

# Informe final publicable de proyecto

## Evaluación y rediseño de sistemas agrícolas en base a indicadores de sostenibilidad

Código de proyecto ANII: FSA\_1\_2018\_1\_151930

Fecha de cierre de proyecto: 01/04/2024

**ERNST BENECH, Oswaldo Ruben** (Responsable Técnico - Científico)

**ERNST GODOY, Fabricio** (Investigador)

**BAJSA VALVERDE, Natalia** (Investigador)

**BARRETO WAGNER, Patricia** (Investigador)

**FERNANDEZ CHILDS, Grisel Mariom** (Investigador)

**FERREIRA LOPEZ, Ana Lucia** (Investigador)

**FRANCO, Jorge** (Investigador)

**GARCÍA CARRIQUIRY, Isabel** (Investigador)

**MAZZILLI VANZINI, Sebastián Ramón** (Investigador)

**PÉREZ BIDEGAIN, Mario** (Investigador)

**PIÑEIRO GUERRA, Gervasio** (Investigador)

**RIZZO AYPHASSORHO, Gonzalo Darío** (Investigador)

**SALVO ALVAREZ, Lucía** (Investigador)

---

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE AGRONOMÍA (Institución Proponente) \\  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CULTURA. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS "CLEMENTE ESTABLE" \\  
ORGANIZACIONES SIN FINES DE LUCRO. ASOCIACIÓN URUGUAYA PRO SIEMBRA DIRECTA \\  
REDES NACIONALES. FEDERACIÓN URUGUAYA DE CENTROS REGIONALES DE EXPERIMENTACIÓN AGROPECUARIA \\  
FACULTAD DE AGRONOMÍA. FUNDACIÓN DR. EDUARDO ACEVEDO

## Resumen del proyecto

El crecimiento de la superficie agrícola en Uruguay se produjo sustituyendo las pasturas perennes en rotación con cultivos. El cambio ocurrió a nivel regional y dentro de cada predio, convirtiendo pequeñas parcelas de producción y manejo heterogéneo en grandes unidades, con sistemas de cultivos simples, manejados uniformemente. El proceso tiene fundamentos económicos, pero compromete la sostenibilidad de la producción en el mediano plazo. La predominancia de soja resultó de precios del grano, financiamiento, comercialización y costos favorables, pero generó impactos negativos en la calidad del suelo, mayor riesgo de erosión, más insumos (fertilizantes y agroquímicos), impactos ambientales negativos. Nos propusimos cuantificar estos efectos en kilos de producto (soja), de manera de que los actores lo incorporen en la toma de decisiones, rediseñando los sistemas de cultivo. La hipótesis es que el cambio en el uso del suelo implementado recientemente generó pérdida gradual de la calidad del suelo, cuantificable en los propios predios de los productores, y que se manifiesta en una también gradual pérdida de rendimiento. Utilizando registro de productores agrícolas de 8 años se identificó la existencia de 3 grandes grupos de sistemas de producción. Los que rotan cultivos con pasturas, los que producen solo cultivos, pero diversificados (incluyen maíz y sorgo rotando con soja), los que producen soja con alta frecuencia. Muestreando sitios representativos de cada grupo se cuantificó que este gradiente de uso del suelo se asocia a una "trayectoria de pérdida de calidad de suelo", cuantificable en cambios en propiedades del suelo. Continuar bajo agricultura con alta frecuencia de soja por más de 5 a 7 años implicó una pérdida de 320 kg de soja/ha/año. Implica que el rendimiento esperado de soja después de 10 años, es de 1400 kg/ha menos en el sistema de mayor frecuencia de soja.

**Ciencias Agrícolas / Agricultura, Silvicultura y Pesca / Agricultura / Sistemas de producción**

**Palabras clave: Intensificación sostenible / Diversificación / Rotaciones /**

### **Antecedentes, problema de investigación, objetivos y justificación.**

Intensificación sostenible es un concepto guía utilizado para diseñar un nuevo proceso de intensificación de la agricultura. Implica aumentar la producción de alimentos de la superficie actual bajo agricultura, implementando tecnologías que tengan un menor impacto ambiental y que no menoscaben nuestra capacidad de continuar produciendo alimentos en el futuro (Garnett et al., 2013). Resulta más amplio que la mirada estrecha que supone

intensificar la producción de un cultivo, por lo que tiene puntos de contacto con conceptos como los de "intensificación ecológica" (Bommarco et al., 2013, Tittonell, 2014), "sistemas agrícolas diversificados" (Kremen et al., 2012), y "agricultura climáticamente inteligente" (Campbell et al., 2014). En cualquiera de estas definiciones, analizadas y discutidas por estos autores, la construcción del camino de intensificación requiere de sistemas agrícolas diversificados, con adaptación local, planificación y sistemas de gobernanza que se sustenten en la información generada a nivel empírico por parte de los productores y empresas de servicios, y a nivel científico, por parte del sistema regional de investigación e innovación.

A nivel global, el incremento de la demanda de alimentos prevista para los próximos años debe ser logrado en la superficie agrícola actual, ya que la incorporación de nuevas áreas supone costos ambientales altos (Garnett y Godfray 2012). Esto genera conflicto entre objetivos que pueden ser total o parcialmente contrapuestos: incrementar la producción de la superficie actual, diversificar el sistema de producción, reducir el uso de insumos, aumentar su eficiencia de uso, producir lo que se requiere en el mercado mundial, mejorar la equidad social, incrementar la tasa de ganancia y el ingreso, reducir el impacto ambiental.

El cambio en el uso y manejo del suelo ocurrido en los últimos 20 años en el Este de las Pampas de América del Sur es un ejemplo de intensificación agrícola. Implicó sustituir un sistema de rotación compuesto de tres o cuatro años de cultivos anuales seguidos por tres o cuatro años con pasturas plurianuales compuestas por gramíneas y leguminosas perennes, todo bajo un sistema de no labranza permanente (Franzluebbers et al., 2014, Wingeyer et al., 2015). Considerando Uruguay, Argentina, Bolivia, Paraguay, y Estados del sur de Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, y Paraná), la superficie agrícola se incrementó en 6,2 millones ha, en un sistema dominado por soja, pero que incluye maíz y trigo en rotación como cultivos principales (63, 19 y 21 % de la superficie respectivamente) (FAOSTAT, 2016).

