

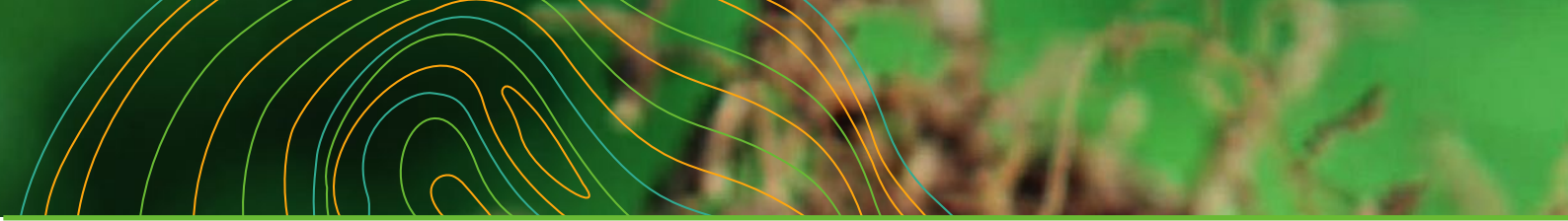


Ministerio
de Economía
República Argentina

Secretaría de Agricultura,
Ganadería y Pesca



Guía técnica para la recuperación de suelos degradados



El suelo es mucho más que el soporte físico de la producción agrícola:

“es un sistema vivo y dinámico que sustenta los ciclos del agua, del carbono y de los nutrientes, y del que depende gran parte de la resiliencia de los sistemas productivos frente a escenarios climáticos cada vez más variables”.

Sin embargo, hoy los suelos enfrentan crecientes desafíos -climáticos, productivos y ambientales- que pueden comprometer su productividad y su capacidad de seguir proveyendo los servicios ecosistémicos que hacen viable la agricultura del futuro.

Aunque existe abundante información sobre el tema, este conocimiento se encuentra disperso en publicaciones científicas,

documentos técnicos o experiencias aisladas. En muchos casos, los productores y asesores cuentan con diagnósticos generales sobre los problemas del suelo, pero no con una metodología práctica que permita priorizar intervenciones, monitorear indicadores y construir estrategias progresivas de recuperación adaptadas a cada sistema productivo.

En este contexto, el presente manual busca integrar conocimientos técnicos y experiencias de campo en una guía aplicada para el diagnóstico, planificación e implementación de prácticas orientadas a regenerar las funcionalidades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colaborativo entre cuatro instituciones que, desde distintos roles y perspectivas, comparten el mismo compromiso con la salud del suelo y la sustentabilidad productiva de la Argentina:





Aapresid. Referente en agricultura sustentable con foco en la regeneración del suelo y de la construcción de redes de innovación lideradas por productores y especialistas para desarrollar los modelos productivos que mejor se adapten a cada realidad;

Marcelo Torres
Presidente



Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), con su vasta trayectoria en investigación aplicada y generación de datos sobre la evolución de los parámetros de suelo en las principales regiones productivas del país;

Nicolás Bronzovich
Presidente



**Ministerio
de Economía**
República Argentina

**Secretaría de Agricultura,
Ganadería y Pesca**

Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, con la responsabilidad de promover marcos normativos y programas que incentiven el uso sostenible de los recursos naturales;

Jorge Gambale
Director Nacional
de Agricultura



Syngenta contribuye con herramientas tecnológicas orientadas al manejo eficiente del cultivo y el suelo, y con una presencia directa en los sistemas productivos que le permite traducir el conocimiento técnico en soluciones aplicables a escala de lote.

Mariale Álvarez
Directora de
Sustentabilidad y
Asuntos Públicos

La articulación de estas cuatro voces responde a una convicción compartida: los desafíos vinculados a la degradación del suelo no pueden abordarse desde un solo sector. Requieren del diálogo entre la ciencia, la política pública, el sector privado y las redes de productores; y demandan herramientas que sean al mismo tiempo técnicamente sólidas y operativamente accesibles para quienes trabajan el campo día a día.

El camino hacia la recuperación de los suelos es gradual y requiere constancia, seguimiento y adaptación. Este manual no pretende ser una receta única, sino una hoja de ruta flexible

que acompañe ese proceso: desde el diagnóstico inicial y la selección de indicadores clave, hasta la planificación de prácticas y el monitoreo de los avances a lo largo del tiempo. Cada sistema productivo tiene su historia, su lógica y sus limitaciones, y la propuesta metodológica que aquí se presenta está diseñada para adaptarse a esa diversidad.

Esperamos que este material se convierta en un punto de partida concreto para quienes, desde cualquier rincón del país, asumen el desafío cotidiano de producir cuidando.

Índice



8

1. Introducción

12

2. ¿Qué es el suelo degradado?

- 14 2.1. Tipos de degradación más frecuentes
- 18 2.2. Principales causas de degradación
 - 18 2.2.a. Rotaciones simplificadas
 - 19 2.2.b. Monocultivos
 - 20 2.2.c. Baja cobertura del suelo
 - 21 2.2.d. Labranza inadecuada
 - 22 2.2.e. Gestión inadecuada de excesos hídricos
 - 24 2.2.f. Tránsito no controlado
 - 25 2.2.g. Nutrición desbalanceada
- 27 2.3. Consecuencias productivas y ambientales

28

3. Diagnóstico y metodología para la recuperación de suelos

- 30 3.1. Diagnóstico integral del sistema
- 31 3.2. Indicadores para evaluar la salud del suelo
 - 32 3.2.a. Indicadores químicos: fertilidad y disponibilidad de nutrientes
 - 33 3.2.b. Indicadores físicos: estructura, porosidad y dinámica del agua
 - 34 3.2.c. Indicadores biológicos: actividad y funcionalidad del suelo
 - 35 3.2.d. Indicadores productivos: expresión integrada del sistema
- 36 3.3. Priorización de limitantes y definición de objetivos
- 38 3.4. Implementación del plan de recuperación
- 40 3.5. Monitoreo y ajuste continuo

42

4. Principios para la recuperación de suelos agrícolas

- 43 4.1. Prácticas estructurales: prioritarias, factibles y de alto impacto
- 44 4.2. Prácticas complementarias: no reemplazan al manejo, lo complementan
- 46 4.3. Prácticas para sistemas complejos: mayor complejidad, alto potencial

50

5. Recursos para acompañar el plan de recuperación

- 51 5.1. Herramientas para el diagnóstico y monitoreo
- 51 5.1.a. Protocolos adaptados para la medición de COS
- 51 5.1.b. Mapas de niveles de COS y aportes de MS
- 52 5.1.c. Sensores proximales de alta densidad (Veris MSP3)
- 52 5.1.d. CoreScan
- 53 5.2. Priorización de limitantes y definición de objetivos
- 53 5.2.a. Cropwise Protector
- 53 5.2.b. Cropwise Sustainability
- 53 5.2.c. Cropwise Imagery

54

Glosario

54

Bibliografía

56

Anexo

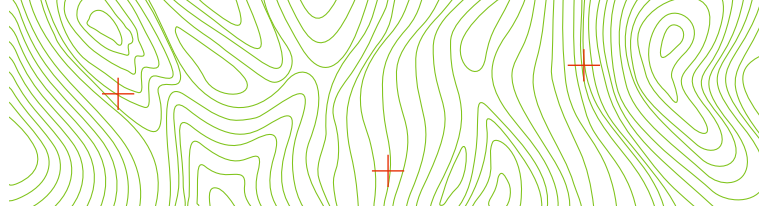
1 Introducción

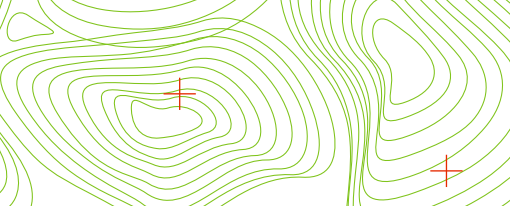
Un suelo sano es aquel que sostiene su capacidad productiva y funcional a lo largo del tiempo (FAO, 2015; Brady & Weil, 2016). Cada suelo posee un potencial productivo intrínseco determinado por factores naturales como el material originario, la textura, la profundidad, el clima, la topografía y la disponibilidad hídrica (Brady & Weil, 2016). El manejo define en qué medida ese potencial puede sostenerse o expresarse a lo largo del tiempo. Cuando ese manejo no es adecuado, el suelo se degrada y pierde su capacidad de producir y de brindar servicios ecosistémicos. Pero esta pérdida no es solo agronómica: impacta también en la calidad de los alimentos y en la salud de las personas. Como señala Lal (2015),

“cuando los suelos se degradan, también se degrada la salud humana”.

Frente a este desafío, recuperar los procesos del suelo (en particular la actividad biológica y el ciclo del carbono) es clave para construir sistemas productivos más eficientes, resilientes y sustentables.

La recuperación de los suelos degradados requiere comprender no sólo las causas que llevaron a este deterioro, sino también el rol central que desempeña el suelo como base productiva y como recurso estratégico para la estabilidad productiva y ambiental del sistema agropecuario (FAO, 2015; IPCC, 2019).





Esta guía está pensada para productores, asesores y equipos técnicos que buscan alternativas viables para detener y revertir procesos de degradación que se han vuelto crecientes en las últimas décadas.

A pesar de los avances logrados con la siembra directa en términos de control de erosión, la intensificación agrícola basada en rotaciones simplificadas, reducida presencia de gramíneas, baja cobertura durante el invierno y tránsito no controlado de la maquinaria ha ido debilitando funciones esenciales del suelo.

En distintas regiones agrícolas de Argentina se han registrado reducciones significativas del carbono orgánico del suelo asociadas a décadas de agricultura continua y rotaciones simplificadas. En sectores de la región pampeana, las pérdidas respecto a los niveles originales pueden superar el 30%, acompañadas por procesos de compactación superficial y subsuperficial, menor

infiltración y deterioro estructural (Sainz Rozas et al., 2011; Casas & Albarracín, 2015). A su vez, la intensificación agrícola con baja reposición de nutrientes ha generado balances negativos de nitrógeno y fósforo en amplias regiones productivas del país (García & González Sanjuan, 2013).

En este contexto, relevamientos recientes de la Red de Carbono de Aapresid evidencian que numerosos sistemas agrícolas requieren incrementar los aportes de biomasa para sostener o recuperar los niveles de carbono de suelo (Aapresid, 2024). Diversos estudios de INTA, FAO e IPCC coinciden en que estos procesos afectan:

- ✗ La productividad.
- ✗ La resiliencia de los sistemas frente a sequías y excesos hídricos.
- ✗ Reducción de eficiencia en el uso del agua y nutrientes.
- ✗ Incremento de costos necesarios para sostener los rendimientos.



Figura 1: Mapa de suelos degradados de Argentina (Informe Nacional PRAIS 4). Período 2016-2020. Fuente: Subsecretaría de Ambiente, 2024 y límites del Instituto Geográfico Nacional, 2023. Extraído del Informe del Estado del Ambiente 2024. <https://informe.ambiente.gob.ar/#>

+ Comprender esta problemática implica reconocer que la degradación no ocurre de manera repentina, sino de **forma gradual y acumulativa**.

Cada campaña en la que el suelo queda descubierto, cada rotación que excluye gramíneas y/o cultivos de servicio, cada tránsito en condiciones inadecuadas o cada extracción de nutrientes sin reposición contribuye a deteriorar funciones ecológicas que son fundamentales para la producción. El suelo reduce progresivamente su capacidad de comportarse como un sistema activo, capaz de infiltrar y almacenar agua, de reciclar y disponibilizar nutrientes, de sostener una biota diversa y funcional, y de mantener una estructura estable que permita el crecimiento profundo de las raíces. Por eso, hablar de recuperación exige adoptar una mirada integral, donde los aspectos físicos, químicos y biológicos se aborden de forma simultánea y coherente.

