

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**LA CALIDAD DEL SUELO COMO DETERMINANTE DE LA BRECHA DE
PRODUCCIÓN EN SOJA**

por

**Silvina BARÁIBAR PEDERSEN
Daniela FREIRÍA MARMO
Gonzalo RIZZO AYPHASSORHO**

**TESIS presentada como uno
de los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2014**

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Guillermo Siri

Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Fecha: 17 de diciembre de 2014

Autores: -----

Silvina Baráibar Pedersen

Daniela Freiría Marmo

Gonzalo Darío Rizzo Ayphassorho

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional, afecto y motivación constante, durante el transcurso de toda la carrera. A todos ellos, infinitamente gracias!

Al Ing. Ag. Oswaldo Ernst por la dirección de la tesis y su constante dedicación.

A Ramiro Izaguirre y Wiert Wiertsema por su ayuda en el trabajo de campo.

Al personal de laboratorio de la E.E.M.A.C. y de biblioteca de Facultad de Agronomía.

A la Lic. Sully Toledo por su colaboración en la corrección de los aspectos formales de la tesis.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 RENDIMIENTO POTENCIAL Y ALCANZABLE.....	2
2.2 RENDIMIENTOS NACIONALES.....	2
2.3 LIMITANTES DEL RENDIMIENTO.....	3
2.3.1 <u>El agua como limitante del rendimiento</u>	4
2.3.2 <u>Nutrientes como limitante del rendimiento</u>	5
2.4.3 <u>Calidad del suelo como limitante del rendimiento</u>	7
2.4 INDICADORES DE LA CALIDAD DE SUELO.....	7
2.5 HIPÓTESIS DEL TRABAJO.....	9
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	10
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EXPERIMENTO.....	10
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS.....	10
3.3 MANEJO GENERAL DEL ENSAYO.....	12
3.4 DETERMINACIONES.....	13
3.4.1 <u>Determinaciones climáticas</u>	13
3.4.2 <u>Determinaciones en el suelo</u>	13
3.4.3 <u>Determinaciones en planta</u>	15
3.4.4 <u>Determinaciones a cosecha</u>	16
3.5 COMPILACIÓN DE DATOS.....	16
3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	16
3.6.1 <u>Análisis de varianza (ANAVA)</u>	16
3.6.2 <u>Análisis multivariado</u>	16
3.6.3 <u>Regresión lineal simple</u>	17
3.7 ESTUDIO DE CHACRAS.....	17
3.7.1 <u>Características generales y manejo</u>	17
3.7.2 <u>Análisis estadístico de chacras</u>	18
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	19
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	19
4.2 EFECTO DE LA HISTORIA DE MANEJO DEL SUELO SOBRE LA FERTILIDAD	19
4.2.1 <u>Propiedades químicas del suelo en respuesta al manejo diferencial del mismo, fertilizando cada cultivo con los criterios de fertilización actuales</u>	19
4.2.2 <u>Propiedades físicas</u>	23
4.2.3 <u>Propiedades biológicas</u>	23

4.3 NIVEL RESIDUAL DE NUTRIENTES A LA SIEMBRA DE SOJA.....	24
4.4 EFECTO DE LA HISTORIA DE MANEJO DEL SUELO Y LA FERTILIZACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO EN SOJA.....	25
4.4.1 <u>Análisis de varianza de los rendimientos en función de la historia de manejo del suelo</u>	25
4.4.2 <u>Respuesta de soja al manejo de la fertilización</u>	27
4.4.3 <u>Análisis de Componentes Principales (ACP)</u>	28
4.4.4 <u>Análisis de varianza de los CP en función de la historia de manejo del suelo</u>	30
4.4.5 <u>Índice de calidad del suelo (ICS)</u>	34
4.5 DATOS DE CHACRA.....	37
4.5.1 <u>Análisis de componentes principales</u>	37
4.5.2 <u>Construcción del índice de calidad de suelo</u>	38
4.6 PREGUNTAS SIN RESPONDER.....	40
5. <u>CONCLUSIONES</u>	41
6. <u>RESUMEN</u>	42
7. <u>SUMMARY</u>	43
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	44

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Descripción de los grupos de suelos CONEAT.....	10
2. Descripción del factor historia de manejo del suelo.....	11
3. Descripción de los distintos manejos de fertilización.....	12
4. Concentración de carbono orgánico en el suelo, fósforo disponible y potasio intercambiable según historia de manejo del suelo, previo a la siembra del cultivo de soja (antes de la fertilización).....	20
5. Concentración P0-20 (ppm), considerando una densidad aparente de 1,1 g/cm ³ de 0 a 5 cm y 1,3 g/cm ³ de 5 a 20 cm.....	20
6. Bases totales y cationes del suelo según la historia de manejo del suelo.....	21
7. Acidez del suelo según historia de manejo del suelo.....	22
8. Variables físicas según tratamientos de historia de manejo del suelo...	23
9. Potencial de mineralización de nitrógeno según tratamientos de historia de manejo del suelo.....	24
10. Nivel de nutrientes en el suelo según estrato a la siembra del cultivo de soja, para los distintos manejos de fertilización realizados en el cultivo de trigo previo.....	24
11. Análisis de componentes principales con las variables: K0-5, K5-20, P0-5, P5-20, COS0-5, COS5-20, INF-2-DR, pH-KCl, Ca, Mg, Rp-m y Rp-20/m.....	29
12. Correlación con las variables originales.....	29
13. Análisis de varianza de los componentes principales según historia de manejo del suelo.....	30
14. ANAVA del índice de calidad de suelo según historia de manejo del suelo	34
15. Análisis de componentes principales con las variables: Na, Mg, Ca, pH-KCl, COS0-20, CE, CIC, Rp-m, Rp-20mm y Rp-20/m.....	37
16. Correlación con las variables originales.....	37
17. Índice de calidad de suelo para cada chacra.....	38
Figura No.	
1. Representación de la medición de infiltración en el campo.....	14
2. Medición de la conductividad hidráulica en el campo utilizando el infiltrómetro mini disco.....	15
3. Precipitaciones decádicas (mm) durante el ciclo del cultivo (nov-13 a abr-14).....	19

4. Rendimiento medio (kg/ha) según historia de manejo del suelo.....	26
5. Peso de 100 granos según historia de manejo del suelo, corregido por la covariable número de plantas	27
6. Rendimiento (kg/ha) de soja en función de los manejos de fertilización.....	28
7. Biplot de componentes 1 y 2 del Análisis de Componentes Principales.....	31
8. Biplot de componentes 1 y 3 del Análisis de Componentes Principales.....	32
9. Biplot de componentes 1 y 4 del Análisis de Componentes Principales.....	32
10. Biplot de componentes 2 y 3 del Análisis de Componentes Principales.....	33
11. Biplot de componentes 2 y 4 del Análisis de Componentes Principales.....	33
12. Biplot de componentes 3 y 4 del Análisis de Componentes Principales.....	34
13. Regresión lineal entre Rendimiento de soja e índice de calidad de suelo.....	35
14. Rendimientos en función del índice de calidad del suelo.....	39

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura uruguaya ha tenido un gran crecimiento en la última década, siendo el principal responsable de este aumento el cultivo de soja, el cual pasó de 79 mil de hectáreas sembrada en la zafra 2002/03 a 1.050 mil hectáreas en la zafra 2012/13 (MGAP. DIEA 2006, 2014). Esta expansión se caracteriza por la generalización de la siembra directa, la utilización de cultivos transgénicos, la intensificación del uso del suelo y una alta incorporación de tecnologías en los sistemas productivos. El incremento del área de soja se ha basado en la intensificación de la zona tradicionalmente agrícola y expansión hacia zonas marginales (Terra et al., 2010).

Las limitaciones para incrementar la superficie cultivada determinan que la obtención de mayores producciones deban ser alcanzadas maximizando los rendimientos por unidad de superficie (Salvagiotti, 2009).

Existe una brecha de producción entre el rendimiento alcanzable de soja en Uruguay y el obtenido a nivel comercial. Para una región particular habrá un rango de brechas de producción determinadas por el ambiente (Manlla y Salvagiotti, 2011). La comparación de estos valores con el promedio nacional brinda una idea acerca de la brecha de rendimientos posible de ser explotada (Salvagiotti, 2009).

Conocer los factores limitantes del rendimiento y la magnitud en que cada uno influye sobre el mismo, es fundamental para implementar medidas de manejo tendientes a acortar la brecha de producción existente.

En este contexto, el objetivo de este estudio es evaluar el efecto de la calidad del suelo como determinante de la brecha existente entre el rendimiento actual y el alcanzable cuando no existen limitantes en el aporte de nutrientes. Para esto se emplean indicadores de calidad de suelo, determinados por su historia de manejo, y se los relaciona con el rendimiento de soja en secano y sin limitantes hídricas ni nutricionales. Además, determinar un índice de calidad de suelo para discriminar suelos con limitantes para la producción de soja de segunda que no puedan ser levantadas por un manejo de la fertilización.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 RENDIMIENTO POTENCIAL Y ALCANZABLE

El rendimiento potencial (RP) se define como el rendimiento obtenido de un genotipo que crece sin limitantes hídricas y nutricionales, libre de malezas, plagas y enfermedades, bajo la implementación de las buenas prácticas agrícolas (van Ittersum y Rabbinge, 1997). Es decir, los rendimientos estarán solo limitados por la radiación y el régimen térmico.

El rendimiento máximo alcanzable en secano (RMAs) es aquel logrado por un cultivo que crece sin limitantes nutricionales y utilizando la mejor combinación de insumos y tecnología, pero limitado por las precipitaciones de la zona (Lobell et al., 2009). Este rendimiento es el obtenido por los productores que invierten y toman riesgo (Fischer, 2010).

El rendimiento alcanzable (RA) es el obtenido con las prácticas agrícolas actualmente recomendadas y con las limitaciones abióticas particulares de cada situación, pero donde los factores reductores (plagas, enfermedades y malezas) han sido controlados (Salvagiotti, 2009).

La diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento alcanzable define una brecha que debe ser explorada para cuantificar los factores que la determinan, y con ello ajustar prácticas de manejo que permitan aumentar la producción nacional.

2.2 RENDIMIENTOS NACIONALES

Berger (2013), estimó el rendimiento potencial de soja para la serie de años comprendida entre 1980 a 2012 en condiciones de INIA La Estanzuela, utilizando el modelo de simulación Soysim. Se estimó que el RP está en torno a 4.500 kg/há, con una variabilidad interanual del 10%. Estos resultados corresponden a un cultivar de GM 5.5, emergido el 15 de noviembre, ubicado en INIA LE.