En Uruguay, la superficie ocupada por cultivos anuales incrementó exponencialmente desde menos de 350.000 ha en el 2002 a más de 1.500.000 ha en el 2011. El 70% ocurrió en la zona agrícola tradicional, a expensas del tiempo de la rotación ocupado por pasturas (DIEA, 2011).

La información local y regional muestra las ventajas de la rotación pasturas-cultivos cuando se evalúa su impacto sobre las propiedades físico químicas del suelo, el uso de agroquímicos, la estabilidad económica y productiva, la emisión de gases

causantes del efecto invernadero, y la actividad y composición de las comunidades microbianas (Díaz-Roselló 1992, Álvarez y Lavado 1998, Kennedy 1999, Díaz-Zorita et al., 2002, García-Préchac et al., 2004, Sasal et al., 2006, Aparicio y Costa 2007, Ernst y Siri-Prieto 2009, Perdomo et al., 2009, Salvo et al., 2010, Morón et al. 2012, Conceição et al., 2013, Ding et al., 2013, Mazzilli et al., 2014, 2015, Álvarez et al., 2014, Sasal et al., 2017). Lo que representa un cuestionamiento a la sostenibilidad del cambio implementado, cuya justificación es fundamentalmente económica. La penalización en rendimiento cuantificada por Ernst et al., (2016) para trigo, más el incremento necesario en fertilización nitrogenada, no justificó económicamente la inclusión de pasturas en la rotación para los rendimientos y producción de carne promedio registrados por productores CREA del período 2008-2016 (Ernst et al. 2018). Por tanto, si bien se logró mejorar los resultados económicos de los predios, la gestión de la agricultura no fue acompañada en todos los casos de medidas tendientes a mantener la sostenibilidad productiva y ambiental (Mazzilli, et al., 2018).

La estrategia seguida fue similar a la planteada por productores hortícolas para incrementar el ingreso: intensificar la producción aumentando la superficie sembrada en base a pocos (un) cultivos, ya que los sistemas de cultivos más diversos generaban menores ingresos. Mantenido esta estrategia en el tiempo, la degradación de los recursos se transformó en una limitante del rendimiento, requiriendo mayores ingresos de insumos al sistema, socavando la propia estrategia planteada (Dogliotti et al., 2014). Por tanto, el desarrollo de estrategias de intensificación sostenible necesita de indicadores de referencia, que guíen tanto el proceso de investigación como su implementación a nivel de los sistemas de producción comerciales. Un indicador provee de información para entender y manejar los sistemas en función de sus impactos, su performance ambiental y su resiliencia (Doran et al., 1996).

La evaluación de la sostenibilidad de un sistema de producción en base a indicadores permite analizar la tendencia que siguen los mismos y tomar decisiones en base a ellos, de manera de corregir las "no conformidades" y transitar hacia un objetivo predefinido. En Uruguay se han diseñado indicadores de sostenibilidad para sistemas característicos del reciente proceso de intensificación, es decir, empresas comerciales predominantemente agrícolas, de producción extensiva, gestionadas por productores ausentes, la mayoría de los cuales no son dueños de la tierra (Arbeletche et al., 2012).

En el proyecto "Sustentabilidad ambiental y económica en predios agrícola-ganaderos: un sistema de indicadores objetivos aplicable en el campo" (INIA\_FPTA 327), logró valorar de manera diferencial la sustentabilidad de 22 predios, pero no se cuantificó su impacto real sobre indicadores objetivamente determinados para validarlos como estrategia de diagnóstico, ni se evaluaron modificaciones al sistema de cultivo (SC) capaces de levantar las limitantes.

Para guiar el proceso de cambio tendiente a lograr sistemas sostenibles, se debe incorporar una visión del SC en su conjunto. Para ello, es necesario diferenciar entre la investigación agronómica, cuyo objetivo es aumentarla eficiencia en el uso de los recursos de un cultivo dado, y la investigación del sistema de cultivo, cuyo objetivo es aumentar la eficiencia del uso de una determinada calidad y cantidad de recursos físicos, considerando el arreglo y la distribución espacio-temporal de cultivos en como una variable. La investigación en sistemas de cultivo incorpora la interacción del ambiente con el manejo, buscando optimizar la rotación y/o secuencia de cultivos para una oferta de recursos específica. El enfoque supone identificar tales condiciones diferenciales de ambiente y manejo entre empresas sobre las cuales evaluar opciones de mejora, para lo cual resulta ventajoso realizar la mayor parte del trabajo en campo de productores (Zandstra 1979, 1981).

Estimar la magnitud de las brechas de rendimiento, así como identificar y jerarquizar las causas subyacentes de las mismas en predios reales, constituye uno de los mayores desafíos de la agronomía (Affholder et al., 2012; Lobell et al., 2009; van Ittersum et al., 2013), ya que tanto la gestión de cultivos como el ambiente son variables. Por ejemplo, un campo con alto rendimiento puede resultar de sembrar temprano con una variedad de alto potencial de producción, mientras que otro, con bajo rendimiento en un ambiente similar, podría resultar de siembra más tarde, con una variedad no acorde al ambiente y manejo ofrecido. ¿Cuál de las características de la gestión de cultivos es la responsable? Las variaciones en el rendimiento en la que se basa el diagnóstico no deben resultar únicamente de diferencias en el ambiente. Los cambios en la gestión de los sistemas de cultivo son insignificantes en comparación con los causados por grandes diferencias ambientales, tales como calidad de los suelos y precipitaciones. Por tanto, el área de estudio en la que se realiza el diagnóstico debe ser acotada, estableciendo regiones con ambientes similares.