Este enfoque se apoya en el paradigma de que **el suelo no es un insumo, sino un capital natural** (Lal, 2015; FAO, 2015). Su valor no depende únicamente de la cantidad de nutrientes disponibles, sino de su capacidad para cumplir funciones que sostienen la producción y la estabilidad del sistema a largo plazo. La regulación hídrica, el ciclado de nutrientes, la formación y estabilidad de los agregados, la presencia de poros, el secuestro de carbono y la interacción entre raíces, microorganismos y materia orgánica son procesos que no pueden reemplazarse con insumos, hoy con un costo económico creciente (Brady & Weil, 2016). Documentos oficiales del IPCC y la FAO subrayan que los sistemas productivos más resilientes son aquellos que mantienen o incrementan su carbono orgánico, mejoran su estructura física y conservan o aumentan la biodiversidad edáfica (FAO, 2015; IPCC, 2019).

El suelo como caja de ahorro de carbono

“El suelo es la herencia más valiosa que se multiplica cuando la cuidamos”

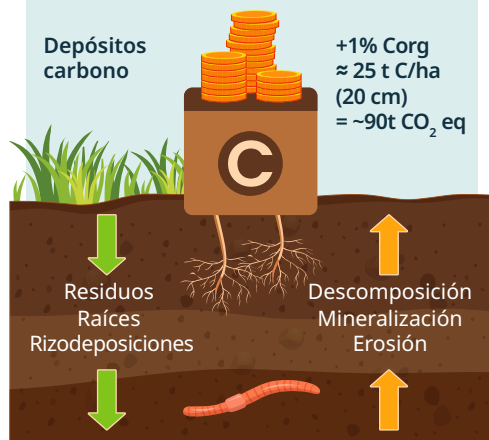


Figura 2: Esquema de las funciones y servicios del suelo. Adaptación de Jill Ciapperton, 2005.

+
Cada decisión de
manejo define el
saldo de nuestra
cuenta natural.

Argentina presenta condiciones particularmente favorables para avanzar hacia sistemas de manejo orientados a la regeneración del suelo. La amplia presencia de Molisoles y otros suelos con elevados contenidos originales de materia orgánica, junto con condiciones climáticas propicias para la producción de biomasa, confieren un alto potencial para almacenar carbono y sostener sistemas biológicamente activos (Jobbágy & Jackson, 2000; FAO, 2015). Sin embargo, relevamientos recientes de la Red de Carbono de Aapresid indican que muchas regiones agrícolas aún presentan balances insuficientes de carbono debido a la simplificación de rotaciones y a limitaciones en la generación de biomasa (Aapresid, 2024). En este contexto, prácticas como el aumento de la cobertura, la inclusión de gramíneas y cultivos de servicio,

una nutrición balanceada y la reducción del tránsito aleatorio representan herramientas clave para recuperar carbono, mejorar la funcionalidad del suelo y fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos.

Este manual propone una estructura para acompañar al productor en el camino de la regeneración. A lo largo de los capítulos se detallan las prácticas de mayor impacto, los indicadores más relevantes para evaluar la evolución del suelo, los métodos para implementarlos en campo y una metodología clara para diseñar un plan de recuperación progresivo, medible y adaptable a cada establecimiento. A diferencia de enfoques basados únicamente en recomendaciones conceptuales,

“este manual busca ofrecer criterios concretos para decidir qué medir, cómo interpretar los resultados, cuándo intervenir y qué prácticas priorizar según el diagnóstico inicial”.



2

¿Qué es el
suelo degradado?



En un suelo degradado **sus propiedades físicas, químicas y biológicas reducen su capacidad de funcionar** adecuadamente y de sostener la producción vegetal y otros servicios ecosistémicos.

La degradación del suelo no implica un diagnóstico irreversible, sino reconocer un proceso gradual que avanza cuando el manejo se va desvinculando de las necesidades del sistema. Este deterioro, que afecta funciones productivas y ecológicas, suele instalarse de forma silenciosa y recién se hace evidente cuando disminuye la resiliencia del sistema o aparecen pérdidas de rendimiento. Se trata de un proceso multicausal y, en la mayoría de los casos, **reversible si se implementan prácticas de manejo adecuadas y sostenidas en el tiempo.**

Gradiente (no binario):

El deterioro es gradual y reversible con manejo.

Suelo sano

Alta infiltración

Buena estructura

Alta actividad biológica

Suelo degradado

Baja infiltración

Pérdida de MO/COS

Compactación



Figura 3: Características del suelo en función de la degradación. Elaboración propia.

Desde una perspectiva productiva, un suelo comienza a considerarse degradado cuando pierde parte de su capacidad para

cumplir funciones esenciales de las que depende la producción y la resiliencia del sistema. Entre esas funciones se destacan:

- ❌ Sostener rendimientos de manera estable a lo largo de campañas con distinta oferta hídrica.
- ❌ Infiltrar y almacenar agua en el perfil para amortiguar períodos secos; proveer y reciclar nutrientes a través de procesos biogeoquímicos activos.
- ❌ Sostener comunidades microbianas y fauna edáfica con adecuada biomasa, diversidad y actividad funcional (clave para el ciclado de nutrientes, la formación de agregados y la creación de bioporos).
- ❌ Mantener una estructura física estable, con porosidad y densidad adecuadas, que permita el crecimiento radicular profundo y el intercambio de agua y aire.

Cuando estas funciones se deterioran simultáneamente, el suelo requiere cada vez más insumos para sostener desempeños que antes lograba con menor intervención.

Los procesos de degradación no ocurren de manera aislada: lo químico, lo físico y lo biológico se superponen y retroalimentan. Entender esa interacción es clave para diagnosticar a tiempo y priorizar las prácticas correctivas.



2.1

Tipos de degradación más frecuentes

Degradación química



La degradación química del suelo corresponde al **deterioro de las propiedades químicas** que regulan la disponibilidad y el equilibrio de nutrientes para las plantas.

Puede originarse por desequilibrios nutricionales, cambios adversos en el pH, acumulación de sales, sodio o compuestos potencialmente tóxicos, afectando tanto la productividad como el funcionamiento del sistema (FAO, 2015; Brady & Weil, 2016).

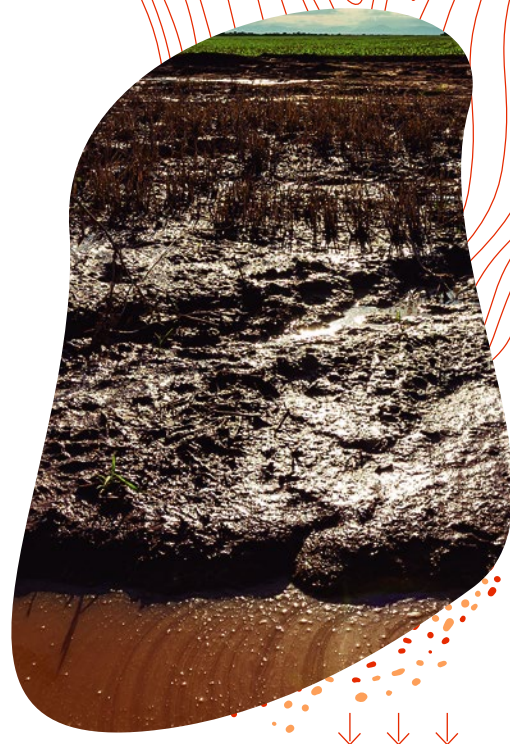
En muchos casos, la degradación química se encuentra estrechamente vinculada con la pérdida de materia orgánica del suelo, que actúa como reserva de nutrientes y cumple un rol central en la estabilidad estructural y en la capacidad de intercambio del suelo (Lal, 2015; Brady & Weil, 2016).

Con el tiempo, la extracción continua de

nutrientes sin reposición balanceada y el uso reiterado de fuentes acidificantes favorecen procesos de acidificación (García & González Sanjuan, 2013). En determinados ambientes, pueden sumarse otros procesos de degradación química como la salinidad y la sodicidad, asociadas al ascenso de napas, la calidad del agua de riego o manejos hídricos deficientes (FAO, 2015). Estas condiciones alteran la estructura del suelo, reducen la infiltración y afectan la implantación y desarrollo de los cultivos. La consecuencia típica es una menor fertilidad efectiva y una menor eficiencia de uso de fertilizantes, que obliga a mayores inversiones para sostener el nivel de rendimiento.

Otra forma de degradación química corresponde a la acumulación y persistencia de compuestos potencialmente fitotóxicos asociados a efectos residuales. Estos compuestos pueden alterar el equilibrio químico del suelo, afectar la disponibilidad de nutrientes y comprometer el crecimiento de los cultivos (Brady & Weil, 2016). Como consecuencia general, la degradación química:

- ✗ Reduce la fertilidad efectiva.
- ✗ Disminuye la eficiencia de uso de los fertilizantes.
- ✗ Incrementa las inversiones necesarias para sostener los rendimientos.



Degradación física

+ La degradación física del suelo ocurre cuando se deterioran la estructura y la porosidad.

La estructura del suelo se refiere a la forma en que las partículas minerales y la materia orgánica se organizan formando agregados, mientras que la porosidad corresponde al sistema de poros que permite el movimiento y almacenamiento de agua y aire dentro del perfil. Cuando estas propiedades se alteran, disminuyen la aireación, la infiltración y el crecimiento radicular, afectando la productividad del sistema.

La compactación superficial o subsuperficial es uno de los procesos más frecuentes de degradación física y puede originarse por:

- ✗ El tránsito reiterado de maquinaria.
- ✗ La falta de rotaciones con gramíneas.
- ✗ La pérdida de materia orgánica.
- ✗ La ausencia de bioporos generados por la biota del suelo.

Cuando se forman capas densas o “pisos”, aumenta la resistencia mecánica a la penetración, las raíces profundizan menos y el suelo pierde macroporos, reduciendo la infiltración y aumentando el escurrimiento.

Otro caso de degradación física es la formación de estructuras superficiales de tipo laminar, asociadas a procesos de compactación y reorganización horizontal de partículas. Este tipo de estructuras limitan el ingreso de agua al suelo. En la Figura 4 se muestra una imagen del horizonte superficial de un Argiudol ácuico bajo siembra directa donde se realizó una medición de infiltración utilizando el colorante Brilliant Blue. Puede observarse que la sombra del cuchillo señala la presencia de una capa con estructura laminar de aproximadamente 3 cm de espesor que no fue coloreada por el pigmento. Por debajo se observa nue-

vamente el suelo pigmentado, ya que los canales de raíces y otros bioporos permiten el ingreso de agua a pesar de esta severa limitante. Esto expone al sistema a anegamientos y, paradójicamente, a mayor estrés hídrico en períodos secos por menor almacenamiento. A su vez, la reducción de la infiltración y la baja cobertura del suelo incrementa la susceptibilidad a la erosión hídrica (un proceso relevante en la región pampeana) que no solo implica la remoción de las capas más fértiles, sino también la disminución de la materia orgánica y de la capacidad productiva (Taboada & Álvarez, 2008; FAO, 2015).



Figura 4: Fotografía del horizonte superficial de un Argiudol ácuico bajo SD donde se realizó medición de infiltración con colorante *Brilliant Blue*.

Degradación biológica



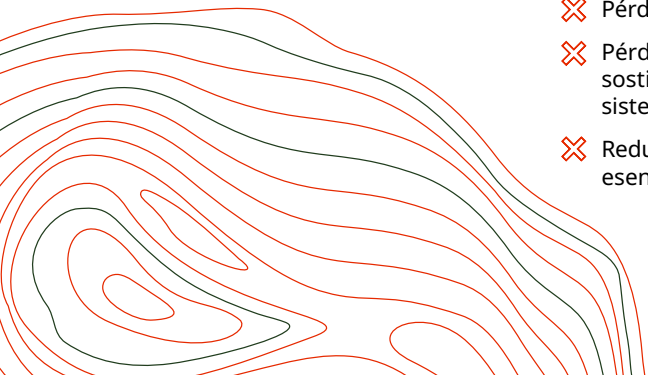
La degradación biológica del suelo es el **deterioro de su componente vivo, principalmente su microbiota**, que reduce su funcionalidad ecológica y afecta procesos como el ciclado de nutrientes, la estabilidad estructural y la regulación de enfermedades, comprometiendo así la salud y productividad del sistema.