En tanto, Bidegain (2012), trabajando con el modelo de simulación de cultivos CROPSYST para los años comprendidos entre 2004 y 2011 en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Paysandú, estimó rendimientos potenciales del cultivo de soja que variaron entre 4.138 y 8.329 kg/ha, con un promedio de 6.164 kg/ha. En el estudio utilizó datos climáticos correspondientes a cada zafra, la fecha de siembra y fenología de una serie de experimentos y

los datos del suelo (profundidad, textura, materia orgánica y densidad aparente) de cada situación. La variación en los rendimientos potenciales entre años fue determinada por la radiación acumulada durante todo el ciclo del cultivo ($R^2=0,67$). La misma presentó una alta variabilidad, siendo los valores máximos acumulados el doble aproximadamente de los valores mínimos. Esta variación se debe a las diferencias de radiación solar incidente entre años, y a la duración de los ciclos de los diferentes cultivares evaluados. Otro factor que afecta el rendimiento potencial es la temperatura, ya que determina variaciones en el largo del ciclo del cultivo y por ende cambios en la acumulación de radiación durante el mismo. Sin embargo, en este estudio fue el factor con menor variación.

El rendimiento medio actual para Uruguay de la serie 2005/06 a 2012/13 fue 2.068 kg/ha, con un mínimo y máximo de 1.673 y 2.634 kg/ha en la zafra 2007/08 y 2012/13 respectivamente (MGAP. DIEA, 2013). Esto demuestra que hay una brecha entre los rendimientos potenciales y actuales, que evidencia la existencia de factores limitantes de estos últimos.

2.3 LIMITANTES DEL RENDIMIENTO

Durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos para grano se presenta un conjunto de limitantes que impiden la obtención de los rendimientos potenciales (Giménez y García, 2011).

Las propiedades del suelo (físicas y químicas) en interacción con las variables climáticas (disponibilidad de radiación y agua, así como también de los diferentes regímenes térmicos) determinan diferentes ambientes para el cultivo de soja (Salvagiotti et al., 2010).

Para un mismo manejo, la variabilidad temporal es el principal factor determinante del rendimiento de soja. El efecto año ha demostrado tener un mayor impacto que el efecto de la rotación de cultivos, el manejo de suelo, y los factores edáficos y topográficos (Terra et al., 2010).

Para las condiciones de Uruguay, Otaño y Zarucki (2010), encontraron en uno de sus experimentos que los factores edáficos fueron los más correlacionados con los rendimientos de soja, siendo la conductividad aparente (CEa) el que más efecto tuvo, ya sea positiva o negativamente según el estrato evaluado.

2.3.1 El agua como limitante del rendimiento

La mayor parte de la variabilidad del rendimiento entre años y sitios en cultivos de verano, está asociada a la oferta de agua. Esta está determinada por el nivel inicial en el suelo, los aportes de las precipitaciones (PP), la proporción de éstas que es efectivamente retenida en el perfil y la topografía (Kantolic 2003, Terra et al. 2010).

Las necesidades de agua de los cultivos son variables y corresponden a la evapotranspiración (ET) que presentan en el ambiente en el que se desarrollan y a la aplicación de la tecnología utilizada en cada situación productiva (Pereira y Alves, citados por Giménez y García, 2011). Agorio et al., citados por Giménez y García (2011), concluyeron que en la mayoría de las situaciones estudiadas es esperable, y con alta frecuencia, la ocurrencia de deficiencias de agua en verano, por ende, pérdidas de rendimiento que establecen una brecha explicada por agua limitante.

La zona agrícola del litoral oeste en nuestro país presenta como principal limitante para la producción de cultivos de verano una baja capacidad de almacenar agua en los suelos. La mayoría presenta una capacidad de almacenaje de agua útil (CAAD) que varía entre 80 y 160 mm (Molfino y Califra, 2001). Dada la escasa CAAD de los suelos, es notoria la elevada dependencia de las recargas hídricas para lograr un abastecimiento ajustado a las demandas de los cultivos.

Giménez (2014) en su estudio realizado en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Paysandú, cuantificó pérdidas de grano en soja entre 44 y 50% debidas a deficiencias hídricas durante el período crítico (R4-R6). La reducción del rendimiento por deficiencias hídricas en las etapas no críticas, previas al PC, fueron del 23%.

Por su parte, Bidegain (2012) determinó que precipitaciones menores a los 100 mm ocurridos durante el período R3-R6 determinan rendimientos reales menores al 50% del potencial, y precipitaciones mayores a los 300 mm determinan rendimientos reales mayores al 70% del potencial. Para estos casos hay un doble efecto, ya que a menores precipitaciones, menores rendimientos reales y mayor rendimiento potencial, consecuencia de la mayor radiación interceptada. El límite de precipitaciones acumuladas durante dicho periodo para alcanzar rendimientos promedios de 4473 kg/ha fue de 290mm. Los resultados indican que los mayores rendimientos estuvieron asociados a disponibilidades hídricas mayores a 40% durante el período desde siembra a R3 y mayores al 60% durante el periodo R3-R6.

Resultados similares obtuvo Andriani (2002) en Santa Fé, Argentina, donde determinó que el periodo de mayor susceptibilidad fue el comprendido entre R5-R7, donde deficiencias hídricas severas pueden producir pérdidas en rendimientos del 40% o más. Deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50% de agua útil en el suelo), en el periodo emergencia a floración (E-R1) no producen reducciones en el rendimiento. Sin embargo, restricciones mayores, podrían producir reducciones del orden del 10%. En el periodo R1-R5, restricciones medias pueden producir reducciones en el rendimiento del orden del 10% y deficiencias severas un 20% o más.

2.3.2 Nutrientes como limitante del rendimiento

Los cultivos requieren nutrientes, siendo los principales nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y azufre (S), elementos químicos básicos en la nutrición vegetal. La baja capacidad de los suelos de aportar las cantidades requeridas por los cultivos, determina la necesidad de aplicación de fertilizantes para levantar esta limitante del rendimiento, por ende, disminuir las brechas de rendimiento existentes.

Otaño y Zarucki (2010), observaron que con la fertilización se podría estar eliminando un factor de variación del rendimiento. Esto fue concluido a partir de un ensayo realizado en el departamento de Soriano, durante la zafra 2007/08, en soja de primera sobre una cobertura de Raigrás, con 4 niveles de fertilización (7-40-0-5, a dosis de 0, 95, 190 y 285 kg/ha). El rendimiento del testigo fue un 12% inferior al resto, no existiendo diferencias entre los niveles de fertilización restantes. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas de rendimiento entre los tratamientos impuestos en soja de primera sobre una pradera vieja, fertilizada con 4 niveles de fertilización (10-50-0-1, a dosis de 0, 60, 120, 180 kg/ha). La ausencia de respuesta en éste sitio podría estar relacionado a los mayores niveles iniciales de P (8 ppm vs 6 ppm del ensayo anterior), sumado a la historia de largos períodos de praderas que pueden determinar condiciones favorables para la absorción de P (estructura, actividad de microorganismos, etc).

Otro ensayo realizado entre las zafras 1998/99 y 2001/02 en Concepción del Uruguay sobre suelos Vertisoles evaluó la respuesta a la fertilización fosfatada. Los tratamientos aplicados fueron: Testigo, 10, 20 y 30 kg de P/ha aplicados como superfosfato triple de calcio al momento de la siembra. El rango de contenido de P en el suelo fue de 6,5 a 15,6 ppm de P Bray 1. El rendimiento del cultivo osciló entre 1670 y 3870 kg/ha. La respuesta a la fertilización fosfatada varió desde 130 a 480 kg/ha, lo cual significó entre 10 a 19 % de incremento (Arias y De Battista, 2003).

Con respecto al potasio (K), en un ensayo realizado por Bautes et al. (2010) durante las zafas 2007, 2008 y 2009 ubicado en suelos de la Unidad Cuchilla de Corralito, Unidad Villa de Soriano, Bequeló y Risso, se observó respuesta a la aplicación de K, en suelos que presentaban entre 0.18 a 0.37 meq/100g de K intercambiable, tanto en cultivos de invierno como de verano. En algunos suelos también se observó respuesta a la aplicación de K al cultivo anterior.

Barbazán et al. (2011), en su estudio encontraron que el nivel crítico, usando un 90% de rendimiento relativo, fue de 0,34 meq de K/100g de suelo. En este mismo estudio, encontraron que en algunos sitios, cuyo análisis de suelo indicaba niveles bajos de K, no hubo respuesta a la fertilización. Por otro lado, en algunas situaciones hubo respuesta al agregado de K aún cuando el dato del análisis de suelo era alto.

En cuanto al azufre (S), se observó respuesta a la fertilización en cultivos de soja de primera con aplicaciones directas. Sobre un total de 142 ensayos realizados por diferentes autores en diversos sitios de Argentina, 57 ensayos mostraron respuestas significativas a S (40%), variando entre 300 y 800 kg/ha según el sitio. Las mismas fueron observadas principalmente en suelos degradados, con muchos años de agricultura continua (especialmente soja), con historia de cultivos de alta producción con fertilización nitrogenada y fosfatada, y en suelos arenosos de bajo contenido de MO (García, 2005).

Otra red de 28 ensayos efectuados por el Proyecto Fertilizar del INTA en la Región Pampeana muestra que en el 21% de los casos la soja exhibió una respuesta del orden de 200 kg de grano ha⁻¹, por el agregado de 15 kg de S (González, 2006).

Para algunos nutrientes, la fertilización del doble cultivo trigo/soja constituye un manejo posible a ser realizado. La Red de Nutrición de los CREA Sur de Santa Fe para determinar el efecto residual de la fertilización con P y S en soja, en el 2001/02 y 2004/05 evaluaron cinco sitios que recibieron los mismos tratamientos de fertilización desde el año 2000. Las diferencias entre tratamientos fueron de 218 kg/ha y 633 kg/ha para 2001/02 y 2004/05, respectivamente. Las mayores diferencias entre tratamientos en 2004/05 que en 2001/02, más allá de las diferencias en condiciones climáticas entre zafas, indicarían que la soja estaría respondiendo a la “acumulación” de fertilidad (García, 2005).

A nivel nacional, sin embargo, Hoffman y Ernst (2007) afirman que aunque exista residualidad, no es garantía de que el P disponible en suelo a la

siembra de un cultivo de segunda asegure siempre niveles de suficiencia, aun cuando el P agregado al cultivo de invierno previo esté por encima de sus necesidades y contemple a ambos cultivos.

2.3.3 Calidad del suelo como limitante del rendimiento

Varios autores han determinado que la variabilidad del rendimiento de los cultivos, incluyendo la soja, se explica, en parte, por la variabilidad en los factores edáficos.

Jiang y Thelen (2004), Terra et al. (2010), son coincidentes en que, en promedio, los atributos edáficos y topográficos explican el 54% de la variación de rendimiento de los cultivos. Terra et al. (2010) determinaron que la elevación en el terreno y la conductividad eléctrica (CE) fueron las variables más correlacionadas con el rendimiento.

Por su parte, los factores edáficos y topográficos explicaron aprox. 40% de la variación de rendimiento de maíz y soja en 8 chacras de Iowa (Kravchenko y Bullock, 2000), siendo la elevación y el carbono orgánico (Corg) las variables individuales que más contribuyeron a explicar la variación de rendimiento en ese estudio.