En este contexto, la elección de los predios sobre los cuales trabajar es condicionante de los resultados. Doré et al., (1997) proponen que se base en 3 criterios: 1. variaciones ambientales; 2. variaciones en el manejo del cultivo; 3. antecedentes bibliográficos sobre la respuesta del cultivo a diferentes ambientes y manejos. El sistema de cultivo está definido por: i) un conjunto de variables que refieren al ambiente, definidas por el suelo, su capacidad de uso y el clima;

ii) las propiedades del ambiente que fueron modificadas por el sistema de cultivo aplicado en el tiempo, que pueden transformarse en factores limitantes o reductores del rendimiento, como estructura del suelo, fertilidad química y física, riesgo de aparición de factores reductores del rendimiento como la composición del enamezamiento, plagas y enfermedades respectivamente; iii) manejo específico del cultivo que se aplica. La construcción del rendimiento de un cultivo resulta de la interacción entre ellos. Por tanto, a nivel de cada predio, el diagnóstico y evaluación del cultivo deberá considerar estas

variables y sus relaciones, comparando alternativas para condiciones en que la oferta de clima y suelo son similares (criterio 1).

Esto ha motivado interés por desarrollar metodologías de investigación para diseñar y evaluar SC multi-objetivos, definidos como la incorporación de nuevas reglas de decisión para alcanzarlos (Blazy et al., 2009). Acordando con lo planteado por Doré et al. (1997) y Lobell et al. (2009), proponen como primer paso la selección de los predios, basada en la caracterización de recursos disponibles, manejo de los cultivos y objetivos de producción. Supone caracterizar la diversidad de SC en términos de su naturaleza técnica, el contexto en el que produce y la performance lograda. La identificación de "prototipos" se realiza identificando grupo de empresas homogéneas utilizando métodos estadísticos para definirlos (clusters, análisis de concordancia, componentes principales, y agrupamiento jerárquico). El segundo paso consiste en identificar el conjunto de factores restrictivos específicos de cada grupo identificado. El tercer paso se identifican un conjunto de opciones a evaluar para resolver las restricciones. Esto resulta de reuniones de grupos de discusión integrados por investigadores, asesores y productores que terminan generando un "prototipo a evaluar" para las restricciones de cada tipología identificada. En este punto, Vereijken (1997) distingue las soluciones de corto plazo, orientadas a levantar limitantes en el corto plazo de las soluciones de largo plazo. Las primeras buscan mejorar el resultado económico del sistema de cultivos incrementando el rendimiento de los cultivos que lo integran o reduciendo sus costos. Las segundas buscan mejorar los indicadores de la performance del sistema de cultivo, subordinando el resultado económico al logro de valores mínimos de indicadores de la gestión ambiental. Para esta segunda opción, la Red europea de equipos de investigación para la creación de prototipos de sistemas de cultivos integrados de agricultura (IAFS por su sigla en inglés), diseñó una propuesta metodológica para diseñar, evaluar, mejorar y diseminar prototipos de sistemas integrado de cultivos. Supone: i) definir y jerarquizar objetivos generales (6) subdivididos en objetivos específicos (20) que serán la base para evaluar los sistemas de cultivo actuales; ii) transformar los objetivos específicos priorizados (10) en parámetros multi-objetivos a ser cuantificados para evaluar el sistema; iii) diseñar un prototipo vinculando objetivos con tecnologías a aplicar para lograrlos; iv) implementar el prototipo en un predio piloto, testear y mejorar la propuesta hasta lograr los objetivos; v) diseminar el prototipo a nivel grupos pilotos locales y regionales en ese orden.

En este proyecto se aplican estos conceptos y estrategias para evaluar la sostenibilidad de los actuales sistemas agrícolas en empresas comerciales caracterizadas como "empresarios agrícolas-ganaderos grandes, y los que se integran dentro del grupo "Nuevos agricultores" (Arbeletchee et al., 2010). Su aporte diferencial resulta de: i) el camino seguido en la investigación, ya que la identificación de grupos de predios resultará de evaluar su sostenibilidad utilizando los indicadores propuestos por Mazzilli et al., (2018) para posteriormente, identificar el impacto que tiene el ambiente y sus interacciones con el SC sobre el resultado; ii) cuantificar en rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) el impacto de las alternativas de cambio de corto plazo (manejo de cultivo) y de mediano plazo (sistema de cultivo) que mejoren los indicadores del SC.

## **Metodología/Diseño del estudio**

El área de estudio abarca las regiones costeras centro-sur y oeste de Uruguay. La región tiene un clima subtropical húmedo con una temperatura diaria promedio temperatura de 17,5 °C durante todo el año, sujeta a importantes fluctuaciones estacionales.

La precipitación anual es de aproximadamente 1200 mm, con importantes caídas interanuales. Las condiciones climáticas permiten el doble cultivo. Se dispuso de una base de datos con registros de uso del suelo de 45 predios para el período 2014-2020. Los productores son miembros de las organizaciones socias del proyecto, la Federación Uruguaya de Grupos Regionales de Experimentación Agropecuaria (FUCREA) y la Asociación Uruguaya pro Siembra Directa (AUSID).

La base de datos se compone de 699 unidades de manejo, ocupando una superficie total de 12.699 hectáreas.

El trabajo se desarrolló en etapas:

1. Construcción de indicadores de uso del suelo para caracterizar los sistemas de cultivo (SC)
2. Identificación de grupos de productores con sistema de cultivos similares. Los grupos se identificaron utilizando análisis multivariado, Componentes Principales, Análisis Discriminante, agrupamientos jerárquicos.
3. Selección de sitios representativos de los SC en los que se determinaron propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo.
4. En cada sitio (60) se realizaron experimentos parcelarios para cuantificar la brecha de producción de soja asociada a eficiencia de uso de los recursos y disponibilidad de recursos.
5. Se propusieron cambios en el uso del suelo para levantar las limitantes del rendimiento asociadas al diseño del SC identificadas.

6. Se reiteró la metodología del punto 3 al finalizar el proyecto.

7. Monitoreo de la concentración y carga de nutrientes (P y N) en agua superficial que sale de una microcuenca que incluya uno de los predios seleccionados.

Propiedades del suelo determinadas

Potencial de mineralización de Nitrógeno: por el método de Waring and Bremner (1964). -

Materia Orgánica Particulada (MOP) y Materia Orgánica Asociada a la fracción Mineral (MOAM) (Cambardella y Elliot, 1992). -

Infiltración: mediante método propuesto por Porzig et al (2018).

- Resistencia a la penetración: hasta los 40cm de profundidad en suelo húmedo utilizando un penetrógrafo digital.