La degradación biológica se encuentra estrechamente vinculada con la degradación física y química, ya que cambios en la estructura, la porosidad, el contenido de carbono orgánico, el pH o la disponibilidad de nutrientes modifican el hábitat y la actividad de los organismos del suelo (FAO, 2015; Lal, 2015).

Un suelo sano puede albergar millones de microorganismos por gramo y miles de especies de bacterias, hongos, nematodos, ácaros e insectos por metro cuadrado. La degradación biológica implica:

- ✗ Pérdida significativa de biodiversidad
- ✗ Pérdida de las interacciones que sostienen el funcionamiento del sistema.
- ✗ Reducción de la eficiencia de procesos esenciales para el suelo.

Aun cuando la biomasa microbiana total pueda mantenerse relativamente estable, cambios en la composición y diversidad de las comunidades microbianas pueden derivar en sistemas menos eficientes desde el punto de vista funcional, afectando procesos como el ciclado de nutrientes y la formación de estructuras estables. Esto implica una menor eficiencia en los procesos de mineralización e inmovilización de nutrientes. Además, se debilita la estabilidad estructural y se reduce la formación de bioporos, afectando el movimiento de agua y el crecimiento radicular. Como consecuencia, disminuye la capacidad de secuestro de carbono y la recuperación frente a disturbios, comprometiendo la resiliencia del sistema (Bardgett & van der Putten, 2014).



3 Tipos de degradación del suelo

Degradación productiva (resultado integrado)



Cuando las dimensiones química, física y biológica convergen, la degradación se expresa a nivel de lote como **estancamiento o caída de rendimientos, mayor variabilidad interanual y menor previsibilidad de respuesta a insumos.**

Aumenta la sensibilidad a **sequías y excesos hídricos**, y el sistema demanda estrategias de manejo para sostener la producción (figura 5).

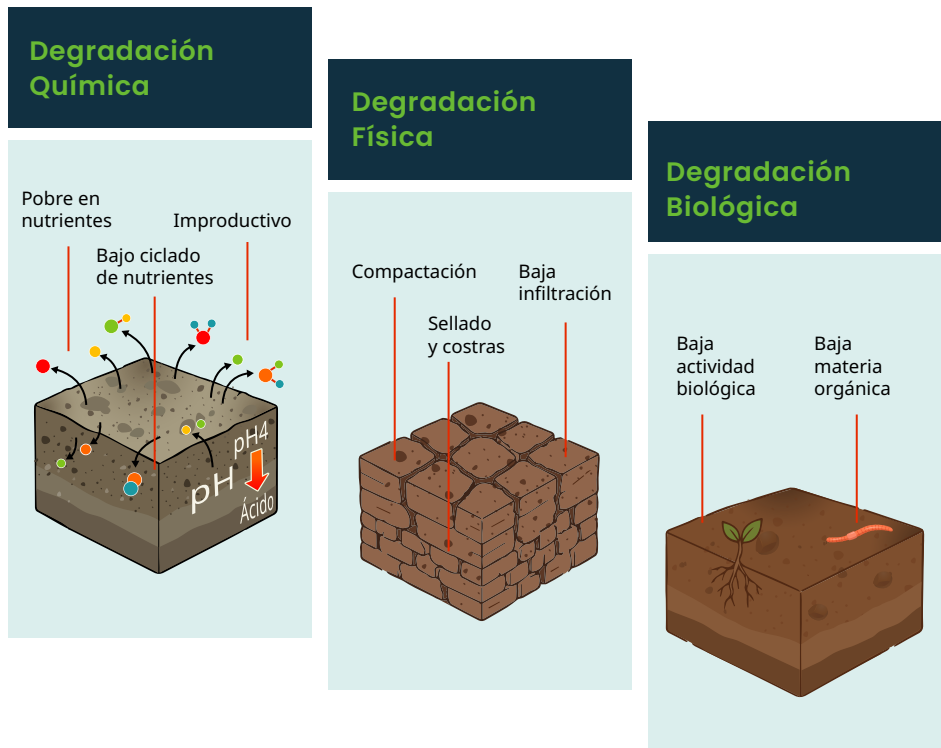
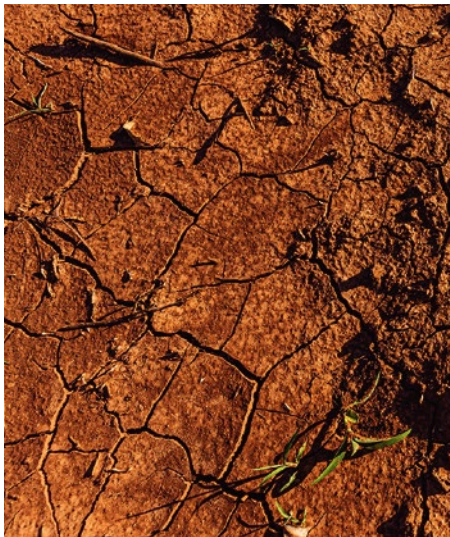


Figura 5: Resumen de tipos de degradación del suelo, su interacción y su expresión productiva. Elaboración propia.

2.2

Principales causas de degradación

Los procesos de degradación del suelo están asociados principalmente a prácticas de manejo que reducen la diversidad biológica y la intensidad del aporte de residuos al suelo.



2.2.a. Rotaciones simplificadas

Las rotaciones simplificadas, caracterizadas por **baja diversidad e intensidad de cultivos**, reducen la diversidad funcional del sistema y disminuyen el aporte de residuos al suelo.

Sistemas con escasa participación de gramíneas, pocos cultivos por unidad de tiempo y prolongados períodos de barbecho generan menores ingresos de carbono y reducen la presencia de raíces activas a lo largo del año. Cuando los ingresos de carbono son insuficientes, los períodos

sin cultivos se prolongan y existe escasa presencia de raíces con diferente arquitectura y profundidad, se debilitan los procesos de formación y estabilización de agregados, disminuye el carbono orgánico y se reduce la actividad biológica del suelo.

CONSECUENCIA

Se deterioran progresivamente propiedades físicas, químicas y biológicas fundamentales para sostener la productividad y resiliencia del sistema (FAO, 2015; Aapresid, 2024).

2.2.b. Monocultivos

Los monocultivos y las secuencias con baja diversidad de especies **difícilmente resulten sostenibles en el largo plazo**, ya que la simplificación del sistema reduce la capacidad reguladora del suelo y favorece procesos de degradación física, química y biológica.

En estos sistemas se homogeniza el ambiente edáfico, se simplifica la composición funcional del microbioma y se pierde la complementariedad entre especies de cultivo.

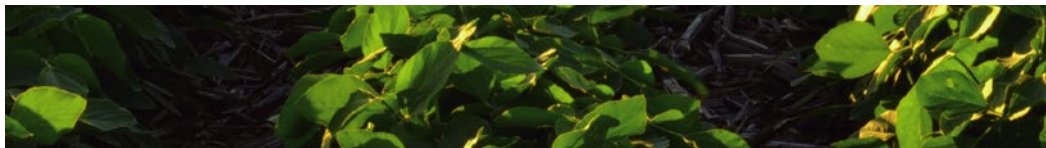


Figura 6: La simplificación de las rotaciones reduce la diversidad de aportes al suelo y limita la reposición de COS.

CONSECUENCIA

El sistema pierde eficiencia en el uso del agua y los nutrientes y aumenta progresivamente la dependencia de insumos externos para corregir desequilibrios y sostener los rendimientos (Abán et al., 2026).

La menor diversidad de raíces y exudados limita la capacidad de modular procesos clave en la rizosfera, afectando la eficiencia en el ciclado de nutrientes y en el uso del carbono. Al mismo tiempo, se intensifica la extracción desbalanceada de nutrientes y se debilitan los mecanismos biológicos que contribuyen a sostener la estructura del suelo.



2.2.c. Baja cobertura del suelo



La baja cobertura del suelo durante parte del año **incrementa la exposición de la superficie a la radiación**, favorece la evaporación de agua y acelera la mineralización de la MO (FAO, 2015; Lal, 2015). Además, reduce la infiltración efectiva y aumenta la susceptibilidad a procesos erosivos.

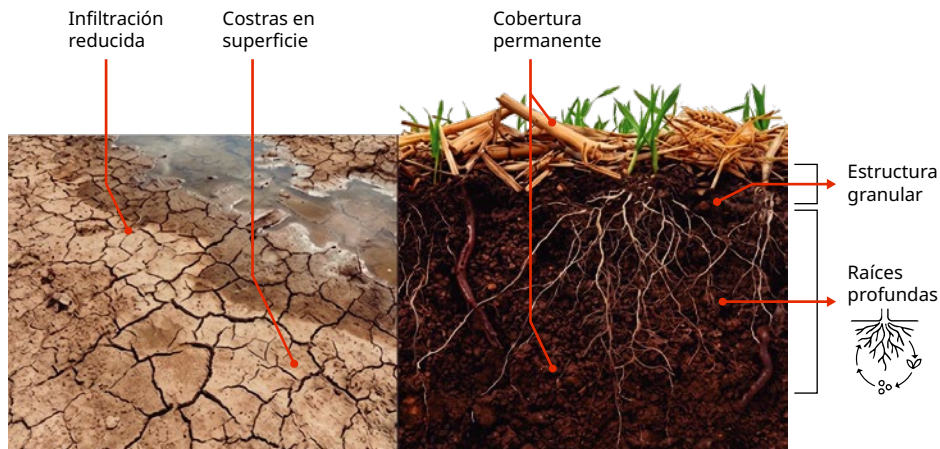


Figura 7: Efecto de la cobertura superficial sobre la protección estructural del suelo.

CONSECUENCIA

La escasa presencia de rastrojos limita los aportes de carbono al sistema y disminuye la protección física del suelo frente al impacto de la lluvia y el viento. Como consecuencia, se deterioran progresivamente la estructura del suelo, la actividad biológica y la capacidad de regulación hídrica del sistema (Blanco-Canqui & Lal, 2009).



Figura 8: Los suelos descubiertos presentan mayor riesgo de degradación física, pérdida de carbono y disminución de la infiltración.

2.2.d. Labranza inadecuada

La utilización de labranzas puntuales con el objetivo de descompactar capas densificadas suele generar beneficios transitorios, ya que la mejora estructural inducida es de corta duración si no se acompaña de procesos de estabilización mediados por la actividad biológica.

+ Además, el uso reiterado de labores mecánicas para control de malezas o acondicionamiento superficial puede acelerar la **desestructuración del suelo**, aumentar la pérdida de materia orgánica y reducir la estabilidad de agregados y la actividad biológica (Taboada & Álvarez, 2008; FAO, 2015).

Incluso, cuando estas intervenciones se realizan en condiciones de elevada humedad del suelo, pueden no generar mejoras efectivas e incrementar el riesgo de erosión.

Por otro lado, la formación de estructuras laminares superficiales responde a procesos de fisuración horizontal asociados a ciclos de humedecimiento y secado en suelos densificados, frecuentemente condicionados por el desarrollo radicular concentrado en esas capas. Si bien estas estructuras pueden generarse en el corto plazo, por ejemplo, como consecuencia del tránsito con el suelo en estado húmedo, su remediación no resulta eficiente mediante la-

branzas, dado que estas tienden a agravar la inestabilidad estructural.

En cambio, la recuperación hacia estados estructurales más estables se ve favorecida por estrategias de manejo basadas en la diversificación de rotaciones y la incorporación de cultivos de servicio, especialmente gramíneas, que aportan raíces continuas y promueven procesos de agregación y reorganización de la estructura del suelo.



