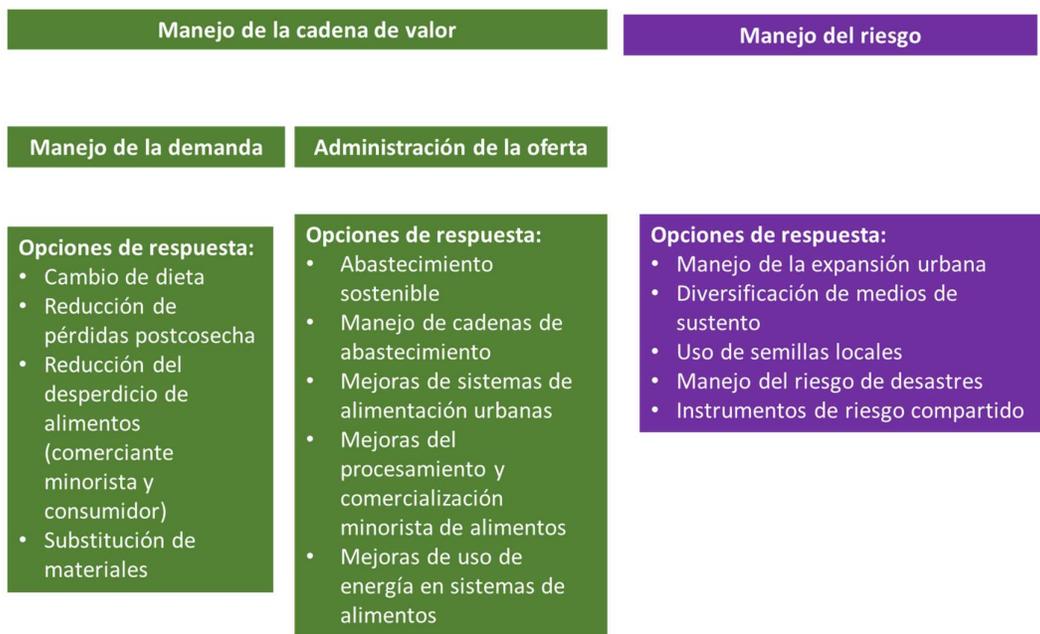


Figura 23. Opciones de respuesta basadas en el manejo de la cadena de valor (oferta y demanda de alimentos), y manejo del riesgo (adaptado de Smith et al. 2019)

El potencial de la agricultura se puede apreciar en un trabajo hecho por la consultora Carbon Group Agroclimatic Solutions SRL, en un establecimiento del sudeste bonaerense (Figura 24). La situación de manejo actual emite en total 1.320 ton CO₂eq/ha/año, con una alta participación de los fertilizantes nitrogenados minerales (urea). Los suelos del establecimiento poseen emisiones positivas, mostrando pérdida de materia orgánica con un sistema de rotación basado en trigo, cebada, maíz y soja de primera. El manejo mejorado propuesto se basa en el uso de fuentes alternativas de nitrógeno (ureas recubiertas) para bajar las emisiones de óxido nitroso, y la inclusión de *Vicia villosa* como cultivo de cobertura invernal. Las emisiones de este manejo son 970 kg CO₂eq/ha año con fertilizantes mejorados, y 370 kg CO₂eq/ha año con el uso de fertilizantes y cultivos de cobertura. Los suelos pasaron de ser fuente de emisiones de GEI a capturar carbono y ganar materia orgánica.