- Estabilidad de agregados: (Yoder , 1936)

- Densidad aparente: Método del anillo (Grossman &Reinsch, 2002).

- Ph en agua: utilizando una relación suelo:agua (v:v) de 1:2.5.

- Textura: mediante método Bouyucos para por lo menos cuatro profundidades, dependiendo la profundidad del perfil.

- Nitrógeno total: digestión de la muestra por vía húmeda (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+catalizadores) y posterior destilación Kjeldahl.

- P: medianteBray 1 (Bray y Kurtz, 1945)

- K intercambiable: extraído con una solución de acetato de amonio 1M y luego determinado por emisión atómica (espectrofotómetro de llama).

- Abundancia de actinobacterias: recuento en placa en diluciones seriadas (Leoni y Ghini, 2003). - Estimación de biomasa microbiana total: método de fumigación – extracción (Vance et al., 1987).

- Determinación de actividad microbiana: mediante respirometría (Anderson, 1985).

- Indicadores de toxicología de herbicidas:

- Microbioensayos estimando germinación y elongación de radículas en especies vegetales con alta sensibilidad a xenobióticos.

Metodología propuesta por Szmigielski (2008)

- Bioensayo bacteriano Microtox®, diseñado por StrategicDiagnostic Inc. (Azur Environmental) - Caracterización de los enmalezamientos (% de malezas resistentes y clasificadas según tipo de resistencia en el total), a efectos de tipificar los riesgos ecotoxicológicos y la sostenibilidad productiva de los distintos SC. 7.

Monitoreo de la concentración y carga de nutrientes (P y N) en agua superficial que sale de una microcuenca que incluya uno de los predios seleccionados.

Se seleccionaran dos microcuencas de similar superficie, una con uso de suelo agrícola situada en uno de los predio seleccionados y otra con un uso de suelo no agrícola (control). Se tomaron mensualmente muestras de agua en dos secciones del curso principal (cuenca alta y baja) de cada microcuenca. La muestra de agua (1L acidificada, 250 mL sin acidificar) se tomara en el centro del cauce y a la mitad de la profundidad máxima, en momentos de flujo uniforme. En cada una de estas muestras de agua se determinará:

- Fósforo total (PT): Digestión con persulfato de amonio y posterior determinación colorimétrica por la técnica de ácido ascórbico-molibdato (Pote and Daniel, 2000).

- Fósforo disuelto (DRP): Se filtra la muestra a través de una membrana porosa de 0,45 µm de diámetro de poro y posterior determinación colorimétrica por técnica de ácido ascórbico-molibdato (Pote and Daniel, 2000).

- Nitrógeno total (NT): Se realizará en alícuotas concentradas mediante digestión Kjeldhal (Bremmer y Mulvaney, 1982) y determinación volumétrica.

- Sólidos totales (ST): Secado de la muestra a 105°C hasta total evaporación (APHA, 2012) Se estimara el caudal de agua mediante método de flotador y sección transversal.

## Resultados, análisis y discusión

Sistemas de cultivos y propiedades del suelo asociadas

A partir de indicadores de uso del suelo se identificó la coexistencia a nivel comercial, de tres grandes sistemas de cultivo (SC), (Cuadro 1; Fig. 1), clasificados como: (I) ROT-PC, que mantienen el esquema productivo dominante hasta principios del siglo XXI con relaciones pastura/cultivo de renta cercanas a 1:1; (II) CC\_Soja, dominante en la actualidad, el cual se caracteriza por el monocultivo de soja en la fase agrícola de verano; (III) CC\_maíz, sistema de más reciente implementación, en el que,

manteniéndose en agricultura continua, rota de manera sistemática con especies de fotosíntesis C4 (principalmente maíz) al menos una vez cada cuatro años en sustitución de soja, incrementando la diversidad de los CSs que eliminaron la fase de pastura de la rotación.

Los SCs simples generaron pérdida en la calidad del suelo, que sugieren una "trayectoria" asociada a la diversidad de sus componentes, desde ROT-PC>CC\_maíz>CC\_soja. La superposición de las elipses de confianza para los sitios que integran cada SC, también sugiere que existen sitios bajo CC\_maíz cuyas propiedades actuales son tan buenas como bajo ROT-PC y en otros tan malas como CC\_soja (Fig. 2).

Aunque las principales diferencias en las estrategias de uso de la tierra están asociadas con la diversificación e integración de cultivos (Cuadro 2), los tres SCs exhiben un uso intensivo de la tierra, con menos del 10% de períodos de barbecho (en una escala bianual). Por lo tanto, la intensidad de uso del suelo (ISI) fue definido por la intensidad de uso agrícola (IAI). Bajo el actual marco legal nacional (Ley 19.355, art. 76), que penaliza el suelo bajo barbecho descubierto, el IAI proporciona más información que el ISI sobre la intensificación del uso del suelo. Por ejemplo, en nuestro estudio, la fase de cultivo anual de ROT-PC exhibió un IAI = 1,6, significativamente diferente de los SC bajo cultivo continuo (IAI de CC\_Soja = 1,4 y de CC\_maíz = 1,3). Comparando únicamente la fase de cultivo anual, ROT-PC tuvo más cultivos comerciales que los otros SCs. Interpretamos este IAI más alto como una estrategia de los productores para mitigar la pérdida de ingresos agrícolas generada durante la fase de pastura perenne.

Los indicadores de fertilidad del suelo, carbono orgánico del suelo (SOC), electro-conductividad (EC) y potasio intercambiable (K) respondieron a los cambios de uso de la tierra que describen los SCs. Dentro de los indicadores biológicos evaluados (Biomasa microbiana, heterótrofos, actinobacterias, respiración), no se detectaron diferencias claras entre los SC, pero sí correlación con la concentración de carbono en el suelo. El resultado más relevante es que la aplicación de glifosato afectó negativamente la actividad microbiana del suelo. Por tanto, es necesario evitar su aplicación innecesaria.

Dos resultados significativos de nuestro estudio son: i) que el beneficio de ROT-PC sobre la calidad del suelo se cuantificó en condiciones comerciales, a pesar de que se implementaron sistemas de CC que incluían un ISI alto como lo proponen las mejores recomendaciones de manejo actuales. ii) los sistemas de cultivo anual continuo diversificado (CC\_maíz) mantienen la calidad del suelo entre ROT-PC y CC\_Soja, incluyendo sitios con calidad de suelo similar a ROT-PC.