Figura 9: Las labranzas mecánicas rompen la estructura del suelo, reducen la estabilidad de agregados y favorecen procesos de degradación física.

2.2.e. Gestión inadecuada de excesos hídricos



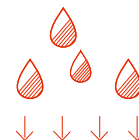
La gestión deficiente de los excesos hídricos, caracterizada por la **ausencia o inadecuada implementación de sistemas de drenaje y sistematización de tierras**, desencadena una serie de problemas que afectan severamente la calidad y productividad de los suelos agrícolas.

Cuando el agua no puede evacuarse apropiadamente, se producen anegamientos recurrentes que saturan el perfil del suelo, limitando el intercambio gaseoso y creando condiciones de anaerobiosis que

perjudican tanto el desarrollo radicular como la actividad microbiana benéfica (FAO, 2015; Brady & Weil, 2016).

Esta saturación prolongada provoca el deterioro progresivo de la estructura del suelo, afectando la estabilidad de los agregados y generando procesos de compactación que reducen la infiltración y permeabilidad (Taboada & Álvarez, 2008). En determinados ambientes, particularmente en zonas con napa freática cercana a la superficie o con presencia de sales en el perfil, estos excesos hídricos pueden desencadenar procesos de salinización secundaria, donde las sales ascienden por capilaridad y se concentran en la zona radicular (FAO, 2015). La Figura 10 resume algunos de los principales efectos asociados a una gestión inadecuada de los excesos hídricos.

Más grave aún es el proceso de sodificación, donde el incremento de sodio intercambiable deteriora severamente las propiedades físicas del suelo, provocando dispersión de arcillas, sellado superficial y pérdida de la capacidad productiva (Brady & Weil, 2016; Lavado & Taboada, 2009).



“Estos procesos de degradación no solo afectan el rendimiento de los cultivos a corto plazo, sino que pueden comprometer la sustentabilidad del sistema productivo a largo plazo, requiriendo costosas intervenciones para su recuperación”.



Anegamiento - Anaerobiosis

Dispersión de arcillas

Ascenso capilar

La gestión de los excedentes hídricos mediante prácticas de sistematización, como la implementación de terrazas de evacuación, constituye una herramienta clave para reducir los impactos negativos del exceso de agua en los sistemas productivos. Estas estructuras permiten regular el escurrimiento superficial y disminuir la velocidad de flujo, reduciendo así los procesos de erosión y pérdida de suelo (INTA, 2018). Cuando son correctamente diseñadas e integradas a un manejo conservacionista (combinadas con rotaciones diversificadas y cobertura permanente),

“las terrazas de evacuación contribuyen a mejorar la capacidad reguladora del suelo, favoreciendo una mejor distribución del agua en el perfil, la protección de la estructura y la sustentabilidad del sistema productivo a largo plazo (FAO, 2015; INTA, 2018)”.



Sistematización - Drenaje

Estructura estable

Raíces funcionales

Figura 10: La deficiente gestión de los excesos hídricos provoca anegamientos, deterioro estructural del suelo y pérdida de productividad agrícola.

2.2.f. Tránsito no controlado

El tránsito no controlado de maquinaria genera procesos de compactación superficial y subsuperficial, especialmente cuando las labores se realizan en condiciones de elevada humedad del suelo.



La ausencia de carriles definidos favorece la distribución aleatoria de las cargas, incrementando la heterogeneidad física del lote y promoviendo la formación de capas densificadas o “pisos”, que restringen el crecimiento radicular y el movimiento del agua (Taboada & Álvarez, 2008; Brady & Weil, 2016).

CONSECUENCIA



Disminuye la infiltración, se reduce la aireación y se limita la exploración del perfil por parte de las raíces, afectando tanto la productividad como la capacidad del sistema para tolerar períodos de exceso o déficit hídrico. Además, la compactación persistente dificulta la recuperación estructural del suelo y reduce la generación de bioporos asociados a la actividad biológica y al crecimiento radicular.

El tránsito controlado se propone como una estrategia para concentrar el impacto mecánico en zonas específicas y preservar la estructura del resto del lote. Sin embargo, su implementación aún es limitada en muchos sistemas productivos de Argentina, por lo que la gestión del tránsito continúa siendo un desafío importante para la conservación del suelo (Tullberg et al., 2007).

La Figura 11 resume algunos de los principales efectos del tránsito no controlado sobre la estructura y funcionalidad del suelo.



Figura 11: El tránsito no controlado de maquinaria genera compactación, limita el crecimiento radicular y reduce la infiltración de agua.

2.2.g. Nutrición desbalanceada

Una nutrición desbalanceada y la ausencia de diagnósticos adecuados del suelo generan una cascada de efectos negativos en los sistemas agrícolas.



Cuando los nutrientes extraídos por los cultivos no se reponen de manera apropiada, **disminuye la eficiencia en el uso de fertilizantes**, ya que la disponibilidad desbalanceada de nutrientes limita la capacidad de los cultivos para aprovechar adecuadamente los recursos aplicados (García & González Sanjuan, 2013; Brady & Weil, 2016).

Esta situación interrumpe los ciclos de nutrientes y favorece procesos de degradación química, física y biológica asociados al agotamiento nutricional, la disminución del COS y el deterioro de la actividad biológica del suelo. A su vez, la menor disponibilidad de nutrientes reduce la producción de biomasa y residuos vegetales, disminuyendo los aportes de carbono al sistema.

CONSECUENCIA



Se debilitan los procesos de agregación, disminuye la estabilidad estructural y se reduce la capacidad de retención de agua del suelo. Además, la pérdida de actividad y diversidad microbiana afecta procesos clave como la mineralización de nutrientes y las interacciones entre suelo, raíces y microorganismos.

En conjunto, esta degradación progresiva se traduce en una menor calidad del suelo, reducción de la productividad, mayor susceptibilidad al estrés y menor eficiencia en el uso de recursos. Desde el punto de vista económico, implica mayores costos de insumos por unidad de rendimiento, menor retorno de la inversión en fertilización y una mayor huella ambiental asociada a la producción agrícola (FAO, 2015; Lal, 2015).

La Figura 12 resume las principales causas de degradación abordadas en este capítulo y sus efectos sobre el funcionamiento del suelo y la productividad del sistema. Para más información, revisar la Tabla 1, Anexo.

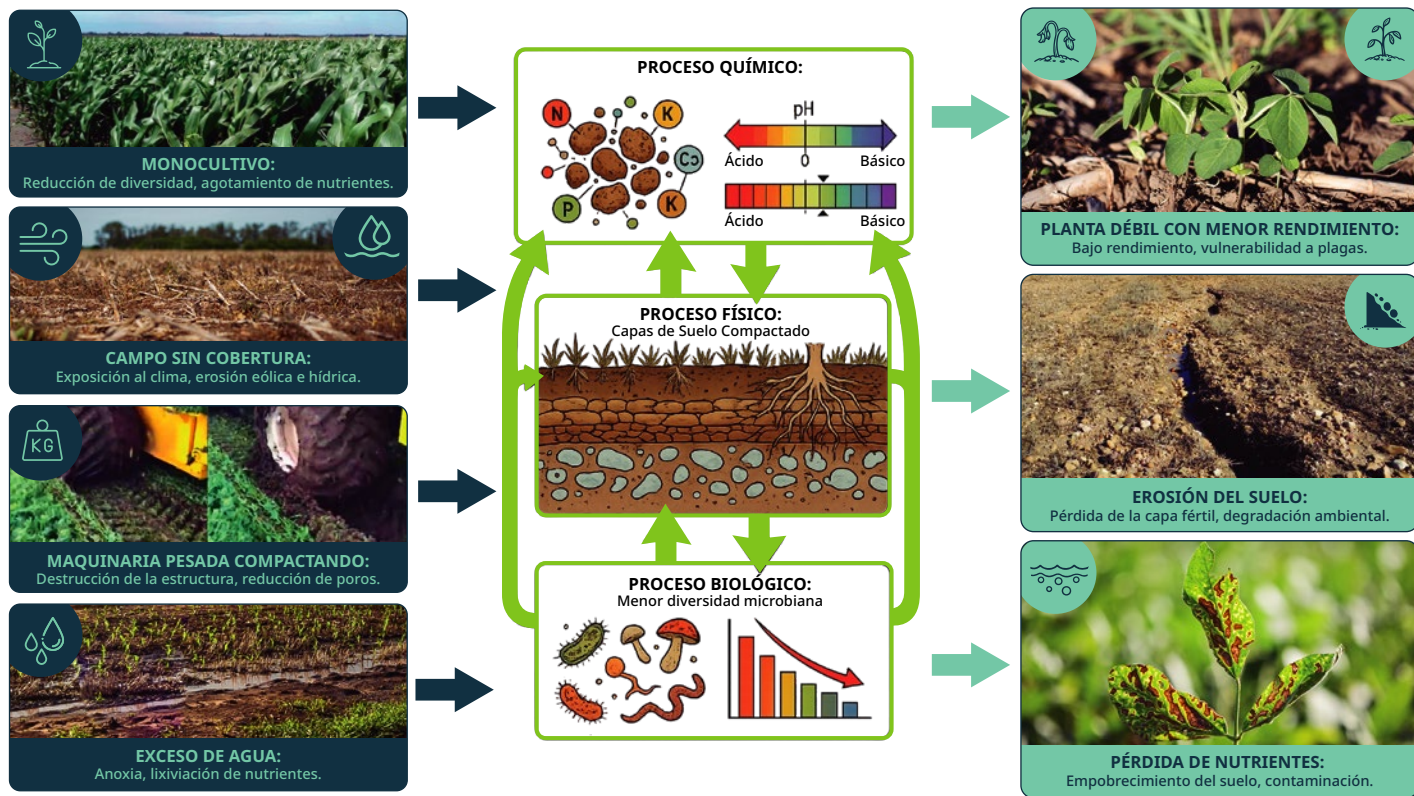


Figura 12: Causas de degradación del suelo y sus consecuencias. Elaboración propia.

2.3 Consecuencias productivas y ambientales

A nivel productivo, los suelos degradados presentan menor eficiencia en el uso de la radiación, el agua y los nutrientes, incrementando el costo por tonelada producida. Además, la respuesta a la fertilización y al mejoramiento genético disminuye cuando el ambiente edáfico no ofrece condiciones adecuadas de estructura, aireación y actividad biológica que permitan expresar el potencial de esas tecnologías.



En el plano ambiental, la pérdida de COS **reduce la capacidad del suelo para almacenar nutrientes y agua, regular los flujos hídricos y sostener procesos biológicos esenciales.**

Al mismo tiempo, la menor cobertura, la pérdida de estabilidad de agregados y la disminución de la infiltración incrementan los riesgos de erosión hídrica y eólica.

CONSECUENCIA



Aumenta el escurrimiento superficial, se intensifica la pérdida de suelo fértil y disminuye la capacidad de los sistemas agrícolas para contribuir a la mitigación del cambio climático.



A green tractor with a tillage implement is shown in a field at sunset. The tractor is positioned in the center-right of the frame, facing right. The background features a bright orange and yellow sunset sky with the sun low on the horizon. The field is dark and appears to be a recently plowed or tilled area. The tractor has large, deep-tread tires and a complex mechanical implement attached to the front. The overall scene conveys a sense of agricultural work and environmental stewardship.

3

Diagnóstico y metodología para la recuperación de suelos

La recuperación de suelos degradados requiere comprender cuáles son las limitantes que afectan el funcionamiento del sistema y definir estrategias de manejo capaces de revertirlas de manera progresiva.

En este contexto, el diseño de un plan de recuperación debe abordarse como un proceso continuo que integra:



Diagnóstico



Priorización
de limitantes



Definición
de objetivos



Implementación
de prácticas



Monitoreo
permanente

Debido a que la degradación del suelo responde a la interacción de procesos **físicos, químicos y biológicos**, su evaluación no puede basarse en un único indicador ni en recomendaciones aisladas.