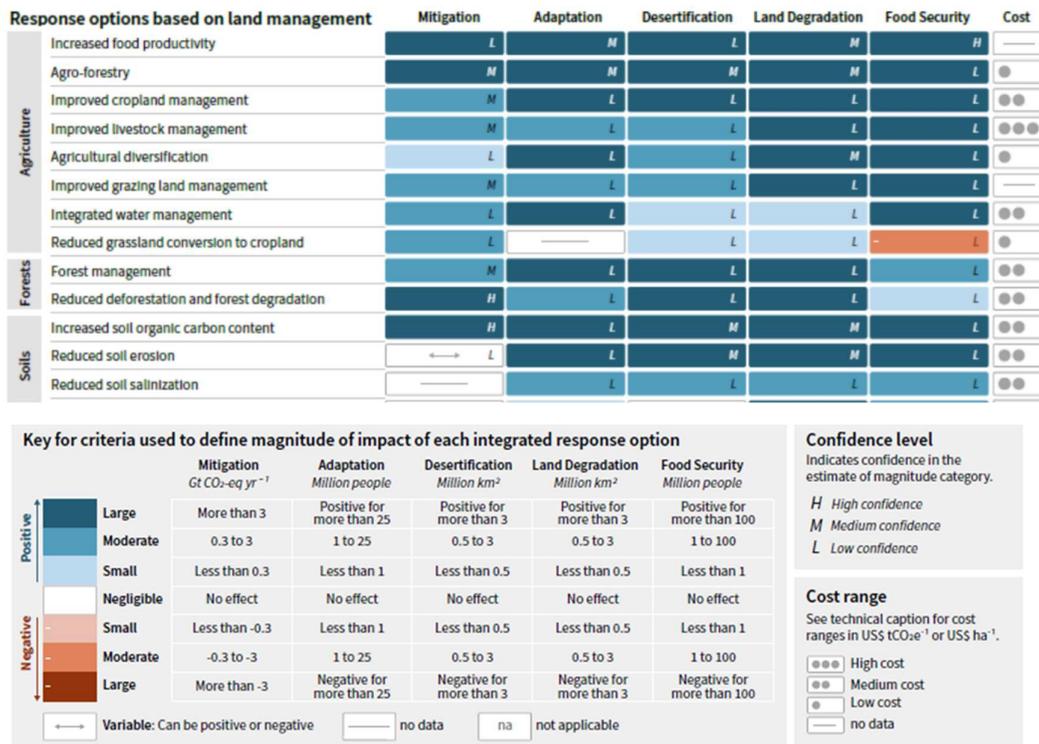


Figura 24. Opciones de respuesta basadas en el manejo de tierras, y su impacto sobre la mitigación y adaptación al cambio climático, la prevención de la desertificación y la degradación de las tierras y la seguridad alimentaria. Nivel de confiabilidad y rango de costos de cada opción de respuesta. Fuente: Smith et al. (2019a; b).

MRV General Protocol

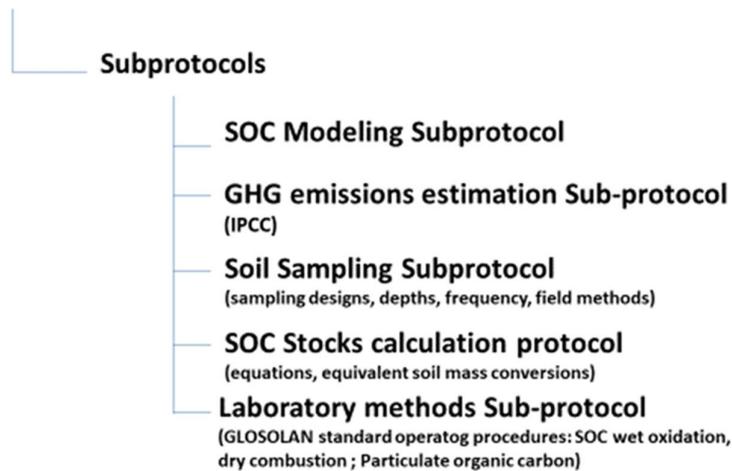


Figura 25. Subprotocolos que componen el protocolo de monitoreo, reporte y verificación de los cambios de carbono y emisiones de gases efecto invernadero en suelos manejados con producción agropecuaria. Fuente: FAO 2020.