Interpretamos estas diferencias en la calidad del suelo, como la respuesta al grado de diversificación del sistema de cultivo, desde ROT-PC hasta CC\_Soja. Este concepto implica que existen "trayectoria del sistema de cultivo", que conducen a "trayectorias de calidad del suelo". Nuestros resultados proporcionan nueva evidencia sobre los beneficios de diversificar como herramienta para mejorar la sostenibilidad de los SCs, con un enfoque en valorar la calidad del suelo como recurso de producción. Las secuencias de cultivo que tienden a la simplificación, como resultado de la reducción de la diversidad de cultivos (Novelli et al., 2011) y la eliminación de pasturas perennes (Ernst et al., 2016), experimentan una disminución gradual en la calidad del suelo. Esta disminución está asociada con una capacidad reducida de suministro de nutrientes del suelo (Ernst et al., 2020) y utilización menos eficiente de los recursos (Foley et al., 2005). Por lo tanto, estos CS son menos estables y resilientes (Sanford et al., 2021) y más susceptibles a la variabilidad climática, lo que genera mayores problemas con malezas, plagas y enfermedades, una mayor dependencia de insumos y posibles impactos ambientales negativos (Nicholls et al., 2022).

La estrategia de investigación ejecutada permitió identificar diferentes SCs y asociar propiedades del suelo emergentes, pero no se logró predecir los SCs a partir de las propiedades del suelo (Fig. 1 y 2 cruces y elipses de confianza respectivamente).

La no concordancia puede atribuirse a una combinación de variables, que incluyen: i) diferencias en la producción del cultivo y retorno de biomasa de la secuencia de cultivo, que define el balance de carbono del sistema (Domínguez et al., 2009); ii) diferencias en la calidad de los residuos (p. ej., relación C/N) (Mazzilli et al., 2015) de una secuencia de cultivos específica en cada sitio, y iii) variabilidad especial en las propiedades del suelo (las muestras se tomaron en áreas pequeñas que representan cada potrero); iv) omitimos valores de referencia que pueden ayudarnos a interpretar las propiedades del suelo en un estudio topográfico; v) la falta de conocimiento sobre el uso de la tierra antes de 2010. Una comprensión más completa requeriría conocimiento de las propiedades iniciales del suelo y el uso histórico de la tierra. Esto ayudaría a discernir de qué CS se obtuvieron los resultados y proporcionaría información adicional.

#### Brecha de rendimiento de soja y sus componentes

La frontera de producción de soja estuvo determinada significativamente por la fecha de siembra, disponibilidad de agua durante el período crítico para definición de rendimiento (Water\_PC) y su interacción con la estrategia de fertilización. Dentro de las propiedades del suelo la compactación sub-superficial, conductividad eléctrica aparente y bases intercambiables (Cuadro 3).

El parámetro gamma fue significativamente diferente de cero ( $p < 0.05$ ), indicando que las variables de la función de ineficiencia afectaron significativamente el rendimiento actual de soja ( $Y_a$ ). El indicador de uso agrícola de suelo que modificó

significativamente el rendimiento de soja fue "años de agricultura continua corregido por frecuencia de soja en la fase agrícola (YCC\*SSbCF). También soja como cultivo antecesor fue significativo. Las menores ineficiencias se generaron bajo ROT\_PC y CC\_maíz.

Diferencias en la brecha explotable de rendimiento (YgExp) de soja de productores del litoral agrícola del Uruguay (3,1 Mg ha<sup>-1</sup>) se explican tanto por diferencias atribuibles a la disponibilidad de recursos (Brecha por recursos; YgRe = 1,8 Mg ha<sup>-1</sup>) como por la eficiencia con la que estos son utilizados (Brecha por eficiencia de uso, YgEf = 1,3 Mg ha<sup>-1</sup>) (Cuadro 4, Fig. 3).

No se encontró un efecto negativo significativo sobre el rendimiento de soja de los años de agricultura continua (YCC, Cuadro 4). Sin embargo, el efecto fue significativo al corregir YCC por la frecuencia de soja dentro de la fase agrícola (YCC\*SSbCF). La brecha de rendimiento atribuible a ineficiencias de uso de recursos se incrementaron con YCC\*SSbCF (Cuadro 4; Figura 4), resultando en pérdidas significativas en el rendimiento actual (Ya). Cuando el Sistema de cultivos perdió diversidad, tanto por no rotar con pasturas como por no rotar ( $p > 0.05$ ). La pérdida fue aditiva e independiente del también significativo efecto antecesor soja ( $p > 0.05$ ) (Cuadro 3).

La diversidad del CS es parcialmente responsable de los cambios en la YgExp de soja, lo que resultó de aumento en la YgEf. Los resultados permiten concluir que es posible evitar una reducción del rendimiento de soja a mediano plazo de hasta 1,4 Mg ha<sup>-1</sup> (de 3 a 9 YCC\*SSbCF) si se planifican de la manera correcta la rotación de cultivos de la fase agrícola. No es suficiente mantener una alta intensidad de uso del suelo y sembrar sin laboreo, sino que también es necesario aumentar la diversidad del CS mediante la inclusión de especies de fotosíntesis C4 y/o rotando con pasturas perennes. Cuando estos componentes no fueron incluidos en la rotación, se generó una trayectoria negativa en la calidad del suelo asociada a pérdida de servicios ecosistémicos de regulación y soporte que se tradujo en un incremento en las pérdidas por un uso ineficiente de los recursos.

En condiciones de secano, sembrar soja sobre soja (YCC\*SSbCF =  $8 \pm 1$ ) implicó una pérdida de rendimiento de 0,9 Mg ha<sup>-1</sup> al comparar con CSs que se encuentran en rotación (YCC\*SSbCF < 7). Si pasar de secano a riego genera una disminución en la YgEf de 1,1 Mg ha<sup>-1</sup>, entonces la planificación de la diversidad del CS es el principal espacio para incrementar el rendimiento previo a regar y, por ende, explica en gran medida la transición de Yinf (YgEf = 2,1 Mg ha<sup>-1</sup>) a Ymed (YgEf = 1,2 Mg ha<sup>-1</sup>). Para quienes ya riegan y realizan un correcto uso del suelo, entonces su foco debería estar en ajustar la estrategia de nutrición del cultivo.