Por el contrario, requiere una mirada integral que permita interpretar cómo evolucionan la estructura, la actividad biológica, el carbono, la dinámica del agua y la productividad dentro de cada ambiente productivo.



A partir de este enfoque, es posible construir estrategias de manejo orientadas no solo a recuperar rendimientos, sino también a **reconstruir funciones esenciales del suelo vinculadas con la resiliencia y sustentabilidad del sistema.**



3.1 Diagnóstico integral del sistema

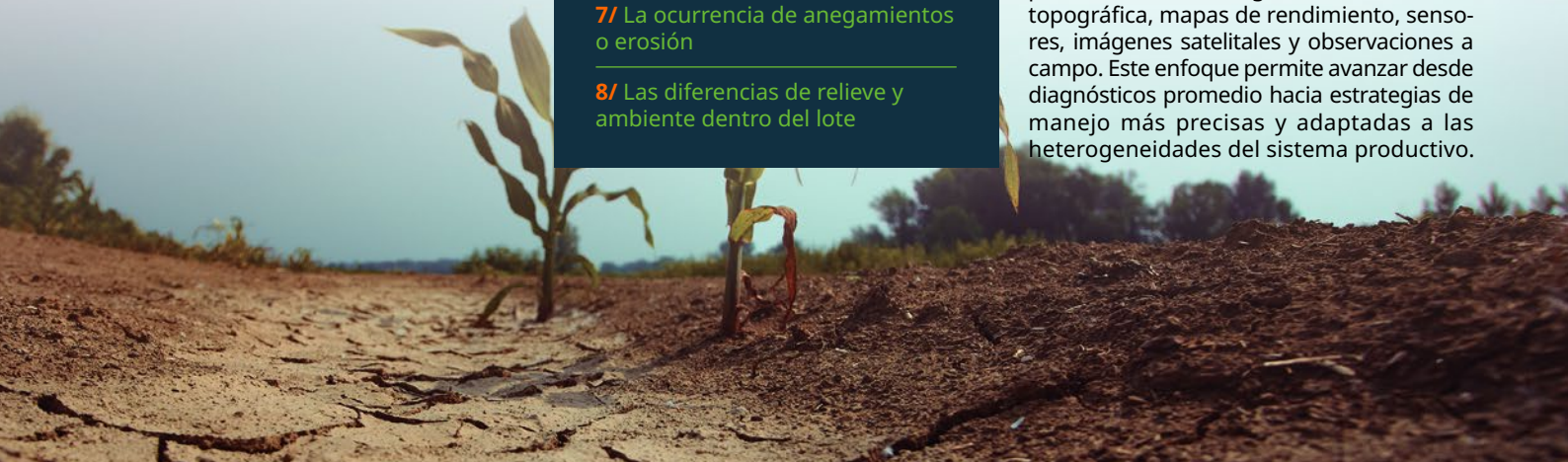
El diseño de un plan de recuperación comienza con un diagnóstico integral del lote que permita interpretar el funcionamiento actual del sistema y comprender los procesos que condujeron a su degradación. Este diagnóstico no debe limitarse únicamente a los análisis de suelo, sino incorporar también información vinculada al manejo histórico y a la variabilidad ambiental del establecimiento.

Entre los principales aspectos a considerar se incluyen:

- 1/ La secuencia de cultivos
- 2/ El nivel de intensificación y diversificación de las rotaciones
- 3/ La presencia o ausencia de CS
- 4/ Las estrategias de fertilización y reposición de nutrientes
- 5/ El uso de enmiendas
- 6/ El tránsito de maquinaria
- 7/ La ocurrencia de anegamientos o erosión
- 8/ Las diferencias de relieve y ambiente dentro del lote

La integración de esta información permite construir una línea de base sobre la cual evaluar posteriormente la evolución del sistema. Al mismo tiempo, facilita la identificación de limitantes prioritarias que condicionan la productividad y el funcionamiento del suelo, como compactación, baja infiltración, pérdida de carbono, deficiencias nutricionales o degradación estructural.

Debido a que gran parte de los procesos de degradación presentan una marcada variabilidad espacial, el diagnóstico debe incorporar herramientas de caracterización por ambientes, integrando información topográfica, mapas de rendimiento, sensores, imágenes satelitales y observaciones a campo. Este enfoque permite avanzar desde diagnósticos promedio hacia estrategias de manejo más precisas y adaptadas a las heterogeneidades del sistema productivo.



3.2

Indicadores para evaluar la salud del suelo

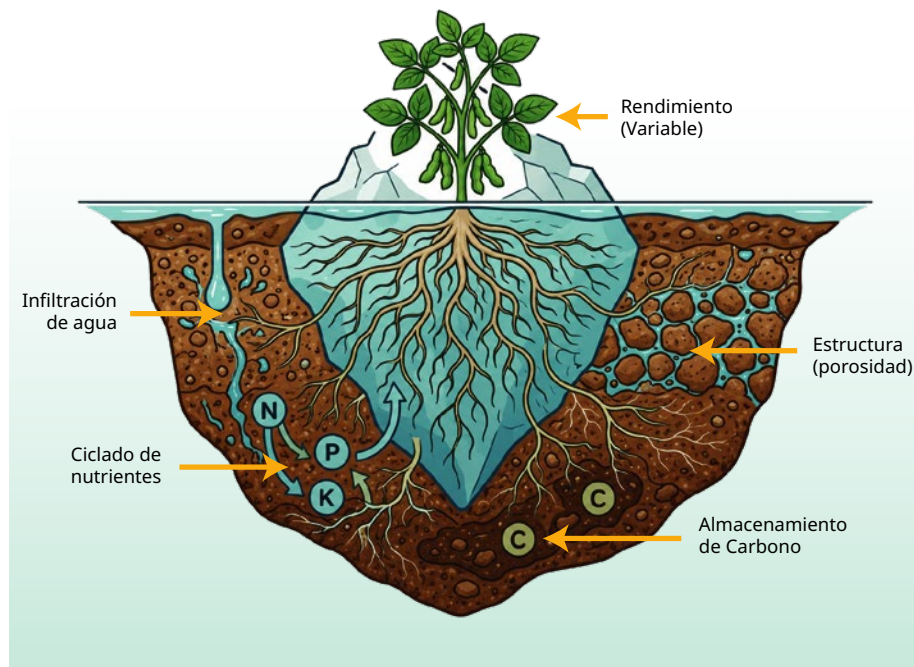


Figura 13: Indicadores y características para evaluar la salud del suelo

La evaluación de la salud del suelo requiere combinar indicadores químicos, físicos, biológicos y productivos que permitan interpretar procesos y monitorear cambios a lo largo del tiempo.

Ningún indicador por sí solo describe completamente el funcionamiento del sistema.

Por el contrario, su interpretación debe realizarse de manera integrada.

La selección de indicadores dependerá de las características del ambiente, de las limitantes identificadas y de los objetivos planteados dentro del plan de recuperación. La Figura 13 resume algunos de los principales indicadores utilizados para evaluar la salud del suelo y su relación con distintos procesos del sistema.

3.2.a. Indicadores químicos: fertilidad y disponibilidad de nutrientes

Los indicadores químicos constituyen la base del diagnóstico de fertilidad del suelo, ya que determinan su capacidad para abastecer nutrientes esenciales como **nitrógeno, fósforo, azufre, calcio, magnesio, potasio y micronutrientes.**

Entre ellos, el pH se destaca como un indicador clave debido a que regula la disponibilidad de nutrientes y condiciona la actividad microbiana.

Del mismo modo, la presencia de salinidad o sodicidad resulta crítica, ya que puede

degradar la estructura del suelo, disminuir la infiltración y limitar la implantación y desarrollo de cultivos.

Sin embargo, el valor absoluto de un nutriente rara vez explica por sí solo la respuesta productiva de un cultivo. La fertilidad debe interpretarse desde una perspectiva integral que contemple:

Las interacciones entre nutrientes, donde excesos o desbalances pueden afectar la disponibilidad y absorción de otros elementos, como ocurre en relaciones K:Mg o Ca:Mg.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), que refleja la capacidad del suelo para retener e intercambiar nutrientes.

La variabilidad espacial del ambiente, que condiciona las estrategias de reposición.

La tendencia temporal de los indicadores, dado que un suelo puede presentar niveles aceptables de nutrientes, pero evidenciar una disminución sostenida a lo largo del tiempo.

De este modo, el diagnóstico deja de enfocarse únicamente en la deficiencia de un nutriente aislado para interpretar las interacciones y procesos que condicionan la respuesta del cultivo y la funcionalidad del sistema.

3.2.b. Indicadores físicos: estructura, porosidad y dinámica del agua



Los indicadores físicos permiten evaluar el funcionamiento real del perfil del suelo y su capacidad para sostener procesos clave vinculados al **movimiento de agua, aire y raíces.**



Entre los principales se incluyen:

Estabilidad de agregados y estructura del suelo, fundamentales para mantener la resistencia a la erosión y el funcionamiento físico del perfil.

Porosidad y continuidad de poros, que condicionan la circulación de agua, aire y raíces.

Infiltración y capacidad de almacenamiento hídrico.

Resistencia a la penetración (RP), utilizada como indicador de compactación y limitaciones al crecimiento radicular.

Entre estas variables, la compactación constituye una de las restricciones más frecuentes en sistemas agrícolas intensivos. Muchas veces no es visible en superficie ni queda reflejada en los análisis químicos tradicionales. En este contexto, la medición espacial de la compactación mediante penetómetros, sensores de penetración o tecnologías como CoreScan permite identificar la profundidad, continuidad y distribución de las capas densificadas, facilitando diagnósticos más precisos y estrategias de manejo mejor orientadas.

La estructura física del suelo también se relaciona estrechamente con la posición en el paisaje. Los sectores bajos pueden presentar anegamientos y pérdida de estructura, mientras que las posiciones más elevadas suelen estar más expuestas a procesos de lixiviación y estrés hídrico. Por ello, los indicadores físicos deben analizarse de manera integrada con el relieve y la dinámica hidrológica del ambiente.

3.2.c. Indicadores biológicos: actividad y funcionalidad del suelo

Los indicadores biológicos integran procesos invisibles, pero determinantes para el funcionamiento del suelo.

+ La MO y el COS constituyen referencias de largo plazo, ya que reflejan la capacidad del sistema para sostener **procesos biológicos, almacenar carbono y mantener la funcionalidad del suelo.**

Incrementos en el COS suelen asociarse con una mayor estabilidad estructural, un mejor ciclo de nutrientes y una mayor resiliencia frente a eventos climáticos extremos.

Otros indicadores biológicos incluyen:

Carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana, vinculados a la actividad y tamaño de la comunidad microbiana del suelo.

Fauna edáfica, cuya presencia contribuye a la formación de poros y agregados.

Actividad enzimática y respiración del suelo, utilizadas como indicadores de actividad biológica y transformación de nutrientes.



De este modo, el diagnóstico deja de enfocarse únicamente en la deficiencia de un nutriente aislado para interpretar las interacciones y procesos que condicionan la respuesta del cultivo y la funcionalidad del sistema.



3.2.d. Indicadores productivos: expresión integrada del sistema

Los indicadores productivos representan la expresión final del funcionamiento físico, químico y biológico del suelo.



Variables como rendimiento, estabilidad interanual y eficiencia en el uso del agua permiten evaluar si las mejoras observadas en el suelo se traducen efectivamente en sistemas más eficientes y resilientes.

El análisis comparado entre ambientes y campañas permite determinar:

Si las mejoras en los indicadores edáficos se traducen en aumentos de productividad.

Qué sectores del lote presentan limitantes estructurales o funcionales.

Si es necesario ajustar las estrategias de manejo en determinadas zonas.