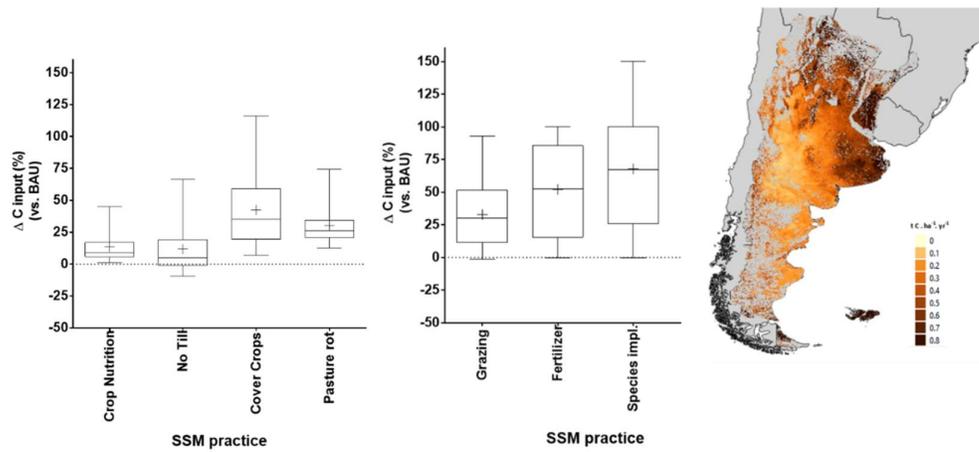


Figura 26. Mapa de potencial de secuestro de carbono en suelos de la Argentina usyo modelización Roth-C. Manejo agrícola (izquierda), se propone como manejo sustentable de suelos a la nutrición de cultivos, la labranza cero, el uso de cultivos de cobertura y la rotación con pasturas. Manejo ganadero (derecha), se propone como manejo sustentable de suelos al manejo del pastoreo, la fertilización y la implantación de especies mejoradoras. El potencial de secuestro de carbono se compara con el manejo usual de los suelos (BAU, o *business as usual* en inglés). Fuente: Peralta y Di Paolo (no publicado).

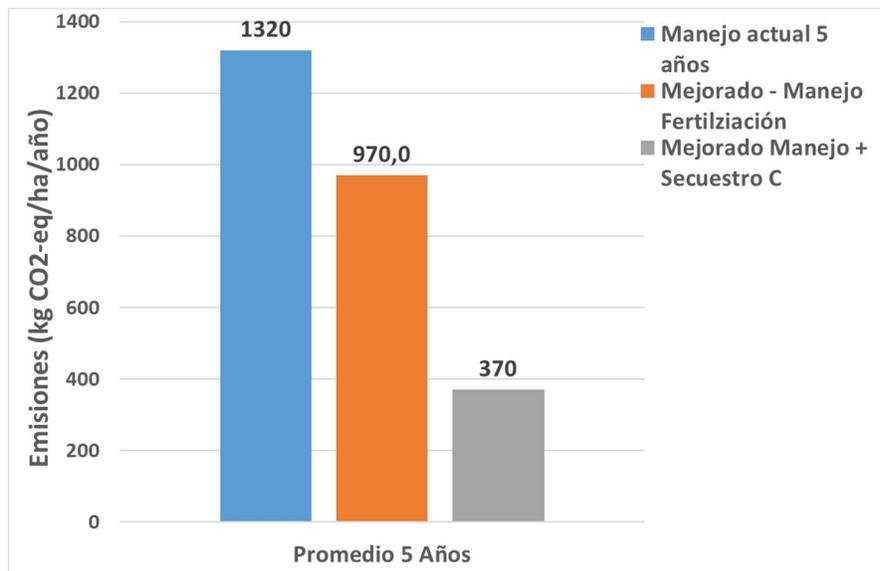
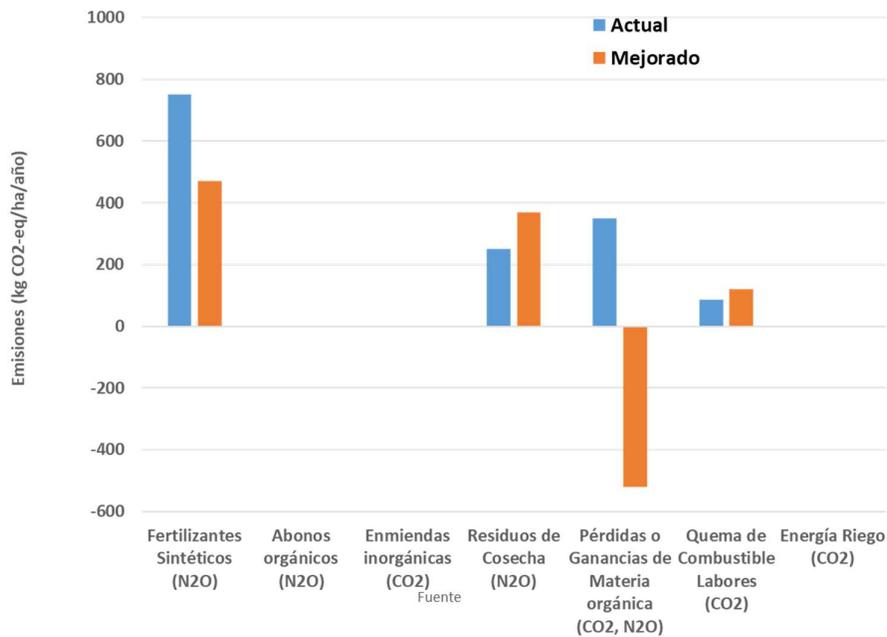