En un ensayo de largo plazo realizado durante 30 años en India por Manna et al. (2007), en un sistema continuo de trigo-soja, los niveles de Corg y N orgánico (Norg) decrecieron en los tratamientos testigo, con agregado de N y con agregado de NP (sin fertilizar, 100% del N recomendado y 100% del N y P recomendado, respectivamente), con la consecuente caída de los rendimientos. El rendimiento de soja descendió 30kg/ha/año en el testigo y 21 kg/ha/año con el agregado de NP. Por su parte, el rendimiento del trigo tuvo una caída de 46 Kg/ha/año en el testigo y 25 kg/ha/año con el agregado de N. Sin embargo, el agregado continuo del 100% recomendado de NPK sumado a la aplicación de enmiendas orgánicas o encalado, logró mantener los rendimientos de estos cultivos sin deteriorar la calidad del suelo a través de los años.

2.4 INDICADORES DE LA CALIDAD DE SUELO

Existe una gran cantidad de variables indicadoras de la calidad del suelo. Muchos autores, emplearon métodos de estadística multivariada, los cuales permiten contemplar un amplio grupo de variables que estimen la calidad del suelo y se asocien a los rendimientos.

Aparicio y Costa (2007), en un estudio realizado en la Pampa Argentina, evaluaron el efecto de la agricultura continua y del tipo de laboreo sobre la calidad del suelo. En este, determinaron que las prácticas de laboreo bajo un sistema de agricultura continua, afectaron varias propiedades físicas, deteriorando las funciones del suelo. Se observó una reducción en la conductividad hidráulica (Kh) a medida que aumentaron los años bajo agricultura continua. El cambio en el diámetro medio de los agregados fue el único parámetro físico que se correlacionó significativamente con años de agricultura continua, explicando el 36% de la variabilidad, independientemente de las condiciones del suelo (práctica de labranza y cultivo).

Wander y Bollero (1999) en Illinois, Estados Unidos, determinaron que la práctica de no-laboreo mejora las condiciones físicas y biológicas del suelo en los primeros 15 cm, a pesar de un aumento en la compactación del mismo. Las propiedades físicas y biológicas en este trabajo fueron las más alteradas por las prácticas agrícolas, y la materia orgánica particulada fue el indicador más sensible de la calidad del suelo.

Cantú (2007), en la provincia de Córdoba, Argentina, utilizó un número mínimo de indicadores (C orgánico, pH, saturación de bases, agregados estables en agua, velocidad de infiltración, densidad aparente y espesor del HA) para construir un índice de calidad de suelo (ICS) a través de un análisis de componentes principales. El autor obtuvo un índice fuertemente influenciado por el carbono orgánico, el cual afecta la gran mayoría de las propiedades del suelo y es alterado por las prácticas de manejo.

A nivel nacional, Centurión y Chinazo (2012), construyeron un ICS, que resultó de una combinación lineal positiva de la concentración de Corg, velocidad de infiltración, potencial de mineralización de nitrógeno y profundidad del suelo. Este índice, si bien no fue sensible a los años con agricultura sin laboreo (edad de chacra), se asoció positiva y significativamente con el rendimiento de trigo donde el manejo de la fertilización fue realizada a nivel comercial (el rendimiento relativo al potencial varió entre 0,45 y 0,65 cuando el ICS varió entre 0,6 y 1,9), pero no cuando los nutrientes fueron agregados para que no actuaran como limitantes del rendimiento. Sin embargo, la brecha entre el rendimiento actual y el rendimiento limitado por agua aumentó al reducirse el ICS.

2.5 HIPÓTESIS DEL TRABAJO

Se plantearon las siguientes hipótesis previas a la realización del trabajo.

- La historia de manejo del suelo afecta propiedades indicadores de la calidad del mismo.
- La calidad del suelo afecta el rendimiento de soja.
- Una menor calidad de suelo no se soluciona con manejo nutricional.
- La calidad del suelo está determinada por un conjunto de variables del suelo.
- Existe un índice de calidad de suelo que se correlaciona con la capacidad de producir soja.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EXPERIMENTO

El trabajo se realizó en el cultivo de soja (*Glycine max*) durante la zafra 2013/2014, en el potrero 27 de la Estación Experimental Mario A. Cassinoni, ubicada sobre la ruta 3, km 363 del Departamento de Paysandú. El suelo en el que se desarrolló el experimento pertenece a la unidad San Manuel, según la carta de suelos 1:1.000.000 (Altamirano et al., 1976), y al grupo CONEAT 10.9 (cuadro No. 1).

Cuadro No. 1. Descripción de los grupos de suelos CONEAT

GRUPO CONEAT	UNIDAD DE SUELOS	SUELOS DOMINANTES	SUELOS ASOCIADOS
10.9	San Manuel	Brunosoles Éutricos Típicos y Lúvicos	-----

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

El diseño experimental fue en parcelas divididas en tres bloques completos al azar. Los tratamientos fueron la combinación de cinco historias de manejos del suelo (HMS) durante veinte años ubicados en parcela mayor (cuadro No. 2) que se combinaron en parcela menor con manejos de fertilización a la secuencia trigo/soja sembrada en el año 2013 (MF) para dos condiciones hídricas (secano y riego)

Los tratamientos de fertilización corresponden a:

1. Actual: fertilizar cada cultivo en base a los actuales niveles críticos para fósforo (Bray I) y potasio intercambiable en suelo
2. Residual 1: fertilizar solo el trigo con P, K y S con una cantidades "no limitante" y medir efecto residual en soja
3. Residual 2: fertilizar solo el trigo con P, K, S y N con una cantidades "no limitantes" y medir efecto residual en soja

4. Fertilizado: fertilizar trigo y soja con cantidades de P, K y S “no limitantes” y nitrógeno en trigo en base a criterios actuales
5. No limitante: fertilizar ambos cultivos de manera no limitante

En el cuadro No. 3 se detallan las cantidades de nutrientes agregadas al trigo y a la soja. La dosis “no limitante” de P, K y S fue fija y definida en base a dosis máximas recomendadas para los niveles mínimos de disponibilidad de estos nutrientes evaluados a nivel nacional y la de N en base a análisis de suelo y foliar de trigo (fertilizado) y estableciendo la cantidad necesaria para producir 7000 kg ha⁻¹ de trigo. Los tratamientos de riego y secano, de forma de obtener los rendimientos potenciales, rendimientos máximos alcanzables en secano y rendimientos alcanzables.

Cuadro No.2. Descripción del factor historia de manejo del suelo

Historia de manejo del suelo	Descripción
LCP	Laboreo convencional, 50% del tiempo en cultivos, 50% del tiempo en pasturas, con predominancia de soja en la fase agrícola
SDP _{sj}	Siembra directa, rotación con pasturas y predominancia de soja
SDC _{sj}	Siembra directa, cultivo continuo y predominancia de soja
SDC _{sj-bch}	Siembra directa, cultivo continuo y alta frecuencia soja-barbecho
SDC _{sg}	Siembra directa, cultivo continuo y predominancia de sorgo

En los tratamientos que rotan con pasturas, éstas fueron sembradas en 1995, 2002 y 2008, con una mezcla formada por festuca (*Festuca arundinacea*), trébol blanco (*Trifolium repens*) y lotus (*Lotus corniculatus*).

La secuencia de cultivos iniciada en el 2012 fue trigo/soja-trigo y trigo/sorgo-trigo para tratamientos de predominancia de soja y sorgo respectivamente.

Cuadro No.3. Descripción de los distintos manejos de fertilización

Niveles de fertilización	Descripción
Actual	Nunca fertilizado.
Residual 1	Fertilizado en cultivo anterior con: 90 P ₂ O ₅ (kg/ha), 60 KCl (kg/ha) y 20 S ₂ O (kg/ha). Sin fertilizar en cultivo de soja.
Residual 2	Fertilizado en cultivo anterior con: 90 P ₂ O ₅ (kg/ha), 60 KCl (kg/ha), 20 S ₂ O (kg/ha) y 110 N (kg/ha). Sin fertilizar en soja.
Fertilizado	Fertilizado en cultivo anterior con: 90 P ₂ O ₅ (kg/ha), 60 KCl (kg/ha), 20 S ₂ O (kg/ha) y 70 N (kg/ha). Fertilizado en soja con: 90 P ₂ O ₅ (kg/ha), 60 KCl (kg/ha) y 11 S ₂ O (kg/ha).
Fert.No-Lim	Fertilizado en cultivo anterior con: 90 P ₂ O ₅ (kg/ha), 60 KCl (kg/ha), 20 S ₂ O (kg/ha) y 180 N (kg/ha). Fertilizado en soja con: 90 P ₂ O ₅ (kg/ha), 60 KCl (kg/ha) y 11 S ₂ O (kg/ha).

La parcela mayor de historia de manejo del suelo fue de 15 m de largo por 6 m de ancho y la parcela menor de de 5 m por 2 m, correspondientes a los tratamientos de fertilización.

3.3 MANEJO GENERAL DEL ENSAYO

La soja se realizó bajo Siembra Directa, sobre un rastrojo de trigo. Se sembró la variedad A 5019 el día 5/11/2013 con una población objetivo de 30 plantas m⁻² y una distancia entre hileras de 0,52m.

El manejo del cultivo (malezas, plagas y enfermedades) se realizó en forma homogénea dentro del experimento con el criterio de eliminar los factores reductores del rendimiento.

3.4 DETERMINACIONES

Dentro del ensayo se realizaron diferentes determinaciones y muestreos, denominados: a) determinaciones climáticas, b) determinaciones en el suelo, c) determinaciones en el cultivo y d) determinaciones a cosecha.

3.4.1 Determinaciones climáticas

Los datos pluviométricos decádicos del ciclo del cultivo se obtuvieron de los registros de la estación meteorológica de la EEMAC.

3.4.2 Determinaciones en el suelo

Se realizaron dos determinaciones de infiltración (l/h) para cada parcela. Siguiendo la metodología propuesta por Wander y Bollero (1999), se colocaron dos anillos concéntricos a una profundidad tal que estos se fijaran y no se dieran fugas de agua. Luego se rellenó el cilindro interno (10,4 cm de diámetro) con 450cc de agua, y se rellenó el espacio entre ambos. Se midió el tiempo que transcurrió en desaparecer el agua, el cual expresó la infiltración con los niveles de agua disponible en suelo a ese momento, denominada como Infiltración 1 (INF1). Luego se volvió a agregar 450 cc de agua en el anillo interno, manteniendo el nivel de agua en el externo. En esta instancia se determinó la velocidad de infiltración con el suelo a capacidad de campo. En los casos en los que el agua no infiltró en un tiempo de 45 minutos, se midieron los centímetros de agua residual en el cilindro interno y se determinó la infiltración por diferencia, denominada Infiltración 2 (INF2).