En este contexto, la combinación de indicadores químicos, físicos y biológicos con sensores de alta resolución, información topográfica e historial productivo posibilita avanzar desde un diagnóstico descriptivo hacia un diagnóstico orientado a la toma de decisiones y al manejo sitio-específico.

En definitiva, el suelo deja de entenderse como una variable estática y pasa a concebirse como un sistema dinámico y gestionable, cuyo funcionamiento puede mejorarse de manera progresiva, acumulativa y medible. En este enfoque, medir no implica únicamente generar datos, sino comprender las interacciones entre carbono, biodiversidad, estructura, agua y ciclado de nutrientes para orientar estrategias de manejo regenerativo (Figura 14).

Medir para conocer, conocer para crecer

Los datos son el puente hacia sistemas regenerativos

Figura 14: Integración de procesos y funciones clave del suelo en sistemas regenerativos. Elaboración propia.





Priorización de limitantes y definición de objetivos

Una vez realizado el diagnóstico inicial y definidos los principales indicadores de evaluación,



el siguiente paso consiste en identificar **cuáles son las limitantes que condicionan con mayor intensidad el funcionamiento del sistema y la capacidad del suelo para recuperarse.**

En la mayoría de los casos, la degradación no responde a un único factor, sino a la superposición de múltiples procesos físicos, químicos y biológicos que interactúan entre sí. Sin embargo, no todas las limitantes tienen el mismo impacto ni requieren la misma prioridad de intervención. Por este motivo, resulta fundamental **identificar cuáles son los procesos que restringen más fuertemente la productividad, la infiltración, el crecimiento radicular, el ciclado de nutrientes o la generación de biomasa.**

Entre las limitantes más frecuentes en sistemas agrícolas de Argentina se destacan:

- 1/ Baja cobertura del suelo y reducida generación de biomasa.
- 2/ Rotaciones simplificadas con escasa participación de gramíneas.
- 3/ Compactación superficial o subsuperficial.
- 4/ Baja infiltración y escasa capacidad de almacenamiento de agua.
- 5/ Pérdida o estancamiento del COS.
- 6/ Acidificación y desbalances nutricionales.
- 7/ Excesos hídricos recurrentes o problemas de drenaje.
- 8/ Restricciones asociadas al tránsito no controlado de maquinaria.

La correcta identificación de estas limitantes permite establecer prioridades de manejo y definir estrategias de intervención más eficientes. En muchos casos, ciertos problemas visibles en superficie representan en realidad la consecuencia de procesos más profundos vinculados a la pérdida de actividad biológica, la disminución del aporte de carbono o el deterioro estructural del suelo.

Por ejemplo, problemas recurrentes de anegamiento pueden estar asociados a procesos de compactación y pérdida de porosidad; mientras que respuestas limitadas a la fertilización pueden reflejar restricciones físicas o biológicas que impiden una adecuada exploración radicular y aprovechamiento de nutrientes.

A partir de este análisis, resulta posible definir objetivos de recuperación realistas y progresivos según distintos horizontes temporales.

En el corto plazo (1-2 años), los objetivos suelen orientarse a estabilizar el sistema y detener los procesos de degradación más activos, priorizando el incremento de la cobertura superficial, la reducción de

disturbios mecánicos, la mejora de la implantación y crecimiento radicular, la corrección de deficiencias nutricionales severas y el aumento en la generación de biomasa y residuos.

En el mediano plazo (3–5 años), el foco comienza a desplazarse hacia la recuperación funcional del sistema, buscando incrementar progresivamente el COS, mejorar la

estabilidad estructural, aumentar la infiltración y favorecer el desarrollo de redes biológicas más activas y diversas.

Finalmente, en horizontes de largo plazo (5–10 años), la recuperación se orienta hacia la consolidación de sistemas más resilientes, diversificados y biológicamente activos, integrando rotaciones más complejas, cultivos de servicio sistemáticos, manejo

por ambientes y estrategias orientadas a sostener balances positivos de carbono y mejorar la estabilidad productiva.

La Figura 15 ejemplifica la evolución esperada del COS durante las diferentes etapas del proceso de recuperación de suelos.

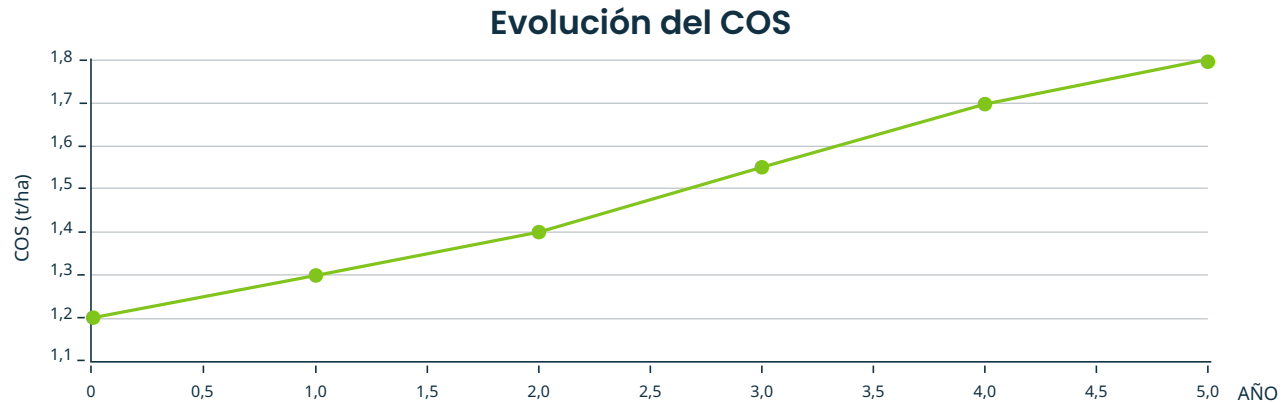


Figura 15: Evolución del contenido de COS (tn/ha) a 5 años.

3.4 Implementación del plan de recuperación

Una vez definidos los objetivos y priorizadas las principales limitantes del sistema,

+ el siguiente paso consiste en **diseñar e implementar un esquema de manejo** coherente con el proceso de recuperación planteado.

La implementación del plan no debe entenderse como la aplicación aislada de prácticas individuales, sino como la construcción progresiva de un sistema capaz de recuperar funciones físicas, químicas y biológicas de manera simultánea. En este sentido, la combinación y continuidad de las prácticas resulta más importante que intervenciones puntuales de corto plazo.

El diseño del plan debe contemplar aspectos como:

- 1/ La secuencia e intensidad de las rotaciones.
- 2/ La incorporación de gramíneas y CS.
- 3/ Las estrategias de fertilización y reposición de nutrientes.
- 4/ El manejo de la cobertura superficial.
- 5/ La reducción de disturbios mecánicos.
- 6/ El manejo del tránsito de maquinaria.
- 7/ La adaptación de prácticas según ambientes y limitantes específicas.

Debido a que muchos procesos de recuperación dependen de la acumulación progresiva de carbono y de la reconstrucción biológica del suelo, la continuidad temporal constituye uno de los factores más importantes para lograr mejoras sostenidas.



En este contexto, el manejo por ambientes y la utilización de herramientas de agricultura de precisión permiten adaptar las intervenciones a la variabilidad espacial del lote, incrementando la eficiencia en el uso de recursos y mejorando la capacidad de respuesta frente a distintas limitantes productivas.

La Figura 16 resume esquemáticamente las principales etapas del proceso de implementación de un plan de recuperación de suelos.

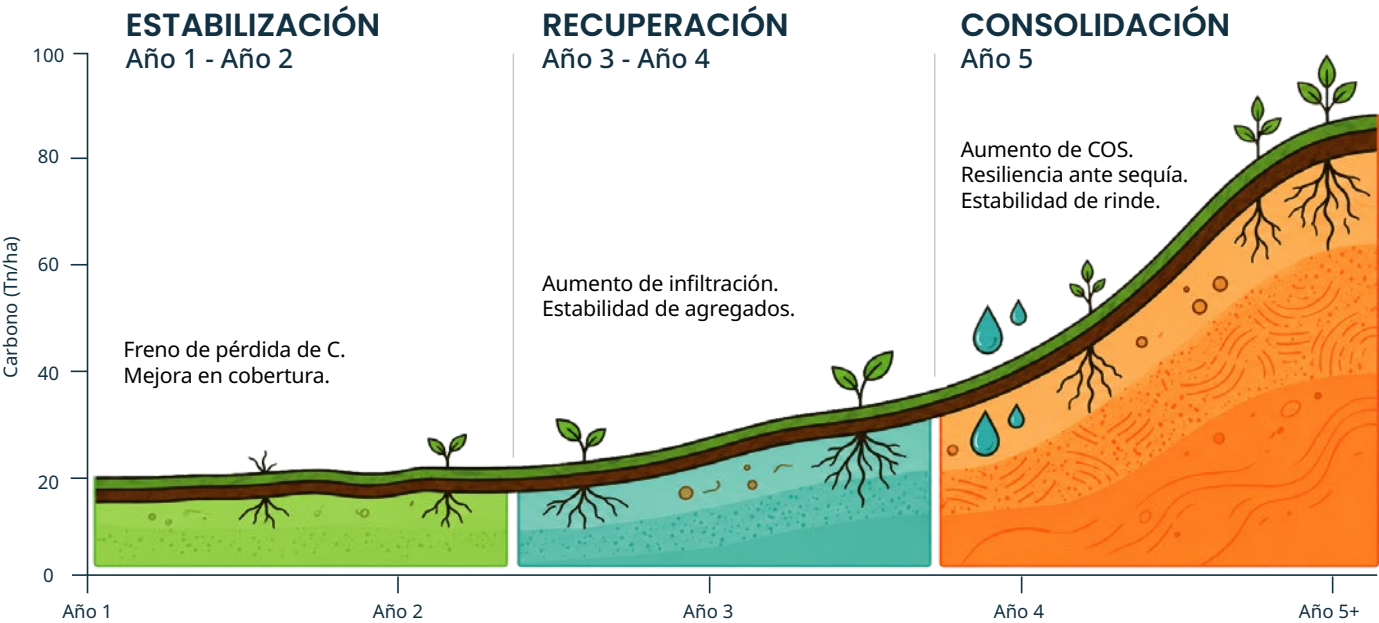


Figura 16: Ejemplo de evolución de indicadores como COS, pH, infiltración y RP, comparando una situación inicial y al finalizar el plan (3-5 años). Elaboración propia.

Indicador	Inicial	Mejorado (3-5 años)
COS (t/ha)	1.2	1.8
pH	5.5	6.2
Infiltración (mm/h)	10.0	18.0
RP (MPa)	3.0	2.0

3.5

Monitoreo y ajuste continuo

La recuperación del suelo constituye un proceso dinámico que requiere monitoreo permanente y capacidad de adaptación frente a cambios climáticos, productivos y económicos. Por este motivo, el seguimiento periódico de indicadores resulta fundamental para evaluar avances, detectar limitantes persistentes y ajustar estrategias de manejo a lo largo del tiempo.

Los indicadores productivos pueden evaluarse campaña a campaña, mientras que muchos indicadores físicos y químicos suelen monitorearse cada 1-2 años. En el caso de los indicadores biológicos y del COS, los cambios suelen expresarse en escalas temporales más largas, por lo que su evaluación generalmente se realiza cada 2-3 años.

La comparación entre la situación actual y la línea de base permite identificar tendencias de mejora, estancamiento o deterioro, facilitando la toma de decisiones y la redefinición de objetivos cuando resulta necesario.



En este enfoque, el monitoreo no debe interpretarse únicamente como una instancia de medición, sino como una herramienta de aprendizaje continuo orientada a comprender la evolución del sistema y acompañar el proceso de recuperación.

La Figura 17 presenta un ejemplo conceptual de evolución de indicadores físicos, químicos, biológicos y productivos durante distintas etapas del proceso de recuperación del suelo.