Figura 27. Emisiones de gases efecto invernadero (GEI) expresadas en unidades de dióxido de carbono equivalente, en un establecimiento del sudeste bonaerense con manejo actual (BAU) y manejo mejorado. Este manejo consiste en el uso de fuentes mejoradas de nitrógeno y *Vicia villosa* como cultivo de cobertura invernal. Arriba: emisiones discriminadas por origen; abajo: emisiones totales. Fuente: Carbon Group Agroclimatic Solutions SRL.

CONCLUSIONES

1. Los suelos de la Argentina han experimentado importantes cambios de uso y crecientes presiones de uso en las últimas décadas, tanto en la agricultura, como en la producción Ganadera. Estos cambios podrían sintetizarse en la duplicación del área sembrada, la expansión de la frontera agropecuaria hacia áreas marginales, y la movilización de la ganadería en pastoreo hacia áreas marginales para la agricultura.
2. No obstante, al mismo tiempo en los últimos 15 años ha habido un avance de la agricultura basada en el conocimiento con uso de nuevas tecnologías. Esto permitió aumentar aún más el área dedicada a cultivos, sin expandir la frontera agropecuaria.
3. Existen amenazas vigentes desde hace tiempo para los suelos de la Argentina. La erosión por el agua y el viento continúa siendo un problema que afecta más de la tercera parte de nuestro territorio. No obstante, el uso de siembra directa permitió que esta erosión no se manifestase en sus formas más graves.
4. La pérdida de materia orgánica es un problema difundido. Los suelos de uso agrícola han perdido entre 30 a 60% de sus niveles originales de carbono orgánico. Los menores niveles de carbono y el tránsito agrícola generan compactación de los suelos y estructuras poco favorables.
5. Contra muchas voces ajenas al sector que sostienen lo contrario, se extraen más nutrientes de los que se reponen por fertilización. Esta situación afecta hace años al nitrógeno, fósforo y azufre, pero ya empieza a afectar seriamente al potasio y micronutrientes como cinc. Aparece la acidificación.
6. La contaminación con plaguicidas es la principal amenaza incipiente sobre nuestros suelos. Su no solución puede por un lado favorecer el avance del problema, y finalmente, afectar nuestras agroexportaciones.
7. En todos los casos las soluciones técnicas son ya conocidas. Los problemas son a nivel de la toma de decisiones o a nivel político. Sin embargo, hay provincias que han tomado cartas en el asunto y ya trabajan muy bien para conservar sus suelos.
8. El cambio climático plantea una obvia amenaza, fundamentalmente por la sinergia que se da entre los eventos extremos, el uso inadecuado de los suelos y el avance de procesos como la erosión y el deslizamiento de tierras.
9. Sin embargo, el cambio climático plantea a su vez una oportunidad, a partir de la necesidad de incorporar a la naturaleza dentro de las soluciones climáticas.
10. Los suelos de la Argentina necesitan recarbonizarse, no solo los agrícolas, sino también los de uso ganadero. La ganadería en pastoreo cubre gran parte del país, bajo climas diversos. El sector agropecuario es parte de la solución al cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria por la invitación para la conferencia sobre el tema de este artículo con

motivo de mi incorporación como miembro de número, y el apoyo de las instituciones adonde he trabajado o aún me desempeño (Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires [FAUBA], Instituto de Suelos del Centro de Investigaciones de Recursos Naturales (CIRN) del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INTA], el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas [CONICET]), y la empresa Carbon Group Agroclimatic Solutions SRL.

LITERATURA CITADA

Álvarez, C. R., Taboada, M. A., Gutiérrez Boem, F. H., Bono, A., Fernández, P. L., Prystupa, P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Science Society of America Journal* 73: 1242-1250. (Online ISSN: 1435-0661 Print ISSN: 0361-5995).

Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Perelman, S.B., Morrás, H.J. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampas, Argentina. *Soil Research* 52, 533-542.