Indicadores de sostenibilidad; metodología para el análisis de bases de datos.

El conjunto de técnicas estudiadas cumplió con el objetivo de proponer una metodología de estudio que se adapte a las bases de datos de la producción agropecuaria y similares, donde se pretenda generar nuevas hipótesis de investigación (desde la estadística exploratoria) o para probar hipótesis planteadas a través de la modelación. La dependencia de los resultados, incluyendo la validación de la metodología, respecto a los datos utilizados (dependientes de los datos) debe ser resaltada, puesto que se trata de un estudio empírico en lo que se relaciona con los resultados agronómicos. La metodología implica: (1) depuración de la información (que, en este caso, implicó una pérdida del 42 % de las observaciones), (2) utilización de dos medidas de distancia, las dos bien estudiadas en la literatura estadística, (3) utilización de un método jerárquico de agrupamiento apropiado y (4) pruebas estadísticas de razón de verosimilitud para la selección de los modelos de interpretación, particularmente en lo relacionado con la definición de los grupos como fijos o aleatorios que conducirá a extrapolaciones globales o por grupo.

#### Calidad del agua de una cuenca agrícola (CA) y una ganadera

Se seleccionaron dos microcuencas de la misma ecoregión, similares en superficie y jerarquía de sus arroyos, pero contrastantes en modalidades productivas.

- Cuenca Agrícola (57 km<sup>2</sup>): Cuenca Hidrográfica de Nivel 6 "Arroyo Sarandí", N°1669
- Cuenca Ganadera (42 km<sup>2</sup>): Cuenca Hidrográfica de Nivel 6 "Arroyo del Coronilla", N°1622

Se realizaron muestreos bimestrales de agua superficial durante el año 2021 en ambas cuencas. Se realizó un muestreo simple, colectando muestras de agua superficial de forma manual en un momento y lugar determinados para luego analizarlas de forma individual. Los parámetros medidos fueron Fosforo Total (PT), Fosforo disuelto (DRP), Nitrógeno Total (NT) y Sólidos Totales (ST). Los análisis de NT se encuentran retrasados debido a un ajuste de la técnica.

En ambas cuencas, las concentraciones de P superaron la normativa y muchas veces los valores objetivos propuestos a nivel nacional. En la CA, estas concentraciones presentaron un gradiente creciente desde la cabecera de la cuenca hasta su desembocadura, mientras que la CG se mantuvo constante en todo su recorrido.

La concentración de DRP presentó la misma tendencia que la concentración de PT, siendo la CA la que presentó los mayores valores (Figura 5). La concentración de DRP representó el 40% del PT en la CA, lo cual sugiere que la erosión fue la vía de mayor aporte de P a los cursos de agua, ya que el P llegó al agua en su mayoría asociado al movimiento de los sólidos (como P particulado). En cambio, en la CG la concentración de DRP representó el 48%, lo que sugiere que tanto la erosión, como el

escurrimiento superficial fueron fuentes de aporte difuso de P a los cursos.

Para revertir esta situación sería deseable implementar medidas que reduzcan el aporte difuso de nutrientes a los cursos de agua, por ejemplo la implementación de zonas buffers y la exclusión del ganado abrevando en los cursos de aguas.

## Conclusiones y recomendaciones

1. Sobre el problema: la estrategia de trabajo y metodología para el análisis de registros sobre el uso del suelo reciente permitió identificar sistemas de cultivos diferentes, implementados por los propios productores. Por tanto, los resultados no surgen de evaluar sistemas de cultivos pensados para resolver problemas, sino para cuantificar la existencia de los mismos en el marco de los sistemas que están implementados en la realidad. Se destaca que en los 10 años evaluados, ya se habían implementado los "Planes de uso y manejo responsable de los suelos", por lo que los resultados obtenidos no son el reflejo de defectos graves en el diseño, como largo períodos de suelo descubierto y alto riesgo de erosión. Bajo estas condiciones, se identificó la existencia de una trayectoria negativa de calidad de suelo asociada a la simplificación del sistema de cultivo (alta frecuencia de soja).

2. Sobre los impactos:

2.1 en rendimiento: logró cuantificar el impacto del diseño del sistema de cultivo sobre el rendimiento de soja, el cultivo menos sensible a la degradación del suelo. A diferencia de lo cuantificado para trigo, los años de agricultura no fue la variable de impacto, sino los años de agricultura continua ponderados por la frecuencia de soja dentro de ese periodo. Este indicador de uso del suelo de los sistemas de cultivo resultó útil, no solo para categorizar los predios, sino que sugiere que es posible alargar la fase agrícola del sistema siempre y cuando no se lo haga en base a monocultivo de soja. El resultado abre un espacio de trabajo para proyectos que busquen mejorar la rotación de cultivos anuales, incorporando opciones de cultivos anuales emergentes.

2.2 en el suelo: el indicador de calidad de suelos más sensible para diferencias el impacto de los sistemas de cultivo sobre la calidad del suelo fue su concentración superficial de carbono orgánico.

2.3 En el agua: comparando cuencas agrícolas con cuencas ganaderas, la concentración de fósforo en agua fue muy superior en la primera. Aun bajo sistemas de cultivos diseñados para cumplir las exigencias actuales para el su del suelo, aproximadamente el 50% llega como consecuencia de la erosión. Posiblemente sea el resultado de la alta concentración de fósforo en los primeros cm del suelo. Lo mismo para el 50% restante.

3. Sobre la metodología: se destacan dos puntos

3.1 se desarrolló un método para el análisis de bases de datos generadas a partir de registros de productores.

3.2 Por primera vez los resultados no son del análisis de unidades de manejo independientes, sino del conjunto de las unidades que conforman el sistema de cultivo.

4. Sobre la formación de recursos humanos. El proyecto permitió la realización de tesis de grado y posgrados (Maestrías), generando la posibilidad de que la formación se realice en el marco de los problemas reales a diagnosticar y resolver.