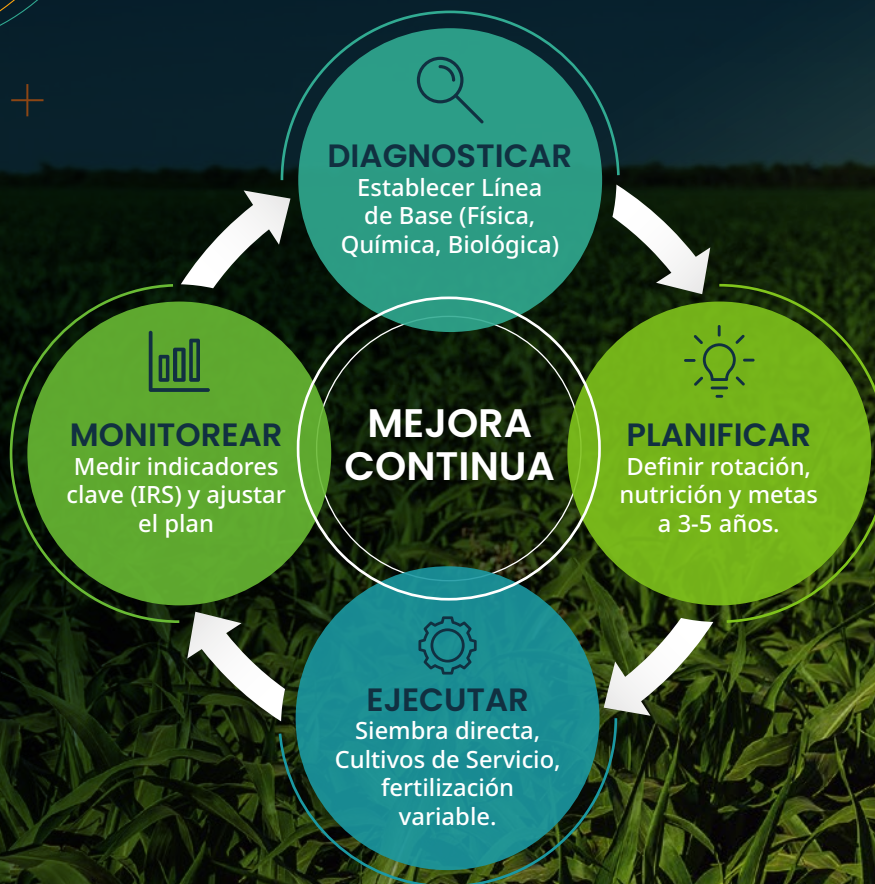


Figura 17: Esquema conceptual del proceso de implementación y seguimiento de un plan de recuperación de suelos. Elaboración propia.

4

Principios para la recuperación de suelos agrícolas

A partir de lo desarrollado en los capítulos anteriores, queda claro que la degradación del suelo es un proceso multicausal que solo puede revertirse mediante un enfoque integral de manejo. La recuperación no depende de prácticas aisladas ni de soluciones rápidas, sino de la combinación de estrategias que actúan de manera simultánea sobre los procesos físicos, químicos y biológicos del sistema.

En este contexto, las prácticas de manejo deben orientarse a reconstruir las funciones esenciales del suelo, favoreciendo el secuestro de carbono, la infiltración y almacenamiento de agua, el ciclado eficiente de nutrientes y el sostenimiento de redes biológicas activas.

Con el objetivo de simplificar y organizar las estrategias de manejo según su función y relevancia dentro del proceso de recuperación, en esta guía las prácticas se agruparon en tres categorías: prácticas estructurales, prácticas complementarias y prácticas para sistemas complejos.



Prácticas estructurales: prioritarias, factibles y de alto impacto

Sistema de Siembra Directa (SSD) sin remoción

El SSD sin remoción ni quema de residuos constituye el andamiaje físico sobre el que se apoyan las demás decisiones de manejo. Cuando se implementa junto con rotaciones diversas, la cobertura permanente protege los agregados frente al impacto de las lluvias y del viento, favorece la continuidad de poros y reduce la erosión, lo que se traduce en mayor infiltración y menor escurrimiento. El **Manual de Sistemas de Siembra Directa de AAPRESID**¹ ofrece lineamientos operativos, ajustes de maquinaria y criterios de manejo para sostener la cobertura durante todo el año.

Rotación con gramíneas

La recuperación del COS y de la estructura requiere incrementar el ingreso de carbono a través de raíces y rastrojos. En este sentido, aumentar la proporción de gramíneas dentro de la rotación (maíz, trigo, cebada, centeno) resulta decisivo: sus sistemas radiculares fibrosos generan bioporos que contribuyen a aliviar la compactación, incre-

mentan la rizodeposición (exudados, mucílagos y células desprendidas), estimulan la actividad microbiana y aportan elevados volúmenes de residuos. En conjunto, estos procesos favorecen la estabilidad de los agregados y la recuperación estructural del suelo.

Complementariamente, la diversificación de especies reduce riesgos productivos y promueve la complementariedad entre arquitecturas radiculares y ritmos de aporte de biomasa, fortaleciendo la biología del suelo y el ciclado de nutrientes.

Cultivos de Servicio (CS)

Otro principio fundamental consiste en mantener cobertura viva durante la mayor parte del año mediante CS. En ambientes templado-húmedos, los CS incrementan la cobertura superficial, contribuyen al control de malezas por competencia y efectos alelopáticos, mejoran la infiltración y pueden capturar nitratos residuales, reduciendo pérdidas por lixiviación. La **Red de Cultivos de Servicio de AAPRESID**² dispone de experiencias y protocolos de evaluación que facilitan

su adopción y seguimiento a escala local.

Nutrición balanceada

Finalmente, la nutrición balanceada resulta indispensable para sostener la productividad y acompañar la recuperación de las funciones del suelo. Reponer los nutrientes extraídos y corregir limitantes químicas permite evitar que deficiencias nutricionales frenen los procesos de reconstrucción física y biológica. En numerosos ambientes agrícolas, el fósforo disponible se encuentra por debajo de niveles críticos y la acidificación avanza progresivamente, afectando la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica.

En este contexto, el diagnóstico por ambientes, acompañado de muestreos representativos y estrategias de reposición plurianuales, permite sostener niveles adecuados de fósforo y bases, fundamentales para estabilizar rendimientos mientras se recupera el COS.

¹ <https://www.aapresid.org.ar/blog/manual-sistemas-siembra-directa>

² <https://www.aapresid.org.ar/sistema-chacras/redes/red-cultivos-servicios-aapresid-basf>

4.2

Prácticas complementarias: no reemplazan al manejo, lo complementan



Las prácticas complementarias pueden **mejorar la eficiencia y acelerar procesos de recuperación**, aunque sus efectos dependen de que exista una base sólida de manejo sustentada en cobertura permanente, rotaciones diversificadas, nutrición balanceada y reducción de disturbios.

Insumos biológicos

Los insumos biológicos (inoculantes, bioestimulantes, consorcios microbianos) pueden contribuir al ciclado de nutrientes y a la sanidad de plantas y suelos en determinados contextos productivos. La **Red Biológicos de AAPRESID**³ reúne experiencias y criterios orientados a su utilización responsable y estratégica.

Manejo integrado de plagas

De manera complementaria, el manejo integrado de plagas basado en umbrales de acción, rotación de modos de acción y buenas prácticas de aplicación, permite disminuir la presión de selección y preservar la eficacia de las herramientas de control. Los recursos desarrollados por la **Red de Manejo de Plagas (REM) de AAPRESID**⁴ constituyen una referencia técnica para la toma de decisiones basada en monitoreo y evidencia.



³ <https://www.aapresid.org.ar/sistema-chacras/redes/red-biologicos> | ⁴ <https://www.aapresid.org.ar/rem> | ⁵ <https://www.aapresid.org.ar/sistema-chacras/redes/red-salud-suelos>



Corredores biológicos

A escala de establecimiento, la incorporación de corredores biológicos y paisajes multifuncionales favorece la presencia de polinizadores y enemigos naturales, fortaleciendo servicios ecosistémicos que contribuyen a la estabilidad productiva (Syngenta, s.f.).

Enmiendas calcáreas

En ambientes con procesos de acidificación, la aplicación de enmiendas calcáreas puede mejorar la disponibilidad de fósforo y bases, disminuir la toxicidad por aluminio intercambiable y favorecer la reactivación biológica del suelo. Asimismo, cuando el diagnóstico lo justifique, el agregado de enmiendas orgánicas (como compost, guanos u otras fuentes locales) permite incorporar carbono y nutrientes, además de mejorar la estructura mediante el aporte de compuestos húmicos y fúlvicos.

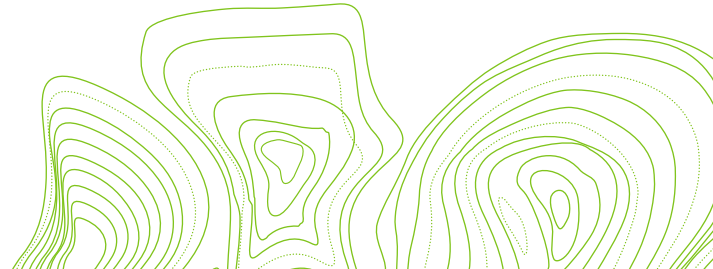
Figura 18: Paisajes multifuncionales que favorecen la diversidad biológica.
Fuente: Syngenta

Control de tránsito

Por otra parte, el control del tránsito mediante huellas definidas, ajuste de presión de inflado y reducción de pasadas contribuye a disminuir la compactación inducida por maquinaria. La **Red de Compactación Cero de AAPRESID**⁵ ofrece lineamientos y experiencias para avanzar progresivamente en este tipo de estrategias.

Manejo por ambientes

Finalmente, el manejo por ambientes, apoyado en tecnologías de aplicación variable de fertilizantes y correctores, permite ajustar las dosis según la oferta y demanda de cada unidad de manejo, incrementando la eficiencia agronómica, económica y edáfica.



4.3

Prácticas para sistemas complejos: mayor complejidad, alto potencial



En establecimientos con mayor capacidad organizativa y de inversión, **la integración agrícola-ganadera mediante el pastoreo controlado** de verdeos y CS puede acelerar el reciclaje de nutrientes, distribuir el ingreso de carbono en profundidad y diversificar los flujos de ingresos.

La **Chacra SIP de AAPRESID**⁶ documenta experiencias, diseños y métricas de impacto asociadas a estos sistemas integrados.

Figura 19: En establecimientos con mayor capacidad organizativa y de inversión, la integración agrícola-ganadera favorece el reciclaje de nutrientes y el ingreso de C en el suelo. Fuente: Syngenta.



⁶ <https://www.aapresid.org.ar/sistema-chacras/chacra/sistemas-integrados-produccion-agricola-ganaderos>

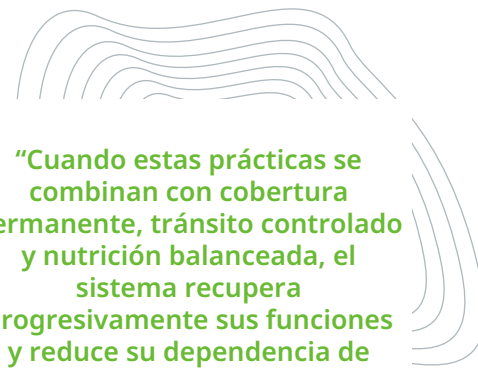
⁷ <https://www.aapresid.org.ar/sistema-chacras/chacra/valles-irrigados-norte-patagonico>



La **incorporación de componentes agroforestales** también aporta beneficios relevantes. Las raíces profundas exploran horizontes inferiores, contribuyen al reciclado de nutrientes y al balance de carbono, además de generar sombra y protección frente al viento.