Andrade, F. H. (compilador) 2017. Los desafíos de la agricultura argentina : satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental / F. H. Andrade ... [et al.] , compilado por F. H. Andrade. - 1a ed . - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ediciones INTA, 2017. 120 p., ISBN 978-987-521-860-4

Bacigaluppo, S., Bodrero, M., Salvagiotti, F., Balzarini, M., Gerster, G.R., Yriani, J.M., Enrico, J.M., Dardanelli, J.L., 2011. Main edaphic y climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *Eur. J. Agron.* 35, 247-254. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.07.001>

Barros, V. R., Boninsegna, J. A., Camilloni, I. A., Chidiak, M., Magrín, G. O., Rusticucci, M. 2015. Climate change in Argentina: trends, projections, impacts y adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(2), 151-169.

Bouma, J., McBratney, A.B. 2013. Framing soils as an actor when dealing with wicked environmental problems. *Geoderma*, 200, 130-139.

Brea, J. D., Spalletti, P., Amores, G. 2013. The 2006 y 2009 lyslide y flood events in the Tartagal River Basin (Argentina). In *Lyslide science y practice* (pp. 341-347). Springer, Berlin, Heidelberg.

Casas, R. R. 1986. Aptitud de uso de los suelos de la República Argentina. INTA, Buenos Aires.

Casas, R. R., Albarracín, G. F. 2015. El deterioro del suelo y del Medio Ambiente en la Argentina. FECIC, Tomos 1 y 2, 608 p. Buenos Aires.

Ceballos, E., Dubny, S., Othax, N., Zabala, M. E., Peluso, F. 2021. Assessment of Human health risk of chromium y nitrate pollution in groundwater y soil of the Matanza-Riachuelo River Basin, Argentina. *Exposure y Health*, 13(3), 323-336. <https://doi.org/10.1007/s12403-021-00386-9>

CEC. 2006. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions—Thematic strategy for soil protection (COM 2006.231), Brussels.

Cittadino, A., Ocello, N., Majul, M. V., Ajhuacho, R., Dietrich, P., Igarzabal, M. A. 2020. Heavy metal pollution y health risk assessment of soils from open dumps in the Metropolitan Area of Buenos Aires, Argentina. *Environmental monitoring y assessment*, 192(5), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8246-x>

Commission of the European Communities (CEC). 2006. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic y Social Committee y the Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection. COM 231 Final, Brussels.

De Marco, M. A. 2010. *La Guerra de la Frontera. Luchas entre indios y blancos*. Emecé Editores. Buenos Aires. ISBN 978-950-04-3277-1, 558 p.

Derner, J.D., Augustine, D.J., Frank, D.A. 2019. Does Grazing Matter for Soil Organic Carbon Sequestration in the Western North American Great Plains?. *Ecosystems* 22, 1088–1094. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0324-3>

Di Matteo, J. A., Ferreyra, J. M., Cerrudo, A. A., Echarte, L., & Andrade, F. H. 2016. Yield potential y yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding. *Field Crops Research*, 197, 107-116.

FAO. 2015. *Carta Mundial de los Suelos*. FAO, Roma. Accesible en: <https://www.fao.org/documents/card/5s/c/I4965S>

FAO. 2019a. *Water use in livestock production systems y supply chains – Guidelines for assessment (Version 1)*.

FAO. 2019b. *Measuring y modelling soil carbon stocks y stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1)*. Livestock Environmental Assessment y Performance (LEAP) Partnership. Rome, FAO. 170 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

FAO 2019c. *Recarbonization of global soils - A tool to support the implementation of the Koronivia Joint Work on Agriculture*. Rome, Italia, 12 p. Accesible en: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca6522en/>

FAO. 2020. *GSOC MRV Protocol*. Rome, FAO, 104 p. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

FAO. 2022. *Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map – SOCseq v.1.1.1. Technical report*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb9002en>

FAO e ITPS. 2015. *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. ISBN 978-92-5-109004-6. Accesible en: <https://www.fao.org/3/i5199e/I5199E.pdf>

FAO e ITPS. 2017. Global soil organic carbon map - GSOCmap. Version 1.0. Rome: FAO. <http://www.fao.org/global-soil-partnership/pillars-action/4-information-and-data/global-soil-organic-carbon-gsoc-map/en/>.

FAO y UNEP. 2021. Global Assessment of Soil Pollution: Report. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>.