5. Limitantes: no se logró asociar de manera directa los sistemas de cultivos identificados con los indicadores de sostenibilidad propuestos para evaluarlos. Solo se identificó la que la estrategia de fertilización es la causa principal de los balances positivos (excesos) de nutrientes. El tema requiere de un estudio más detallado, que no logró realizarse dentro del período de ejecución del proyecto. Las bases de datos disponibles estaban incompletas, por lo que requiere de trabajo adicional para completarlas. El mismo está en marcha en el marco de una tesis de Maestría.



## Referencias bibliográficas

- Alvarez, C.R., Taboada, M.A., Perelman, D., Morrás, J.M., 2014. Topsoil structure in notilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Res.* 52, 533–542.
- Anderson J.P.E. 1985. Soil respiration. In: A.L. Page (ed) *Methods of soil analysis, part 2*, 2nd edn. Soil Science society of America, Madison, Wis. Pp 837-87.
- Aparicio, V., Acosta, J.L., 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 96, 155–165.
- Álvarez R, Lavado RS. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*, 83:127 – 141
- Arbeletche P., Macarena C., Paladino C. 2012. Análisis del agro-negocio como forma de gestión empresarial en América del Sur: el caso uruguayo. En línea. Disponible 13/9/2018. *Agrociencia Uruguay* 16 1:110-119 Disponible en :<http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/index.php/directorio/article/view/652/548>
- Arbeletche P., Ernst, O.R., Hoffman, E., 2010. La agricultura en Uruguay y su evolución. En: GarciaPrechac, F., Ernst, O. R., Arbeletche, P., PerezBidegain, M., Pritsch, C., Ferenczi, A., Rivas, M. *Intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural*. Universidad de la República. Comisión sectorial de investigación científica. Colección Art. 2.
- Affholder, F., Tittonell, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., Wery, J., 2012. Ad Hoc Modeling in Agronomy: What Have We Learned in the Last 15 Years? *Agronomy Journal* 104, 735-748.
- American Public Health Association (APHA) (2012) *Standard Methods for Examination of Water and Waste Water*. 22nd Edition, American Public Health Association Press, Washington DC. Método 2540 B. Total Solids Dried at 103-105°C.
- Blazy, J.M., Ozier-Lafontaine, H., Doré, T., Thomas, A., Wery, J., 2009. A methodological framework that accounts for farm diversity in the prototyping of crop management systems. Application to banana-based systems. *Agr. Syst.* 101, 30-41.
- Bommarco R, Kleijn D, Potts SG. 2013. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology and Evolution*, 28: 230 - 238.
- Conceição, P.C., Dieckow, J., Bayer, C., 2013. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. *Soil Tillage Res.* 129,40–47.
- Bremner J, Mulvaney C. Nitrogen-total. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR, eds. *Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. Madison, WI: Agronomy 9/2, American Society of Agronomy; 1982:595–624
- Bray RH, Kurtz LT. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, 59: 39 – 45
- Briggs, S. (2003). Command and control in natural resource management: Revisiting Holling and Meffe. *Ecological Management and Restoration*, 4 , 161–162.
- Brussaard, L., Caron, P., Campbell, B., Lipper, L., Mainka, S., Rabbinge, R., Babin, D., Pulleman, M., 2010. Reconciling biodiversity conservation and food security: scientific challenges for a new agriculture. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2, 34–42.
- Cambardella, C. A. and Elliot, E. T. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Campbell BM, Thornton P, Zougmore R, van Asten P, Lipper L. 2014. Sustainable intensification: What is its role in climate smart agriculture?. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8: 39 – 43.
- Cassman, K.G., 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 96, 5952–5959.
- Caviglia, O.P., Andrade, F.H. 2010. Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and Use Efficiency of Environmental Resources. *Am. J. Plant Sci. Biotech.*, 3: 1-8.
- Díaz-Rosello, R.M., 1992. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. (Organic matter evolution in crops and pastures rotations). *Revista. INIA-Uruguay Inv. Agr.* 1 (I), 103–110.
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G.A., Grove, J.H., 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 65, 1–18
- DIEA. 2011. (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). [En línea] Consultado junio 2018. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy>.
- Ding G-C., Piceno Y.M., Heuer H., Weinert N., Dohrmann A.B., Carrillo A., Andersen G.L., Castellanos T., Tebbe C.C., and Smalla K. (2013). Changes of soil bacterial diversity as a consequence of agricultural land use in a semi-arid ecosystem. *PLoS ONE* 8(3): e59497.
- Dogliotti S., Rodríguez D., López-Ridaura S., Tittonell P., Rossing W. A. H. 2014. Designing sustainable agricultural production systems for a changing world: Methods and applications. *Agricultural Systems* 126: 1-2.