Figura No. 1. Representación de la medición de infiltración en el campo. El anillo interior contiene 450 ml de agua. El nivel de agua en el anillo exterior es igual al nivel en el anillo interior. Se mide el tiempo necesario para la infiltración total de agua en el anillo interior

La siguiente medida se realizó utilizando un micro infiltrómetro de disco (Decagon). Se tomaron 2 determinaciones por parcela mayor con una tensión de -2 cm. Cada medida consistió en tomar una lectura cada 30 segundos durante 15 minutos. La infiltración se calculó utilizando el software del equipo, el cual utiliza el método propuesto por Zhang (1997), el cual asume una relación entre la infiltración acumulada, la sortividad y la conductividad del suelo.



Figura No. 2. Medición de la conductividad hidráulica en el campo utilizando el infiltrómetro mini disco

Se determinó el nivel de P Bray 1 (ppm), K (meq/100 g de suelo) y % de carbono orgánico (C) en los estratos de 0 a 5 cm y de 5 a 20 cm, en los primeros estadios del cultivo, previo a la fertilización. Para esto se tomaron muestras compuestas de suelo para cada repetición de los tratamientos. Se utilizó calador, y se tomaron 5 sub-muestras por sub-parcela, separando manualmente los estratos de profundidad.

3.4.3 Determinaciones en planta

Se realizó análisis de nutrientes en hoja. Para esto se tomaron 10 muestras de hoja terminal totalmente desarrollada (folíolos y pecíolo) por sub-parcela en el estadio R2 del cultivo.

3.4.4 Determinaciones a cosecha

Se determinó el número de plantas (pl/m²), haciendo el conteo de las mismas en dos metros lineales, en las tres hileras centrales cosechadas.

Se determinó el rendimiento (kg/ha) de las parcelas, cosechando dos metros lineales de las tres hileras centrales.

Se determinó el peso de 100 granos (g), el cual resultó de promediar dos medidas de peso de 100 granos para cada parcela.

3.5 COMPILACIÓN DE DATOS

Además de las determinaciones realizadas durante el cultivo, se utilizaron datos recabados durante el cultivo anterior. Estos fueron: pH KCL, pH H₂O, Ca (meq/100g suelo), Mg (meq/100g suelo), Na (meq/100g suelo), Bases totales (BT), Potencial de Mineralización de Nitrógeno (PMN) (mg/kg N-NH₄), Electro conductividad (EC), Acidez Titulable (Ac.T) (meq/100g suelo), Resistencia a la penetración de los primeros 20 mm (Rp 20 mm), Resistencia a la penetración media (Rp m), Resistencia a la penetración estándar (Rp STD).

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.6.1 Análisis de varianza (ANAVA)

Se realizó un análisis de varianza con todas las variables medidas para determinar la existencia o no de diferencias significativas entre los tratamientos. Se consideró a priori un p-valor=0,1 como nivel de significancia. Para los efectos significativos se realizó la comparación de medias utilizando el test de LSD Fisher, con un $\alpha=0,05$.

Para analizar el rendimiento en función de las HMS se consideró el No. de plantas como covariable, ya que ésta no dependió de las HMS pero sí afectó al rendimiento.

3.6.2 Análisis multivariado

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para identificar las variables del suelo que explicaron las diferencias entre las HMS y para la construcción de un índice de calidad del suelo (ICS).

Los componentes principales (CP) son definidos como una combinación lineal de variables con relación a un sistema de coordenadas. La varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (llamado el Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Para realizar el ACP, se definió el mínimo set de datos (MSD). En el análisis se siguieron los pasos propuestos por Wander y Bollero (1999). Primero se consideraron las variables que fueron significativamente diferentes entre las HMS y luego se estudió la correlación entre ellas, de manera de eliminar variables redundantes, reteniendo la de mayor coeficiente con mayor valor absoluto. Por último, se corrigieron los valores de las variables con el criterio “más es mejor” (en el caso de P, C, K, INF-2-DR, Ca, Mg, pH-KCl ya que todos los valores se encontraron por debajo del neutro y Rp-20/m) o “menos es mejor” (para Rp-m) con el objetivo de darles un sentido agronómico (Andrews et al., 2002).

Los CP que presentaron mayor “vector” son los que representaron la mayor parte de la variación y se retuvieron en el análisis aquellos que explicaron más de un 5% de la variación (Wander y Bollero, 1999). Luego se realizó un análisis de varianza para los CP en función de las HMS de manera de determinar cuáles CP fueron distintos entre tratamientos.

Para poder cuantificar la calidad del suelo se construyó un índice de calidad de suelo (ICS) sumando los valores de los CP para cada HMS. Dado que las variables fueron corregidas previamente según un criterio agronómico, se consideró el valor absoluto de ICS.

3.6.3 Regresión lineal simple

Para identificar la relación entre el rendimiento (kg/ha) y el ICS se utilizó una regresión lineal simple con el rendimiento (kg/ha) como variable dependiente y al ICS como regresora y se analizó la significancia de la regresión a partir de un análisis de varianza de la regresión.

3.7 ESTUDIO DE CHACRAS

3.7.1 Características generales y manejo

Se analizaron diez chacras sembradas con trigo en el invierno 2013, en las cuales se instalaron parcelas apareadas de 5 por 10 m. Las mismas consistieron en: 1) fertilización realizada por el productor; 2) agregado adicional de N, P, K y S de manera que no fuera limitante para la producción. Estas chacras fueron sembradas con soja y fertilizadas según el criterio de cada

productor, por lo que representan el efecto residual de fertilización sobre soja de segunda.

Para cada sitio se dispuso de datos del suelo de pH KCL, pH H₂O, Ca (meq/100g suelo), Mg (meq/100g suelo), Na (meq/100g suelo), BT(meq/100g suelo), Saturación en bases (ST), Capacidad de intercambio catiónico (CIC) (meq/100 g suelo), Carbono de 0 a 20cm (COS0-20) (%),PMN (mg/kg N-NH₄), EC, Ac.T (meq/100 g suelo), Rp-20mm, Rp-m, Rp-STD, Arcilla (%), Limo(%), Arena(%).

Sobre el cultivo se determinó: rendimiento con fertilización residual no limitante (Rend-no-lim), rendimiento con manejo de fertilización aplicado en trigo y soja siguiendo los criterios actuales (Rend-act), y la diferencia de rendimiento entre ellos (Dif-rend).

3.7.2 Análisis estadístico de chacras

Para la construcción del ICS se realizó un ACP incluyendo las variables Na, Ca, Mg, CIC, pH-KCl, EC, Rp-m, Rp-20mm, Rp-20/m. No se consideraron K ni P en suelo, de manera que el ICS no incluya la disponibilidad de estos nutrientes que pueden corregirse por fertilización, y cuya respuesta se evalúa con la variable Dif-rend.

Se realizó un análisis de regresión simple de las variables de respuesta del cultivo con los CP para establecer la relación entre las variables que los componen y el rendimiento. Los CP que se relacionaron significativamente con el rendimiento se les calculó el ICS siguiendo la misma metodología descripta para el análisis de datos del experimento.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo fueron elevadas (1038 mm), así como también durante el período crítico (304 mm), lo que según Bidegain (2012) determinaría rendimientos reales mayores al 70% del potencial del cultivo. Cabe destacar la ocurrencia de restricciones hídricas en los primeros estadios del cultivo, sobre todo en el mes de diciembre, lo cual podría generar retraso en la implantación y menor stand de plantas.

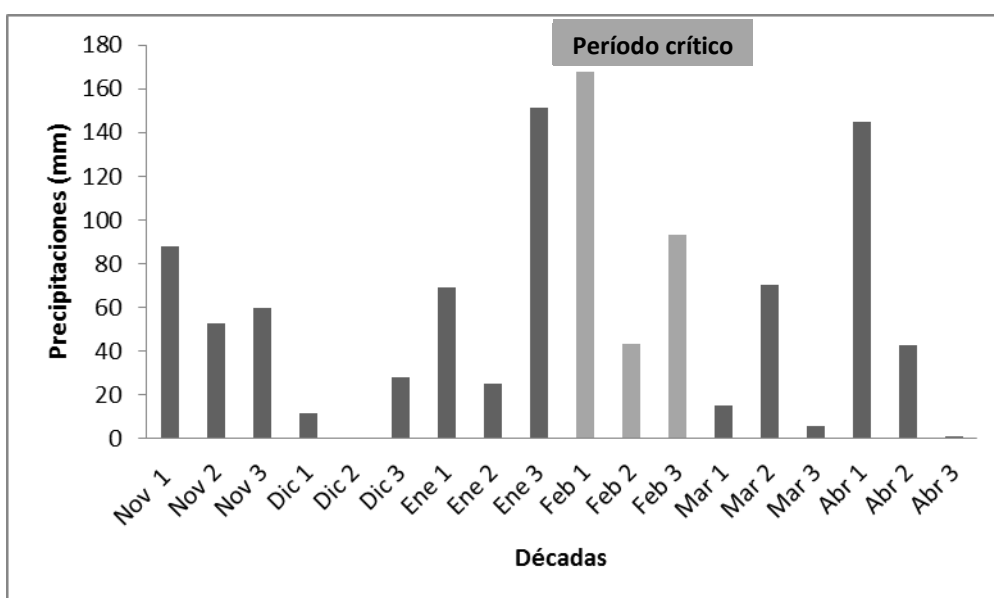


Figura No. 3. Precipitaciones decádicas (mm) durante el ciclo del cultivo (nov. 13 a abr. 14). Datos obtenidos de la estación meteorológica de la EEMAC.

4.2 EFECTO DE LA HISTORIA DE MANEJO DEL SUELO SOBRE LA FERTILIDAD

4.2.1 Propiedades químicas del suelo en respuesta al manejo diferencial de la historia del mismo, fertilizando cada cultivo con los criterios de fertilización actuales

En el cuadro No. 4 se presentan los resultados del análisis de nutrientes realizado al momento de la siembra, previo a la fertilización del cultivo de soja.

Se evaluaron los niveles residuales según la historia de manejo del suelo (HMS) de los tratamientos.

Cuadro No. 4. Concentración de carbono orgánico en el suelo, fósforo disponible y potasio intercambiable según HMS, previo a la siembra del cultivo de soja (antes de la fertilización)

HMS	COS0-5	COS5-20	P0-5	P5-20	Kint0-5	Kint5-20
LCP	2,6 a	2,1 a	26 b	5 a	0,86 ab	0,42 bc
SDCsj-bch	2,8 a	2,0 a	23b	5 a	0,88 ab	0,44 b
SDCsj	3,1 a	2,0 a	26b	5 a	0,84 b	0,46 ab
SDPsj	3,0 a	2,0 a	24b	5 a	0,96 a	0,52 a
SDCsg	2,9 a	2,1 a	37a	7 a	0,70c	0,37 c
P(0,1)	0,138	0,344	0,017	0,230	0,005	0,013

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). COS0-5: Carbono de 0 a 5 cm (%), COS5-20: Carbono de 5 a 20 cm (%), P0-5: Fósforo de 0 a 5 cm (ppm), P5-20: Fósforo de 5 a 20 cm (ppm), K0-5: Potasio de 0 a 5 cm (meq/100 gr suelo), K5-20: Potasio de 5 a 20 cm (meq/100 gr suelo).