Gaitán, J., Navarro, M. F., Tenti, L., Pizarro, M., Carfagno, P. L., Rigo, S. 2017. estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. INTA Ediciones.

Gaona, L., Bedmar, F., Gianelli, V. et al. Estimating the risk of groundwater contamination y environmental impact of pesticides in an agricultural basin in Argentina. 2019. Int. J. Environ. Sci. Technol. 16, 6657–6670.

<https://doi.org/10.1007/s13762-019-02267-w>

García F. O. 2006. La nutrición de los cultivos y la nutrición de los suelos. Proyecto Fundación Producir Conservando y Fertilizar AC.

Grau, H. R., Gasparri, N. I., Aide, T. M. 2005. Agriculture expansion y deforestation in seasonally dry forests of north-west Argentina. Environmental Conservation, 32(2), 140-148.

Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., ... & Fargione, J. 2017. Natural climate solutions. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114(44), 11645-11650.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>

Hartemink, A. E. 2008. Soils are back on the global agenda. Soil Use y Management, 24(4), 327-330.

Hora, R. 2010. Historia económica de la Argentina en el siglo XIX, colección "Biblioteca Básica de Historia", Siglo XXI Editores, Buenos Aires, 2010 (ISBN 978-987-629-128-6), 272 pp.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels y related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, y efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, y T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK y New York, NY, USA, pp. 3-24. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>

Jain, H. K. 2010. Green Revolution: History, Impact y Future. ISBN1933699639, 9781933699639, 256 páginas

Jobbágy, E.G., Jackson, R.B. 2003. Patterns y mechanisms of soil acidification in the conversion of grasslands to forests. Biogeochemistry 64, 205–229. <https://doi.org/10.1023/A:1024985629259>

Jobbágy, E. G., Giménez, R., Marchesini, V., Diaz, Y., Jayawickreme, D. H., Nosetto, M. D. 2021. Salt Accumulation y Redistribution in the Dry Plains of Southern South America: Lessons from Land Use Changes. P. 31-70. En: E. Taleisnik, R. S. Lavado (Ed.). Saline y Alkaline Soils in Latin America Natural Resources, Management y Productive Alternatives, ISBN 978-3-030-52591-0 ISBN 978-3-030-52592-7 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-030-52592-7>, Springer Nature Switzerland AG 2021.

Latrubesse, E. M., Brea, D. 2009. Floods in Argentina. *Developments in Earth Surface Processes*, 13, 333-349.

Lavado, R. S., Taboada M. A. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agroresource. *Journal of Soil and Water Conservation* 65, 150A-153A. Print ISSN: 0022-4561 Online ISSN: 1941-3300.

Liang, Z., Soranno, P. A., Wagner, T. 2020. The role of phosphorus y nitrogen on chlorophyll a: Evidence from hundreds of lakes. *Water Research*, 185, 116236. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116236>

McBratney, A. B., Field, D. J., & Koch, A. 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213.

McElwee, P., Calvin, K., Campbell, D., Cherubini, F., Grassi, G., Korotkov, V., Le Hoang, A., Lwasa, S., Nkem, J., Nkonya, E., Saigusa, N., Soussana, J-F., Taboada, M. A., Manning, F., Manning, F., Nampanzira, D., Smith P. 2020. The impact of interventions in the global land y agri-food sectors on Nature's Contributions to People y the UN Sustainable Development Goals. *Global Change Biology*. Accepted 16-03-2021.

Moscatelli G., Cruzate, G. 2000. Mapa de suelos alcalinos. Escala 1:500.000. INTA, CIRN, Instituto de Suelos

Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B., & Jackson, R. B. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, 2-11.

Osinaga, N., Álvarez, C.R., Taboada, M. A. 2018. Effect of deforestation y management on soil carbon stocks in the South American Chaco. *Soil Special Issue: Regional perspectives y challenges of soil organic carbon management y monitoring – A Special Issue from the Global Symposium on Soil Organic Carbon 2017*.

Oyarzabal, M., Clavijo, J. R., Oakley, L. J., Biganzoli, F., Tognetti, P. M., Barberis, I. M., ... & Leon, R. J. C. (2018). Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología Austral* 28: 040-063.