- Dogliotti, S., Abedala, C., Aguerre, V., Albín, A., Alliaume, F., Alvarez, J., Bacigalupe, G. F., Barreto, M., Chiappe, M., Corral, J., Dieste, J. P., García de Souza, M. C., Guerra, S., Leoni, C., Malán, I., Mancassola, V., Pedemonte, A., Peluffo, S., Pombo, C., Salvo, G., Scarlato M., 2012. Desarrollo sostenible de sistemas de producción hortícolas y hortícola ganaderos familiares: una experiencia de co-innovación. Serie técnica FPTA N° 33. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Doran, J.W., Jones, A.J., 1996. Methods for Assessing Soil Quality. SSSA Special Publication Number 49. Soil Science Society of America, Inc, Madison, Wisconsin, USA.
- Doré, T., Sebillote, M., Meynard, J. M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agr. Syst.* 54 (2), 169-188.
- Ernst, O.R., Kemanian, A.R., Mazzilli, S.R., Cadenazzi, M., Dogliotti, S., 2016. Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity. *Field Crops Res.* 186, 107-116.
- Ernst, O. R., Dogliotti, S., Cadenazzi, M., Kemanian, A.R., 2018. Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield. *Field Crop Res.* 217, 180-187.
- Ernst, O., Siri-Prieto, G., 2009. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil Tillage Res.* 105 (2), 260-268.
- FAOSTAT. 2016. (Food and Agriculture Organization of United Nations Statistics) Agricultural Data: Crops and Livestock Primary and Processed. FAO, Rome. [En línea] Consultado junio 2018. Disponible en: <http://faostat.fao.org>.
- Foley, J., R. DeFries, G. Asner, C. Barford, G. Bonan, S. Carpenter, F. Chapin, M. Coe, G. Daily, H. Gibbs, J. Helkowski, T. Holloway, E. Howard, C. Kucharik, C. Monfreda, J. Patz, I. Prentice, N. Ramankutty, and P. Snyder. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309 (5734):570-574.
- Franzluebbers, A.J., Sawchik, J., Taboada, M.A., 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture and crop rotations in temperate North and South America. *Agric. Ecosyst. Environ.* 190, 18-26.
- García-Préchac, F., Ernst, O., Siri-Prieto, G., Terra, J.A., 2004. Integrating no-till into crop and pasture rotations in Uruguay. *Soil Tillage Res.* 77, 1-13.
- Garnett T, Appleby MC, Balmford A, Bateman IJ, Benton TG, Bloomer P, Burlingame B, Dawkins M, Dolan L, Fraser D. 2013. Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. *Science*, 341:33 - 34.
- Garnett, T., Godfray, C., 2012. Sustainable Intensification in Agriculture. Navigating a Course Through Competing Food System Priorities, Food Climate Research Network and the Oxford Martin Programme on the Future of Food. University of Oxford, UK.
- Grossman, R.B., Reinsch, T.S. 2002. Bulk density and linear extensibility. In: Dick, W.A (Ed), *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 201-228. Kennedy A.C. (1999). Bacterial diversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 74: 65-76.
- Kremen, C., Iles, A., Bacon, C. 2012. Diversified farming systems: an agroecological, systems alternative to modern industrial agriculture. *Ecology and Society* 17(4), 44.
- Leoni C., y Ghini R. (2003). Efeito do lodo de esgoto na indução de supressividade in vitro a *Phytophthora nicotianae* Fitopatologia Brasileira. 28: 67-75.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B., 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.*
- Masera, O., Astier, M., y López-Ridauro, S. (editores). (2000). *Sustentabilidad y Manejo de Recursos Naturales: El Marco de Evaluación*. México, DF: Mundi-Prensa, GIRA, UNAM, PUMA.
- Mazzilli S, Kemanian A, Ernst O, Jackson RB, Piñeiro G. 2015. Greater humification of belowground than above ground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, 85: 22 - 30.
- Mazzilli S, Kemanian A, Ernst O, Jackson RB, Piñeiro G. 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, 75: 273- 281.
- Mazzilli, S., Kemanian, A., Buffa, I., Bugarín, G., Ernst, O., 2018. Sustentabilidad ambiental y económica en predios agrícola-ganaderos: un sistema de indicadores objetivos aplicable en el campo. Serie FPTA N° 65. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Milestad, R., Dedieu, B., Darnhofer, I., Bellon, S., 2012. Farms and farmers facing change: The adaptive approach. En: Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, B. *Farming Systems Research into the 21st Century: the new dynamic*. Springer, London.
- Morón, A., Quincke, A., Molfino, J., Ibáñez, W., García, A., 2012. Soil quality assessment of Uruguayan agricultural soils. *Agrociencia Uruguay* 16, 135-146.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1982. Total carbon, organic, and organic matter. In: A.L. Page (Ed), *Methods of Soil Analysis, Part 2, Agronomy No.9*, Am. Soc. Agron., Madison, WI, pp. 539-579.
- Perdomo C, Irisarri P, Ernst O. 2009. Nitrous oxide emissions from an Uruguayan aridoll under different tillage and rotation treatments. *Nutr Cycl Agro ecosystem* 84:119-128.
- Porzig, E. L., Seavy, N. E., Owens, B. E., Gardali, T., 2018. Field evaluation of a simple infiltration test and its relationship with

bulk density and soil organic carbon in California rangelands. *Journal of Soil and Water Conservation* 73(2):200-206.

Pote DH, Daniel T. (2000). Analyzing for total phosphorus and total dissolved phosphorus in water samples. In: Pierzynski GM, ed. *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Water*. Citeseer: 94–97

Röling, N., 1997. The soft side of land: socio – economic sustainability of land use systems. *ITC Journal* 1997-3/4.

Salvo, L., Hernández, J., Ernst, O., 2010. Distribution of soil organic carbon in differentsize fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-tillsystems. *Soil Tillage Res.* 109, 116–122.

Sasal, M.C., Andriulo, A.E., Taboada, M.A., 2006. Soil porosity characteristics and watermovement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Tillage Res.* 87(1), 9–18.

Sasal, M.C., Boizard, H., Andriulo, A.E., Wilson, M.G., Léonard, J., 2017. Platy structuredevelopment under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and itsimpact on runoff. *Soil Tillage Res.* 117, 33–41.

Szmigielski, A. M., Schoenau, J.J., Irvine, A., Schilling, B., 2008. Evaluating a mustard root-length bioassay for predicting crop injury from soil residual flucarbazone. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 39: 413-420

Tittonell P. 2014. Ecological intensification of agriculture- sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8: 53 – 61.

Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D. (1987). An extraction method for measuringmicrobial biomass carbon. *Soil Biol. Biochem.* 19:703-707.

Van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonel, P., Hochmna, Z., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance:A review. *Field Crops Res.* 143,4–17.

Vereijken, P. 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy* 7, 235-250.

Waring, Bremner, 1964. Ammonium production in soil under water logged conditions as an index of nitrogen availability. *Natura (Landon)* 201, 951–952.

Wingeyer, A.B., Amado, T., Pérez-Bidegain, M., Studdert, G.A., Perdomo Varela, C.H., Garcia, F.O., Karlen, D.L., 2015. Soil quality impacts of current South American. *Sustainability* 7, 2213–2242.

Yoder, R.E., 1936. A direct method of aggregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. *Agron. J.*, 28: 337 - 351.

Zandstra, H. G., 1979. Cropping systems research for de asian rice farmer. Cropping Systems Program, The International Rice Research Institute, Manila, Philippines.

Zandstra, H. G., Price, E. C., Litsinger, J. A., Morris, R. A., 1981. A methodology for on-farm cropping systems research. Cropping Systems Program, The International Rice Research Institute, Ma

## Licenciamiento

Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional. (CC BY-NC-SA)