El contenido de COS fue mayor en la capa superficial de 0 a 5 cm que en la profunda de 5 a 20 cm, pero sin diferencias significativas entre los tratamientos de HMS, por lo que la HMS no modificó el contenido de COS. En cuanto al fósforo, SDCsg se diferenció significativamente del resto de las HMS en el estrato de 0 a 5 cm de profundidad, pero no el estrato de 5 a 20 cm, donde la disponibilidad fue muy baja en todos los tratamientos. Como se muestra en el cuadro No. 5. el fósforo de 0 a 20 cm de profundidad (P0-20) se encontró entorno al valor crítico (10-12 ppm P₂O₅) (del Pino, 2012) de respuesta en rendimiento.

Cuadro No. 5. Concentración P0-20 (ppm), considerando una densidad aparente de 1,1 g/cm³ de 0 a 5 cm y 1,3 g/cm³ de 5 a 20 cm

HMS	P0-20
SDCsg	13 a
SDCsj	10 b
LCP	10 b
SDCsj-bch	9 b
SDPsj	8 b

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Por último, para el caso del K, se encontraron diferencias significativas entre las distintas HMS, las cuales podrían ser debidas a una extracción diferencial de los cultivos. Sin embargo, todos los niveles estuvieron por arriba del nivel crítico (0,34 meq/100g de suelo) considerado para los suelos del Uruguay (Barbazan et al., 2011).

En conclusión, la HMS no modificó el COS. Con los criterios actuales el suelo tiene suficiente K y disponibilidad de P entorno al valor crítico de respuesta.

Cuadro No. 6. Bases totales y cationes del suelo según la historia de manejo del suelo

HMS	Ca	Mg	Na	BT
LCP	8,99 b	1,22 b	0,16	11,09 b
SDCsj-bch	9,82 a	1,38 a	0,17	12,10 a
SDCsj	9,80 a	1,30 ab	0,17	11,86 a
SDPsj	9,64 a	1,35 a	0,15	11,93 a
SDCsg	9,00 b	1,28 ab	0,19	10,98 b
P(0,1)	0,019	0,039	0,774	0,012

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Se encontró diferencias significativas en el contenido de Ca, Mg y BT para las distintas HMS. Para el caso del Ca, el SDCsj-bch, SDCsj y SDPsj fueron los tratamientos que tuvieron significativamente mayores contenidos. En cuanto al Mg, los tratamientos mostraron una tendencia similar a la del Ca. Como consecuencia, éstos presentaron niveles más elevados de BT. El contenido de Na no se diferenció significativamente entre las HMS.

Cuadro No. 7. Acidez del suelo según historia de manejo del suelo

HMS	pH-KCl	pH-H ₂ O	A.TIT
SDCsg	3,9 b	4,9	5,2
SDCsj	4,1 a	5,2	4,8
SDPsj	4,1 a	5,1	4,7
SDCsj-bch	4,2 a	5,2	4,5
LCP	4,2 a	5,1	4,3
P(0,1)	0,047	0,286	0,201

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). A.TIT: acidez titulable (meq/ 100 gr suelo), pH-KCl: pH del cloruro de potasio, pH-H₂O: pH del agua.

El pH-KCl presentó valores más bajos en relación al pH-H₂O, debido a que este además de medir la concentración de protones H⁺ existente en la solución del suelo, cuantifica el nivel de protones Al⁺³ liberados a la solución desde la fase de intercambio.

No se encontraron diferencias significativas entre las HMS para el pH-H₂O. Sin embargo, la variable pH-KCl sí mostró diferencias significativas, siendo el tratamiento SDCsg el que presentó el valor más bajo. Esto determinaría la presencia de mayor cantidad de aluminio intercambiable en dicho tratamiento.

Los valores de pH-H₂O recomendados para el cultivo de soja en Uruguay son entre 5 y 6,5 (del Pino, 2012), por lo que todas las HMS se encuentran dentro del rango, excepto el SDCsg el cual está por debajo. Tisdale et al., citados por Byre et al. (2004), plantean que si el pH es de 5,5 o menos es probable la presencia de aluminio que pueda afectar al cultivo por toxicidad y a la absorción de molibdeno, nutriente fundamental para las bacterias que fijan nitrógeno. Además, con estos niveles de acidez se reduce la disponibilidad de fósforo y se incrementa el potencial de lixiviación del potasio (García et al., 2009).

La variable A.TIT no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo SDCsg presentó niveles más altos de acidez titulable que evidenciarían la menor capacidad buffer del suelo y mayor presencia de Al⁺³.

4.2.2 Propiedades físicas

Se encontraron diferencias significativas para las HMS al analizar las propiedades físicas del suelo. En el cuadro No. 8 se presentan dichos resultados.

Cuadro No. 8. Variables físicas según tratamientos de historia de manejo del suelo

HMS	Rp-m	Rp-20mm	Rp-20/m	Rp-STD	EC	INF-2-DR	INF-2
SDCsg	539 b	92	0,16 b	403 a	84,4	48,53 b	43,76
SDPsj	558 b	124	0,22 b	371 ab	91,5	78,63 a	75,20
SDCsj-bch	557 b	145	0,26 b	348 ab	81,7	42,58 b	44,44
SDCsj	530 b	141	0,27 b	332 b	85,2	42,35 b	49,14
LCP	392 a	158	0,40 a	227 c	87,8	42,82 b	56,80
P(0,1)	0,023	0,374	0,024	0,002	0,545	0,002	0,669

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). Rp-m: resistencia a la penetración media (KPa), Rp-20mm: Resistencia a la penetración de los primeros 20 mm (KPa), Rp-20/m: relación entre la resistencia a la penetración de los primeros 20mm y la media (KPa), Rp-STD: resistencia a la penetración estandarizada (Kpa), EC: electroconductividad (S/min), INF-2-DR: ($l/h/m^2$), INF-2: infiltración del suelo ($l/h/m^2$).

Para la variable Rp-m el tratamiento LCP presentó significativamente el mejor valor, siendo el resto indiferentes entre ellos. Sin embargo, la Rp-20mm no mostró diferencias significativas. Los tratamientos SDCsg y LCP mostraron el valor significativamente mayor y menor respectivamente para la Rp-STD, presentando el SDCsj un valor intermedio respecto a los anteriores. EC no fue significativamente diferente entre HMS. Por último, en cuanto a la infiltración, sólo la INF-2-DR mostró diferencias significativas, siendo SDPsj el que presentó el mejor valor. Los restantes manejos no difirieron significativamente entre sí.

4.2.3 Propiedades biológicas

En lo que respecta a la PMN, no se encontró diferencias significativas para los distintos HMS.

Cuadro No. 9. Potencial de mineralización de nitrógeno según historia de manejo del suelo

HMS	PMN
SDCsg	23,67
SDCsj	17,67
LCP	15,33
SDPsj	12,67
SDCsj-bch	7,67
P(0,1)	0,602

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). PMN: potencial de mineralización de nitrógeno (mg/kg N-NH₄).

4.3. NIVEL RESIDUAL DE NUTRIENTES A LA SIEMBRA DE SOJA

En el cuadro No. 10 se presenta el efecto residual de la fertilización aplicada al cultivo de trigo previo sobre la disponibilidad de P y K en el suelo a la siembra de soja.

Cuadro No. 10. Nivel de nutrientes en el suelo según estrato a la siembra del cultivo de soja, para los distintos manejos de fertilización realizados en el cultivo de trigo previo.

Fertilización	P0-5	P5-20	K0-5	K5-20
Actual	18 c	7 a	0,77 b	0,41 a
Residual 1	29 b	5 a	0,93 a	0,46 a
Residual 2	34 a	6 a	0,90 a	0,46 a
Fertilizado	27 b	5 a	0,85 ab	0,46 a
FertNo-Lim	27 b	5 a	0,79 b	0,42 a

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

El MF residual 2 presentó el nivel significativamente mayor de P0-5, el MF actual presentó el nivel significativamente menor, mientras que los restantes MF tuvieron valores intermedios sin diferencias significativas entre ellos.

En cuanto al P5-20, no se obtuvieron diferencias significativas entre los MF, siendo estos valores menores a los encontrados en P0-5, lo cual evidenciaría la estratificación del nutriente.

El K0-5 mostró diferencias entre los MF, siendo residual 1 y residual 2 los que tuvieron los valores más altos y, actual y Fert No Lim los de valores más bajos. Para la capa de 5 a 20 cm, este nutriente no presentó diferencias significativas entre MF y en todos los casos los niveles fueron más bajos respecto a la capa superior. Al igual que el fósforo, esto evidenciaría la estratificación generada por la aplicación del fertilizante en la superficie.

4.4 EFECTO DE LA HISTORIA DE MANEJO DEL SUELO Y LA FERTILIZACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO EN SOJA

Se detectó un efecto significativo de la HMS sobre el rendimiento de soja y el peso de granos, pero no hubo efecto significativo de la fertilización ni de la interacción HMS y Fertilización.

4.4.1 Análisis de varianza de los rendimientos en función de la HMS

En la figura No. 4 se puede observar que los rendimientos variaron significativamente en función de las distintas HMS. Considerando que hubo diferencias en la disponibilidad de nutrientes en el suelo pero que los mismos se encontraron entorno al crítico para el cultivo de soja, se podría afirmar que la limitante de rendimiento en soja estuvo relacionada a las propiedades químicas (no nutricionales), físicas y/o biológicas del suelo, las cuales fueron determinadas por la HMS.

SDCsg presentó un rendimiento promedio (3224 kg/ha) significativamente mayor a LCP y SDCsj-bch, los cuales tuvieron menores rendimientos (2823 y 2702 kg/ha respectivamente).

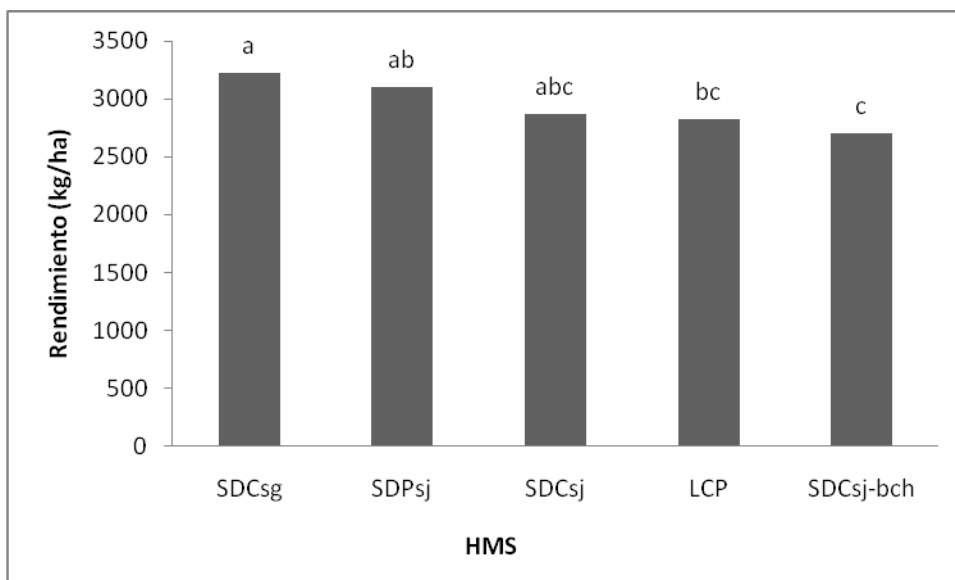


Figura No. 4. Rendimiento medio (kg/ha) según historia de manejo del suelo. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

Las diferencias en rendimiento de las HMS podrían ser explicadas por el peso de grano, el cual presentó diferencias significativas con una tendencia similar al rendimiento (figura No. 5). Esta variación en el peso de grano podría explicarse por cambios en las variables del suelo generadas por las HMS, que ante elevadas precipitaciones en la fase final del ciclo, modificarían el suministro de agua y/o nutrientes al cultivo.