Padilla, F. M., Gallardo, M., & Manzano-Agugliaro, F. 2018. Global trends in nitrate leaching research in the 1960–2017 period. *Science of the Total Environment*, 643, 400-413. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.215>

Paladino, I.R., Sokolowski, A.C., Irigoin, J. et al. 2018. Soil properties evaluation in horticultural farms of Florencio Varela, Buenos Aires, Argentina. *Environ Earth Sci* 77, 411. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7568-2>

Panigatti, J. L. 2010. Argentina, 200 Años, 200 Suelos. MAGyP e INTA, Buenos Aires.

Paruelo, J. M., Guerschman, J. P. , Verón, S. R. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy* 15 (87), 11-16. Acceder en: <https://cienciahoy.org.ar/wp-content/uploads/tematico-agropecuario.pdf>

Peralta, G.E., Taboada, M.A., Kantolic, A., Rubio, G. 2020. Topsoil Hardening: Effects on Soybean Root Architecture y Water Extraction Patterns. *Journal of Soil Science y Plant Nutrition*, 2020, 20(4), pp. 2182–2194

Peralta, G., Alvarez, C.R., Taboada, M.Á. 2021. Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage y crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. *Soil y Tillage Research*, 2021, 211, 105022.

Periago, M.V., García, R., Astudillo, O.G. et al. 2018. Prevalence of intestinal parasites y the absence of soil-transmitted helminths in Añatuya, Santiago del Estero, Argentina. *Parasites Vectors* 11, 638. <https://doi.org/10.1186/s13071-018-3232-7>

Peters, G. P., Yrew, R. M., Boden, T., Canadell, J. G., Ciais, P., Le Quéré, C., ... & Wilson, C. 2013. The challenge to keep global warming below 2 C. *Nature Climate Change*, 3(1), 4-6.

Pla Sentis, I. 2021. Overview of Salt-Affected Areas in Latin America: Physical, Social y Economic Perspectives. p. 3-36. En: E. Taleisnik y R. S. Lavado (eds.), *Saline y Alkaline Soils in Latin America*. Springer Nature Switzerly AG 2021, https://doi.org/10.1007/978-3-030-52592-7_1

Reynoso, V., Frolla, F. D., Ortiz, S., Angelini, M. E., Cerón, A., Beltrán, M. J., Bunge, V., Peralta, G. E., Di Paolo, L. E., Rodríguez, D. M., Schulz, G. A., Velázquez, J., Pascale Medina, C., Guevara, M. 2021. Mapping soil carbon sequestration across Argentina y Mexico using Roth C. 16-17 June 2021. Webinar Pedometrics WDs Digital Soil Mapping – Global Soil Map. Accesible en: file:///C:/Users/MIGUEL/Downloads/webinar_2_pedometrics.pdf

Rodríguez, D., Schulz, G.A., Aleksa, A., Vuegen, L.T. 2019. Distribution y Classification of Soils. In: Rubio, G., Lavado, R., Pereyra, F. (eds) *The Soils of Argentina*. World Soils Book Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76853-3_5

Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., Pennock, D. 2018. *Soil Pollution: a hidden reality*. Rome, FAO. 142 pp.

Rubio, G., Pereyra, F.X., Taboada, M.A. 2019. Soils of the Pampean Region. In: Rubio, G., Lavado, R., Pereyra, F. (eds) *The Soils of Argentina*. World Soils Book Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76853-3_6.

SAGyP-CFA. 1995. El deterioro de las tierras en la República Argentina: la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca y el Consejo Federal Agropecuario en alerta amarillo. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca y Consejo Federal Agropecuario, Buenos Aires, 287 p.

SAGyP-INTA. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. INTA, Buenos Aires. SAGyP - INTA - Proyecto PNUD ARG/85/019. Con la participación del Instituto de Suelos y EEAs del INTA. Accesible en:

<http://www.geointa.inta.gob.ar/2013/05/26/suelos-de-la-republica-argentina/>

Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Larrea, G., Martínez Cuesta, N., Angelini, H., Reussi Calvo, N., Wyngaard, N. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Actas Simposio Fertilidad 2019, 141-158. Acceder en: <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/02/SAINZ-ROZAS-Fertilidad-2019-acta.pdf>

Satorre, E. H. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura actual. Ciencia Hoy 15 (87): 24-31. Acceder en:

<https://www.cienciahoy.org.ar/ch/ln/hoy87/cambios.htm>

Satorre, E. H., Andrade, F. H. 2021. Cambios productivos y tecnológicos de la agricultura extensiva argentina en los últimos quince años. Ciencia Hoy Vol 29 (173): 19-27. Acceder en:

https://www.researchgate.net/publication/353924648_Emilio_H_Satorre_Fernyo_H_Andrade_2021_Cambios_productivos_y_tecnologicos_de_la_agricultura

Scalenghe, R., & Marsan, F. A. (2009). The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 90(1-2), 1-10.