Asimismo, en regiones con factibilidad hídrica y económica, **el riego** puede contribuir a estabilizar rendimientos, siempre que se gestione de manera compatible con la conservación de la estructura del suelo y la prevención de anegamientos. En este sentido, los aprendizajes de la **Chacra VINPA de AAPRESID**⁷ ofrecen referencias útiles para integrar el manejo del agua y del suelo en sistemas irrigados.

El principio que articula todas estas estrategias es común: **más fotosíntesis, más raíces y mayor tiempo de actividad biológica**. Incrementar la cantidad y diversidad de raíces activas a lo largo del año restituye el flujo de carbono hacia el suelo, alimenta la biota, favorece la agregación y mejora la continuidad de poros.



“Cuando estas prácticas se combinan con cobertura permanente, tránsito controlado y nutrición balanceada, el sistema recupera progresivamente sus funciones y reduce su dependencia de insumos para sostener la productividad”.

La recuperación del suelo no constituye un evento aislado, sino una trayectoria de mejora continua. Comienza con decisiones de manejo fundamentales y se consolida mediante el seguimiento sistemático de indicadores que permiten evidenciar, campaña tras campaña, la recuperación del suelo como principal capital natural del establecimiento.

La Figura 20 resume las principales prácticas recomendadas para la recuperación del suelo, sus características y algunos ejemplos de implementación.

Figura 20:

Prácticas recomendadas para la recuperación de suelos, características y ejemplos.

Elaboración propia.



“No hay soluciones mágicas sin la base estructural correcta”.

Tipo de Práctica	Características Principales	Ejemplos	Nivel de Complejidad
Prácticas para Sistemas Complejos	• Requieren mayor capacidad organizativa • Necesitan mayor inversión • Alto potencial de impacto • Integran múltiples componentes	• Integración agrícola-ganadera • Agroforestería • Sistemas de riego • Pastoreo controlado	• Avanzado
Prácticas Complementarias	• Apoyan las prácticas estructurales • Requieren diagnóstico previo • Efectos específicos según contexto • Mejoran la eficiencia del sistema	• Insumos biológicos • Manejo integrado de plagas • Corredores biológicos • Enmiendas calcáreas • Control de tránsito • Manejo por ambientes	• Intermedio
Prácticas Estructurales	• Prioritarias y de alto impacto • Base fundamental del sistema • Factibles de implementar • Resultados consistentes	• Sistema de Siembra Directa (SSD) sin remoción • Rotación con gramíneas • Cultivos de Servicio. • Nutrición balanceada	• Básico Fundamental



5

Recursos para acompañar el plan de recuperación

La recuperación del suelo requiere de herramientas que permitan medir, planificar, monitorear y ajustar las decisiones de manera continua. El objetivo de este capítulo es poner a disposición un conjunto de herramientas técnicas, metodológicas y recursos de información que faciliten la aplicación práctica de los conceptos desarrollados en esta guía.

5.1

Herramientas para el diagnóstico y monitoreo

5.1.a. Protocolos adaptados para la medición de COS

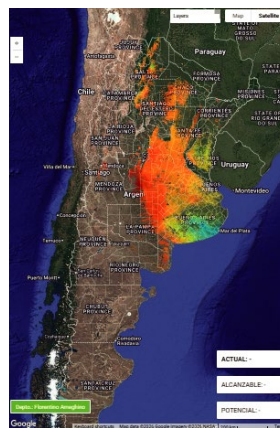
El protocolo desarrollado por Aapresid, junto con CREA y la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS) tiene como objetivo brindar una metodología unificada, práctica y de fácil adopción para la medición de las reservas COS bajo distintos usos de la tierra (agrícola, ganadero, forestal y silvopastoril) (Aapresid, 2024).



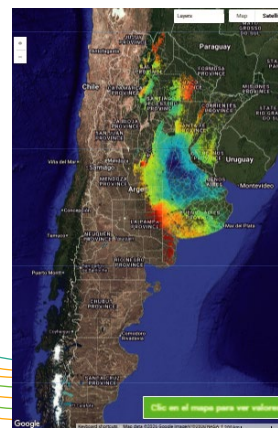
5.1.b. Mapas de niveles de COS y aportes de MS

Los mapas digitales de C desarrollados por Aapresid junto con Syngenta constituyen una herramienta técnica para diagnosticar y monitorear el estado del COS en sistemas productivos agrícolas. A partir de información georreferenciada, mediciones a

campo y modelización, permiten visualizar las reservas actuales de C, estimar su potencial según cada ambiente, cuantificar las brechas y conocer los aportes de MS necesarios para mantener o incrementar esos niveles, facilitando así la planificación, priorización de intervenciones y evaluación de avances en estrategias de recuperación de suelos (Aapresid, s.f.).



Carbono Actual



Aportes de materia seca necesarios

5.1.c. Sensores proximales de alta densidad (Veris MSP3)

Es un equipo de mapeo de suelos que permite realizar mediciones en movimiento, recolectando múltiples datos del suelo en un solo paso, identificando zonas de manejo, optimizando muestreos dirigidos, logrando una línea de base para recomendaciones de manejo. Permite mediciones de Conductividad Eléctrica (CE) en dos profundidades (0-30cm y 0-90cm), MO, pH del suelo, CIC, Mapeo de alta densidad de datos. Estas mediciones se realizan a velocidades de 8-15 km/h, 2.5 metros de ancho de trabajo, tomando muestras cada 1 segundo, georreferenciadas mediante GPS.



5.1.d. CoreScan

Sistema portátil de escaneo de suelos que permite el análisis detallado de muestras de suelo en tiempo real, con resultados inmediatos en campo. Otros beneficios importantes son la reducción de costos de laboratorio, la alta precisión en las medi-

ciones, la generación de datos consistentes y reproducibles y la integración con sistemas de mapeo. Los principales indicadores que mide son: Textura del suelo, MO, Color del suelo, Minerales, Carbonatos, Humedad.



5.2 Herramientas para la gestión



Cropwise
Protector



Cropwise
Sustainability



Cropwise
Imagery

5.2.a. Cropwise Protector⁸

Plataforma digital de Syngenta que ayuda en la toma de decisiones para el manejo de cultivos, especialmente en la protección contra plagas, enfermedades y malezas, que ofrece monitoreo y seguimiento de cultivos, recomendaciones de productos fitosanitarios y su uso eficiente, registro de aplicaciones y actividades, y alertas de condiciones climáticas y riesgos.

5.2.b. Cropwise Sustainability⁹

Herramienta de Syngenta muy útil para medir y mejorar la sostenibilidad en la agricultura. Permite el cálculo de huella de carbono, la evaluación de prácticas agrícolas sostenibles, el seguimiento de indicadores ambientales y la generación de reportes de sostenibilidad.

5.2.c. Cropwise Imagery¹⁰

Servicio de imágenes satelitales y análisis para agricultura de precisión, creado por Syngenta. Proporciona mapas de vigor de cultivos, detección temprana de problemas, zonificación de lotes, monitoreo del desarrollo del cultivo e índices de vegetación (NDVI).



⁸ <https://protector.cropwise.com/>

⁹ <https://sustainability.cropwise.com/>

¹⁰ <https://imagery.cropwise.com/>

Glosario

CE: Conductividad Eléctrica (dS/m).

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico.

COS: Carbono Orgánico del Suelo (tn/ha).

CS: Cultivos de Servicio.

MO: Materia Orgánica (%).

MS: Materia seca.

REM: Red de Manejo de Plagas.

RP: Resistencia a la Penetración (MPa).

SSD: Sistema de Siembra Directa.

Bibliografía

Aapresid. (2024). Informe técnico 2023–2024. Proyecto Red de Brechas de Carbono AAPRESID–INTA. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa.

Aapresid. (2024). Salud del suelo: la agricultura argentina necesita generar un 11% más de biomasa para incrementar el carbono orgánico del suelo. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa.

Aapresid. (2024). Sistemas de Siembra Directa: Manual de prácticas para una agricultura productiva y de regeneración. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. <https://www.aapresid.org.ar/blog/manual-sistemas-siembra-directa>

Aapresid. (2024). Protocolo adaptado para la medición de carbono orgánico del suelo. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. <https://www.aapresid.org.ar/blog/protocolo-adaptado-medicion-carbono-organico-suelo>

Aapresid. (2025). Más carbono, más rinde: la ecuación que puede resolverse con 4 prácticas. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa.

Aapresid. (2026). Carbono en agricultura: ¿cómo pasar de indicadores “políticamente correctos” a decisiones concretas y de impacto? Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa.

Aapresid (s.f.). Mapas de Carbono. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. <https://www.aapresid.org.ar/es/mapa-carbono>

Álvarez, R. (2023). La fertilización aumenta el carbono orgánico del suelo en la Pampa Argentina pero no mitiga el cambio climático. *Ciencia del Suelo*, 41(2), 238–260.

Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), 505–511.
Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2009). Crop residue removal impacts on soil productivity

and environmental quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(3), 139–163.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.

Casas, R. R., & Albarracín, G. (2015). El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. FECIC.

FAO. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

García, F. O., & González Sanjuan, M. F. (2013). Balance de nutrientes en los sistemas agrícolas de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 9, 7–14.

INTA. (2018). *Manejo y conservación de suelos y aguas en sistemas agrícolas*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

IPCC. (2019). *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*.

Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423–436.

Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.

Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., & Angelini, H. P. (2011). Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del Suelo*, 29(1), 29–37.

Subsecretaría de Ambiente. (2024). *Informe del estado del ambiente 2024*. <https://informe.ambiente.gob.ar/>

Syngenta. (s. f.). *Paisajes Multifuncionales* <https://www.syngenta.com.ar/paisajes-multifuncionales>

Taboada, M. A., & Álvarez, C. R. (2008). Fertilidad física de los suelos. En H. E. Echeverría & F. O. García (Eds.), *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos* (2.a ed., pp. 71–96). INTA.

Tullberg, J. N., Yule, D. F., & McGarry, D. (2007). Controlled traffic farming—From research to adoption in Australia. *Soil and Tillage Research*, 97(2), 272–281.

Anexo

Causas de Degradación	Consecuencias	
Secuencias de cultivos Simplificadas	• Reducción de la diversidad funcional del sistema • Menor aporte de carbono al suelo • Debilitamiento en la formación y estabilidad de agregados	• Disminución del COS • Reducción de la actividad biológica
Monocultivos	• Homogenización del ambiente edáfico • Simplificación del microbioma del suelo • Pérdida de complementariedad entre especies • Reducción en la eficiencia del ciclado de nutrientes	• Mayor dependencia de insumos • Menor eficiencia en el uso de agua y nutrientes
Baja Cobertura del Suelo	• Aumento de la mineralización de nutrientes • Mayor evaporación de agua • Reducción de la infiltración	• Exposición a procesos erosivos • Menor reposición de carbono
Labranza Inadecuada	• Mejoras estructurales solo temporarias • Mayor riesgo de erosión	• Formación de estructuras laminares • Densificación del suelo

Tabla 1: Causas de degradación de suelos y sus consecuencias. Elaboración propia.

Causas de Degradación	Consecuencias	
Gestión Inadecuada de Excesos Hídricos	• Anegamientos recurrentes • Limitación del intercambio gaseoso • Condiciones de anaerobiosis • Deterioro de la estructura del suelo	• Salinización secundaria • Sodificación • Pérdida de capacidad productiva
Tránsito no Controlado	• Compactación superficial y subsuperficial • Heterogeneidad física del lote • Formación de capas densificadas	• Restricción del crecimiento radicular • Alteración del movimiento de agua
Nutrición Desbalanceada	• Menor eficiencia en uso de fertilizantes • Declive progresivo de la fertilidad • Pérdida acelerada de COS • Reducción de la actividad biológica	• Menor calidad general del suelo • Reducción de productividad • Mayor susceptibilidad al estrés • Mayores costos por unidad de rendimiento



syngenta