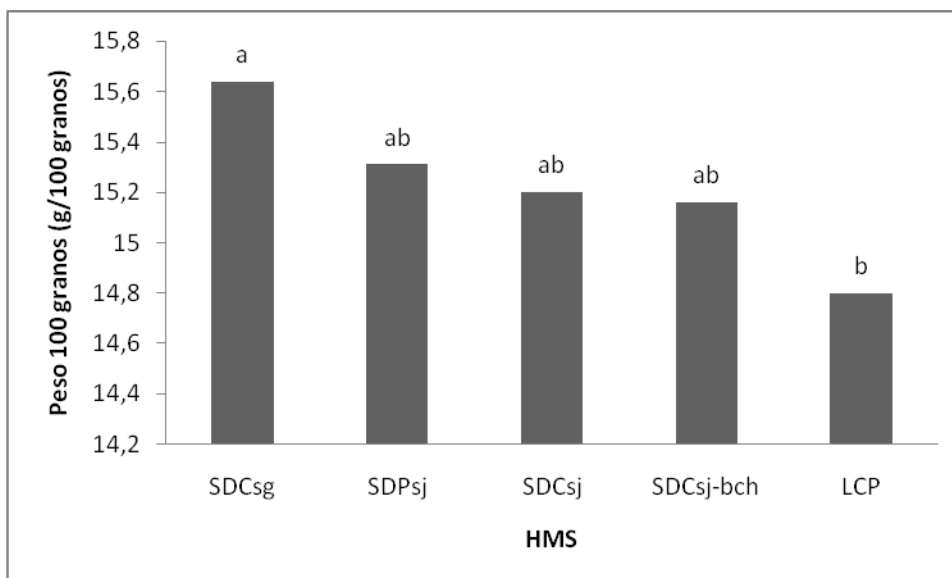


Figura No. 5. Peso de 100 granos según historia de manejo del suelo, corregido por la covariable número de plantas. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

4.4.2 Respuesta de soja al manejo de la fertilización

Los rendimientos del cultivo de soja no variaron significativamente en función del manejo de la fertilización (figura No. 6). El resultado se explicaría porque los niveles de P Bray 1 (ppm) y K (meq/100g de suelo) a la siembra se encontraron en torno a los rangos de respuesta al agregado de dichos nutrientes.

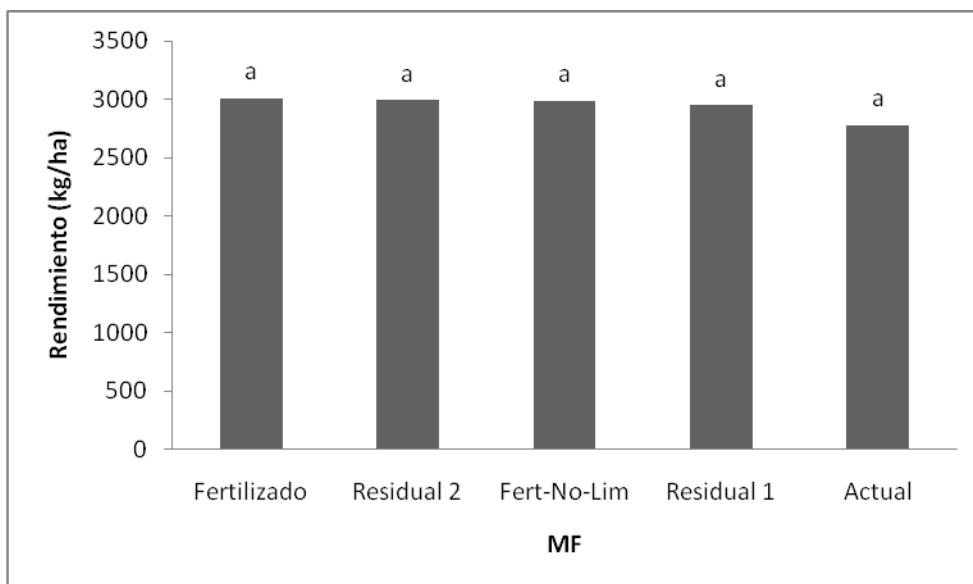


Figura No. 6. Rendimiento (kg/ha) de soja en función de los manejos de fertilización. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

Manejando los criterios actuales de fertilización (actual) se logró el mismo rendimiento que en las opciones “no limitantes” (Fert-no-lim), esto podría estar indicando que estos criterios siguen válidos o que existió alguna limitante para la respuesta al agregado de nutrientes.

La ausencia de diferencias significativas entre los MF podría estar relacionada con la elevada disponibilidad hídrica durante el PC, la cual provocaría que la soja fuera menos sensible a detectar las diferencias en los niveles de nutrientes impuestos por los MF.

4.4.3 Análisis de Componentes Principales (ACP)

La HMS determinó diferencias significativas en algunas propiedades del suelo y existió una respuesta significativa en el rendimiento de soja. Por tanto, existió variabilidad en la calidad del suelo y en la respuesta del cultivo en un rango de disponibilidad de nutrientes que puede asumirse como no limitante tanto por los resultados de los análisis de suelo, como por la ausencia de respuesta a la fertilización.

Como las propiedades del suelo varían de manera relacionada, se utilizó el ACP para identificar un conjunto mínimo de propiedades que puedan definir la calidad del suelo y su relación con la respuesta vegetal.

En el cuadro No. 11 se resume el resultado del ACP utilizando las propiedades del suelo que fueron significativamente modificadas por la HMS (mínimo set de datos).

Cuadro No. 11. Análisis de componentes principales con las variables: K0-5, K5-20, P0-5, P5-20, COS0-5, COS5-20, INF-2-DR, pH-KCl, Ca, Mg, Rp-m y Rp-20/m.

Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	3,47	0,29	0,29
2	2,72	0,23	0,52
3	2,28	0,19	0,71
4	1,2	0,1	0,81
5	0,91	0,08	0,88
6	0,68	0,06	0,94
7	0,33	0,03	0,97
8	0,17	0,01	0,98
9	0,13	0,01	0,99
10	0,06	0,01	1
11	0,04	0	1
12	0,01	0	1

Cuadro No. 12. Correlación con las variables originales

Variables	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6
pH-KCL	0,56	-0,51	0,51	-0,17	-0,13	0,23
Ca	0,45	0,62	0,4	-0,24	-0,04	0,27
Mg	-0,09	0,92	0,25	0,09	-0,02	0,15
Rp-m	-0,54	-0,55	0,05	0,14	-0,47	-0,25
Rp-20/m	-0,27	-0,35	0,81	0,06	-0,23	0,23
INF-2-DR	0,33	0,41	-0,1	0,83	-0,02	-0,04
K0-5	0,8	-0,11	-0,1	0,27	-0,48	0,08
K5-20	0,88	-0,19	-0,35	0,06	-0,1	0,08
P0-5	-0,28	0,25	-0,68	-0,35	-0,36	0,25
P5-20	-0,36	-0,31	-0,69	0,13	0,03	0,44
COS0-5	0,76	0,13	-0,24	-0,41	-0,11	-0,35
COS5-20	0,52	-0,65	-0,07	0,05	0,48	0,13

Reteniendo los primeros seis componentes siguiendo los criterios de Wander y Bollero (1999) se explicó el 94% de la variación, con una correlación cofonética de 99,7%. Los R^2 de los CP1, CP2, CP3, CP4, CP5 y CP6 fueron 0,29, 0,23, 0,19, 0,10, 0,08 y 0,06 respectivamente.

En el CP1 las variables con coeficiente positivo fueron K5-20, COS0-5 y pH-KCl y con coeficiente negativo, la Rp-m. En el CP2 las variables que tuvieron mayor peso fueron Mg y Ca, con coeficiente positivo y COS5-20, Rp-m y pH-KCl, con coeficiente positivo. El CP3 fue afectado positivamente por Rp-20/m y pH-KCl, y negativamente por P0-5 y P5-20. El CP4 fue explicado positivamente por la INF-2-DR y negativamente por COS0-5. El CP5 fue explicado por COS5-20, el cual lo afectó positivamente y negativamente por K0-5 y Rp-m. Por último, el CP6 fue afectado positivamente por P-5-20 y negativamente por COS0-5.

4.4.4 Análisis de varianza de los componentes principales en función de la historia de manejo del suelo

Se realizó un análisis de varianza el cual determinó que CP1, CP3 y CP4 presentaron diferencias significativas entre las HMS. Por lo tanto, las variables que explican la mayor parte de estos CP serían las afectadas por las distintas HMS y determinarían las diferencias en el rendimiento.

Cuadro No. 13. Análisis de varianza de los componentes principales según historia de manejo del suelo

HMS	CP1	CP 2	CP3	CP4	CP5	CP6
SDPsj	1,99 a	0,83 a	0,07 a	1,48 a	-0,04 a	-0,36 a
SDCsj	0,72 ab	0,53 a	0,49 a	-1,01 c	-0,53 a	-0,34 a
SDCsj-bch	0,12 ab	0,52 a	0,67 a	-0,62bc	0,77 a	0,61 a
SDCsg	-1,27 b	0,31 a	-2,17 b	-0,25bc	0,38 a	0,04 a
LCP	-1,56 b	-2,19a	0,94 a	0,41 ab	-0,57 a	0,05 a

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Como se muestra en las figuras No. 7, 8, 9, 10, 11 y 12, LCP se diferenció del resto de las HMS por las variables Rp-m, Rp-20/m, en todos los CP, y por pH-KCl, COS5-20 y P5-20 en el CP1 y CP2. La menor resistencia a la penetración tanto en profundidad como en superficie y la menor estratificación de nutrientes podría ser debido a la realización de laboreo convencional, el cual generaría perturbación de la estructura, aumento de la macroporosidad y

disminuiría la acumulación de nutrientes en superficie, diferenciándose significativamente de la SD.

El SDCsg se diferenció principalmente por las variables P0-5 y P5-20, en todos los CP. Esto sería explicado nuevamente por una menor extracción de dicho nutriente del cultivo de sorgo, generando un balance más positivo. Además en algunos CP se diferenció del resto por el Mg y el K5-20.