<https://doi.org/10.1016/j.lyurbplan.2008.10.011>

Scherr, S. 1999. Soil Degradation. A Threat to Developing-Country Food Security by 2020? International Food Policy Research Institute. 2020 Vision. Food, Agriculture, and the Environment. Discussion Paper 27. p. 63.

P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, R. van Diemen, E. Haughey, J. Malley, M. Pathak, J. Portugal Pereira (eds.) Technical Summary, 2019. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas,

E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].

Smith, P., Knem, J., Calvin, K.,, Taboada, M. A., [et al.]. 2019a. Chapter 6: Interlinkages between Desertification, Land Degradation, Food Security and GHG fluxes: 3 synergies, trade-offs and Integrated Response Options. Final Government Distribution Chapter 6: IPCC SRCCL, 303 p.

http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/2h.-Chapter-6_FINAL.pdf

Smith, P., Calvin, K., Nkem, J., Campbell, D., Cherubini, F., Grassi, G., Korotkov, V., Le Hoang, A., Lwasa, S., McElwee P., Nkonya, E., Saigusa, N., Soussana, J-F., Taboada, M. A., Manning, F., Nampanzira, D., Arias-Navarro, C., Vizzarri, M., House, J., Roe, S., Cowie, A., Rounsevell, M., Arneeth, A. 2019b. Which practices co-deliver food security, climate change mitigation and adaptation, and combat land-degradation and desertification? *Global Change Biology* (accepted 12 November 2019). DOI: 10.1111/gcb.14878

Taboada M. A., Damiano F., Lavado R.S. 2017. Suelos afectados por sales e inundaciones en la Pampa Deprimida y el Oeste Bonaerense. pp 56–87. En: Taleisnik E, Lavado RS (eds) *Ambientes salinos y alcalinos de la Argentina. Recursos y aprovechamiento productivo*. Orientación Gráfica Editora, Universidad Católica de Córdoba, Buenos Aires,

Taboada, M. A., Damiano, F., Cisneros, J. M., Lavado, R. S. 2021. Origin, Management and Reclamation Technologies of Salt-Affected and Flooded Soils in the Inly Pampas of Argentina. p. 209-228. En: E. Taleisnik, R. S. Lavado (Ed.). *Saline and Alkaline Soils in Latin America Natural Resources, Management and Productive Alternatives*, ISBN 978-3-030-52591-0 ISBN 978-3-030-52592-7 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-030-52592-7>, Springer Nature Switzerland AG 2021.

Usunoff, E., Varni, M., Weinzettel, P., Rivas, R. 1999. Hidrogeología de gyes llanuras. *La Pampa Húmeda argentina. Boletín Geológico y Minero* 110-4, 391-406.

Vázquez, M., Terminiello, A., Millán, G., Davedere, I., & Baridón, E. 2013. Dynamics of soil liming materials broadcast on a thaptoargic hapludoll soil in Argentina. *Ciencia del suelo*, 31(1), 23-32.

http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672013000100003&script=sci_arttext&tlng=es

Viglizzo, E., Carreño, L., Pereyra, H., Ricard, F., Clatt, J. , Pincén, D. 2010. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En: E.F. Viglizzo, E. Jobbágy (ed.). *Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental*. Ediciones INTA. Buenos Aires. p. 102.

Viglizzo, E.F., Ricard, M.F., Taboada, M.A., Vázquez-Amábile, G. 2019. Reassessing the role of grazing lys in carbon-balance estimations: Meta-analysis and review. *Science of the Total Environment* 661, 531-542 STOTEN-D-18-12572R1

Villamil, M., Amiotti, N., Peinemann, N. 2001. Soil degradation related to overgrazing in the semi-arid southern caldenal area of Argentina. *Soil Science* 166: 441-452.

Wang, Z. H., Li, S. X. 2019. Nitrate N loss by leaching and surface runoff in agricultural lys: A global issue (a review). *Advances in Agronomy*, 156, 159-217. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.01.007>.