En cuanto al SDPsj, la INF-2-DR fue la variable que la diferenció del resto en todos los CP. Además se diferenció por K0-5, K5-20, COS0-5 y COS5-20 en el CP1. Esto evidenciaría una mejor estructura del suelo en este tratamiento, explicada por la combinación de SD y rotación con pasturas.

La HMS SDCsj, fue asociada a altos valores de COS0-5, pH-KCl, Ca y P0-5 sólo en el CP4. Por último, SDCsj-bch sólo fue separada por pH-KCl y Ca en el biplot CP3 vs CP4. En el resto de los biplots, no pudo asociarse a ningún grupo de variables. Ninguna de estas HMS presentó una tendencia marcada dado que los valores de las variables consideradas fueron intermedios o bajos con respecto a los restantes tratamientos.

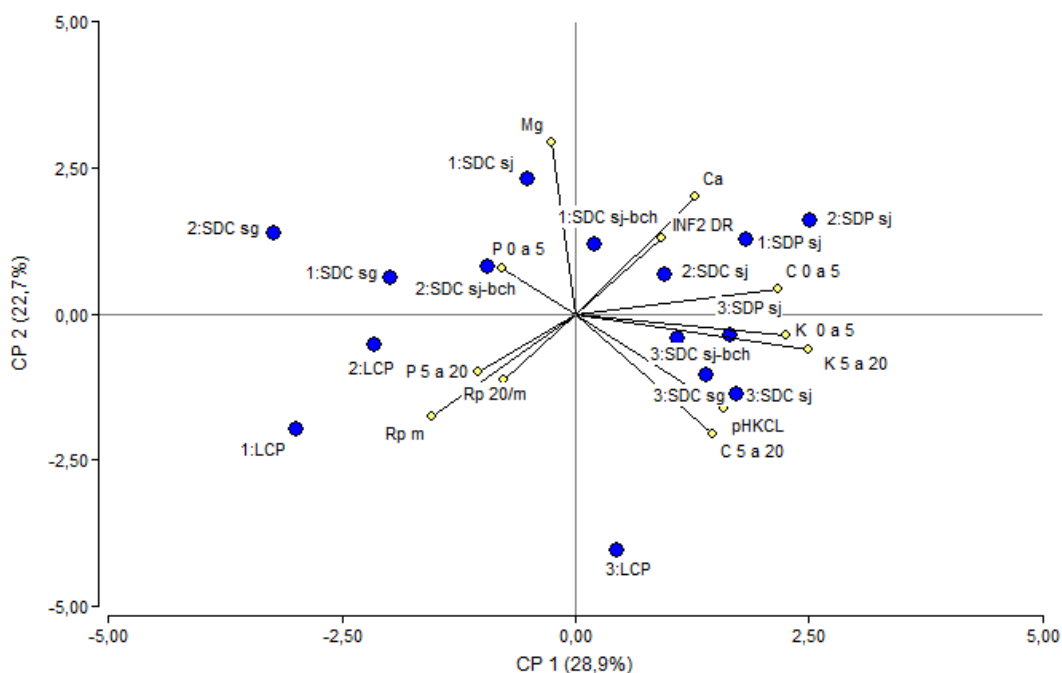


Figura No. 7. Biplot de componentes 1 y 2 del Análisis de Componentes Principales

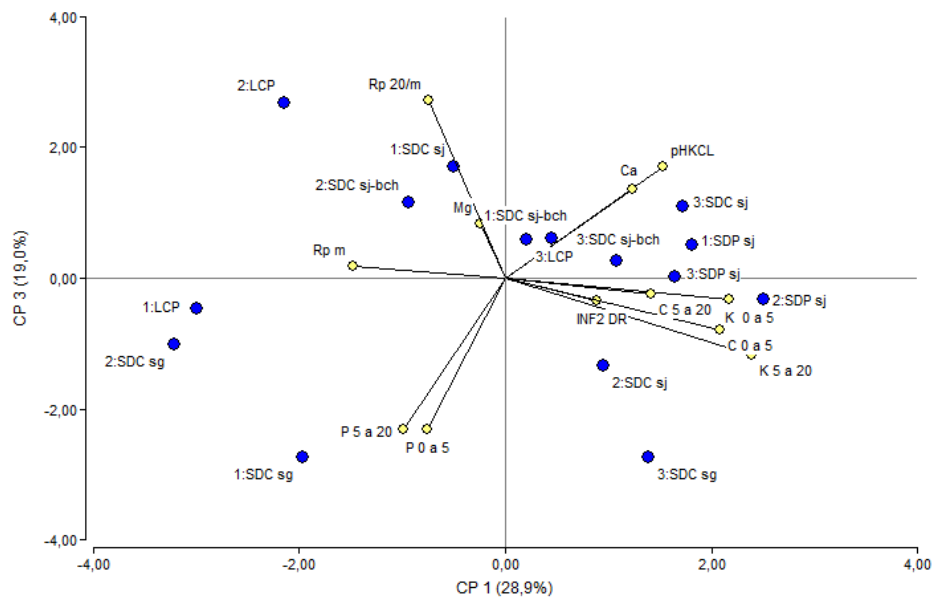


Figura No. 8. Biplot de componentes 1 y 3 del Análisis de Componentes Principales

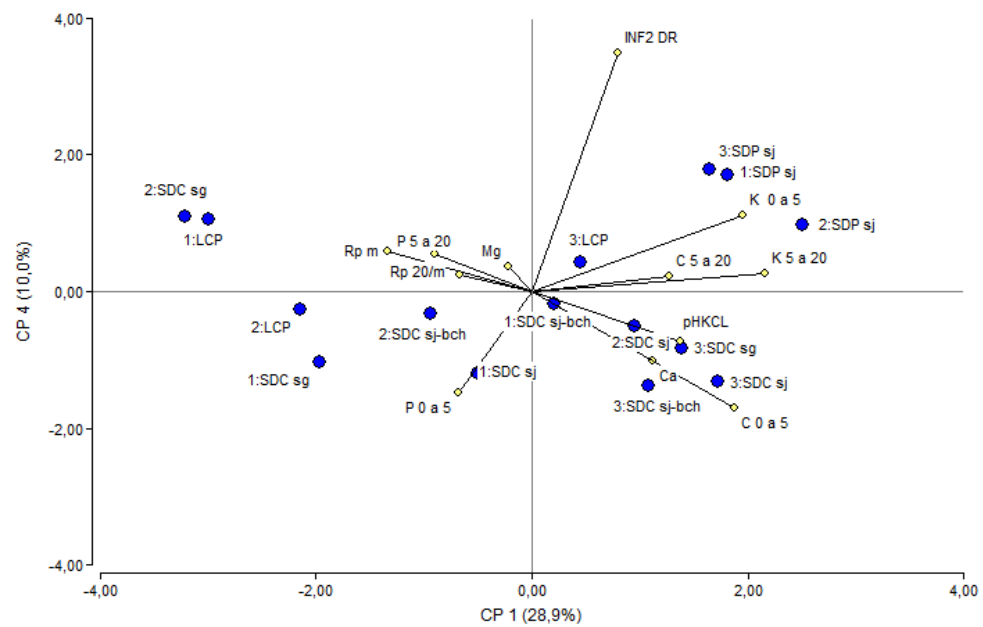


Figura No. 9. Biplot de componentes 1 y 4 del Análisis de Componentes Principales

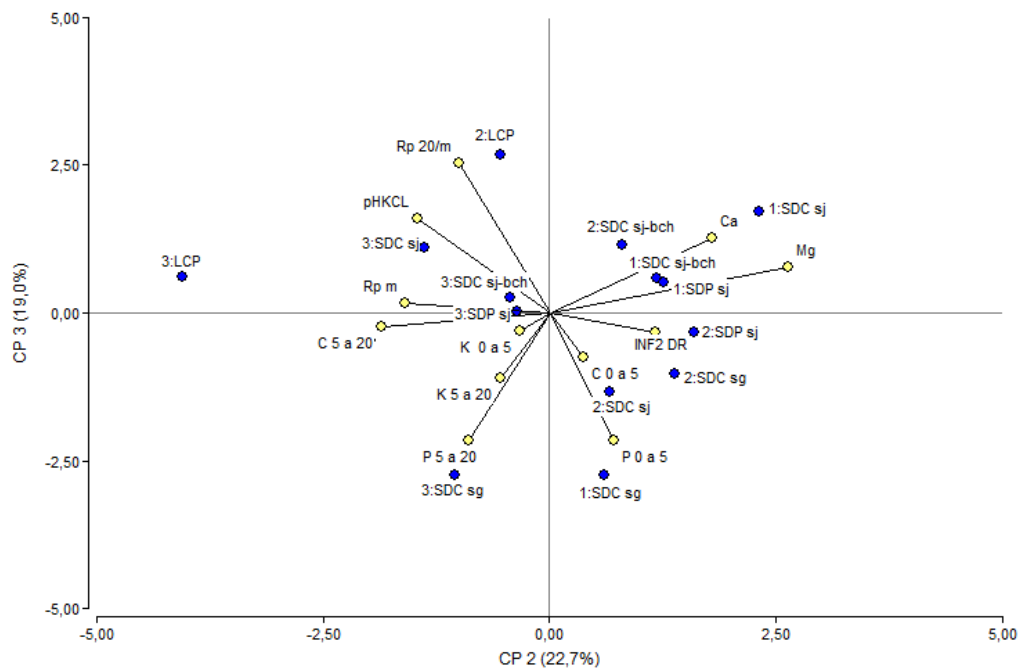


Figura No. 10. Biplot de componentes 2 y 3 del Análisis de Componentes Principales

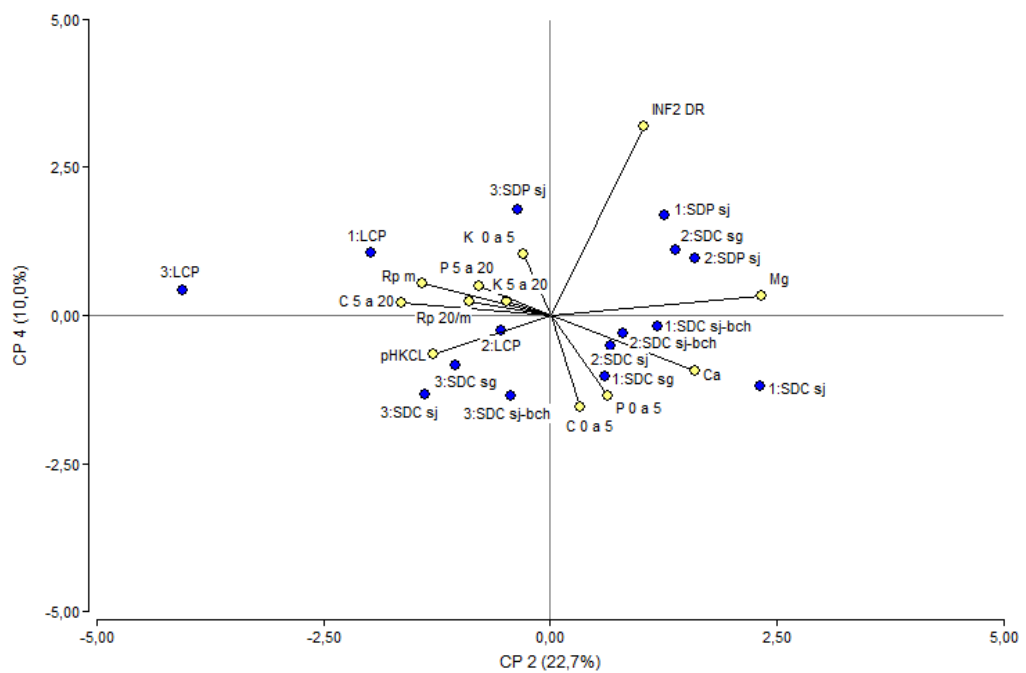


Figura No. 11. Biplot de componentes 2 y 4 del Análisis de Componentes Principales

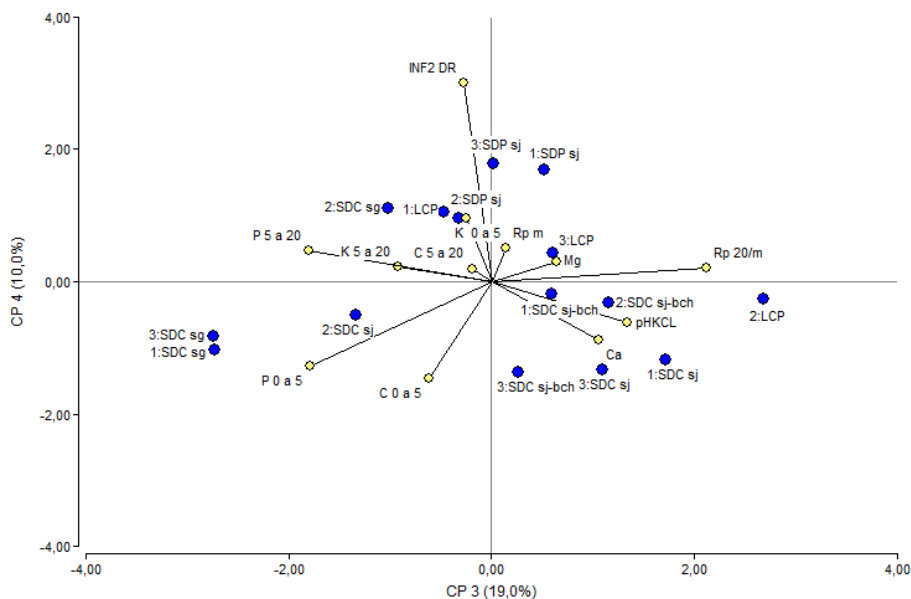


Figura No. 12. Biplot de componentes 3 y 4 del Análisis de Componentes Principales

4.4.5 Índice de calidad del suelo (ICS)

Se construyó un ICS a partir del ACP, el cual fue significativamente modificado por la HMS (cuadro No. 14; p -valor= 0,0051), encontrándose una respuesta positiva del rendimiento de soja al cambio en el ICS generado (figura No. 13).

Cuadro No. 14. ANAVA del índice de calidad de suelo según historia de manejo del suelo

HMS	ICS
SDPsj	4,38 a
SDCsg	3,39 ab
LCP	2,41 bc
SDCsj-bch	0,99 c
SDCsj	0,88 c
P(0,1)	0,005

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

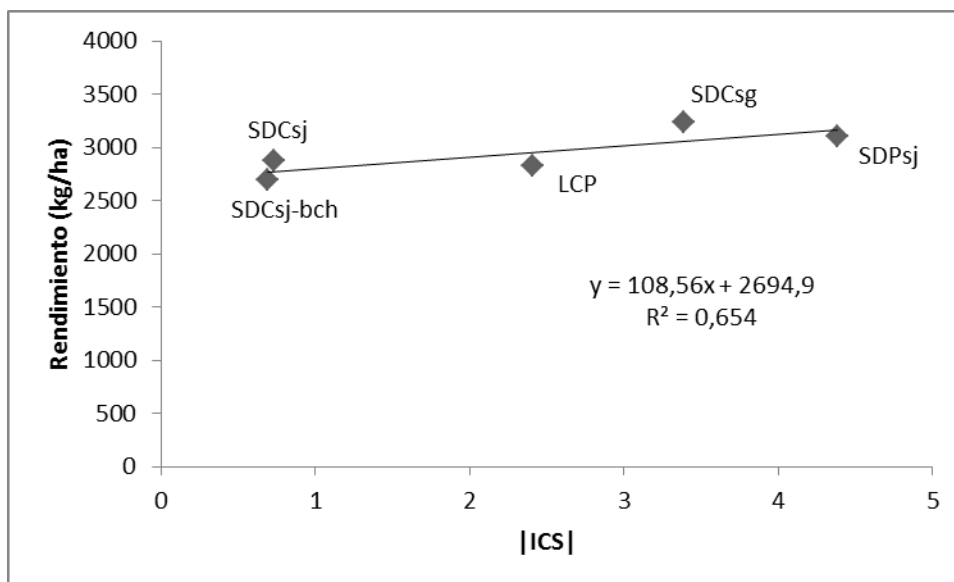


Figura No. 13. Regresión lineal entre Rendimiento de soja e índice de calidad de suelo

SDPsj fue la HMS que presentó el mayor valor de ICS, no diferenciándose significativamente de SDCsg. Por otro lado, SDCsj-bch y SDCsj fueron los tratamientos con los ICS significativamente inferiores, habiendo presentado el LCP un valor intermedio sin diferenciarse significativamente de SDCsg ni de SDCsj-bch y SDCsj.

Estos resultados apoyan la hipótesis de que la HMS modifica el conjunto de propiedades del suelo y que la respuesta en rendimiento de soja fue sensible a las variaciones en el ICS generado. Del cuadro No. 13, se desprende que la historia de manejo del suelo definida por la realización de SD en rotación con pasturas generaría la mejor calidad de suelo, por tener la mejor combinación de valores deseados de las variables. Estuvo asociado a altos niveles de INF-2-DR ($78,63 \text{ l/h/m}^2$), elevados niveles de K ($0,96 \text{ meq/100g}$ de 0 a 5 cm y $0,52 \text{ meq/100g}$ de 5 a 20 cm) y COS ($3,0 \%$ de 0 a 5 cm y $2,0 \%$ de 5 a 20 cm). Estos valores serían la consecuencia de mejores propiedades físicas debido a la no perturbación del suelo e inclusión de pasturas, así como también a mejores propiedades químicas explicadas por un balance de nutrientes más favorable.

Una calidad de suelo similar podría ser alcanzada con la realización de cultivos continuos bajo SD y la inclusión frecuente de gramíneas estivales (SDCsg), en lugar de una fase de pasturas en la rotación. Sin embargo, este ICS sería alcanzado por la combinación de otro grupo de variables específico

para esta HMS. En este caso la variable que tuvo mayor peso en definir el ICS fue P con 37 ppm de 0 a 5 cm y 7 ppm de 5 a 20 cm.

A pesar de poseer el SDP_{sj} un ICS mayor que SDC_{sg}, este último presentó mayor rendimiento, con un mayor peso de grano. Esto no tiene una explicación lógica ya que SDC_{sg} presentó propiedades del suelo menos deseadas, como niveles menores de pH-KCl, lo que podría determinar la presencia de Al intercambiable. Por lo tanto, el mayor rendimiento, podría explicarse por un posible efecto “rotación de cultivos”. Este tratamiento se diferencia del resto por poseer menor frecuencia de soja, lo que podría generar un mejor estado sanitario.

LCP resultó en un ICS intermedio, caracterizado por una baja Rp-m (392 kg/cm²) y una alta Rp-20/m (0,40) lo que implicaría una mayor uniformidad del perfil. Esto sería producto del LC que al romper la estructura dejaría el suelo menos compacto, lo cual facilitaría el desarrollo radicular dado por esta menor resistencia en profundidad. Cabe destacar que el LC se dejó de realizar solamente hace tres cultivos.

Por último, se identificó que la realización de cultivos continuos bajo SD, con predominancia de soja como cultivo de verano y la realización o no de barbecho invernal, generó la peor calidad de suelo. Esto se debe a que dichas HMS presentaron los valores menos deseados de las variables consideradas en este estudio. La causante de esto sería la alta frecuencia del cultivo de soja que se caracteriza por generar balance negativo de nutrientes, y que a su vez realiza bajo aporte de residuos y de rápida descomposición.

Las HMS que presentaron los peores valores del ICS fueron las que tuvieron los valores de INF-2-DR más bajos (entorno a 42,5 l/h/m²). Estas se caracterizaron por poseer alta frecuencia de soja (SDC_{sj-bch} y SDC_{sj}) y laboreo (LCP) lo cual afectaría negativamente las propiedades físicas del suelo. La menor INF-2-DR de estas HMS implicaría una menor capacidad de aprovechar las altas precipitaciones de la zafra, y provocaría que el cultivo tuviera menor volumen de agua disponible.

A partir de este resultado sería posible afirmar que la historia de manejo del suelo determinó diferentes calidades del mismo y que esta fue limitante del rendimiento en soja. Además, estas restricciones no podrían ser eliminadas por mayor agregado de nutrientes.

Una mayor proporción de la variación del rendimiento en soja a partir del ICS podría ser explicada por la inclusión de otras variables del suelo, no consideradas en este trabajo. Algunas de ellas podrían ser por ejemplo,

densidad aparente, estabilidad de agregados, tamaño de agregados, micronutrientes, textura, entre otras.

4.5 DATOS DE CHACRA

4.5.1 Análisis de componentes principales

En el cuadro No. 15 se presenta el resultado del ACP considerando las propiedades físicas (Ce, Rp-m, Rp-20mm y Rp-20/m) y químicas (Na, Mg, Ca, pH-KCl, COS0-20 y CIC) disponibles para cada sitio y sin contemplar los resultados del análisis de P y K en suelo.

Cuadro No. 15. Análisis de componentes principales con las variables: Na, Mg, Ca, pH-KCl, COS0-20, CE, CIC, Rp-m, Rp-20mm y Rp-20/m.

Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	3,66	0,37	0,37
2	3,1	0,31	0,68
3	1,2	0,12	0,80
4	0,96	0,1	0,89
5	0,4	0,04	0,93

Cuadro No. 16. Correlación con las variables originales

Variables	CP 1	CP 2	CP 3
Na	-0,59	-0,17	-0,47
Mg	0,80	0,24	-0,34
pH-KCl	-0,67	0,56	-0,04
COS0-20	-0,61	0,09	0,69
CE	-0,34	-0,92	-0,01
CIC	0,02	0,97	0,03
Rp-m	0,79	0,18	-0,23
Rp-20mm	0,78	-0,03	0,42
Rp-20/m	-0,63	0,07	-0,4
Ca	-0,29	0,93	0,01

Reteniendo los primeros tres componentes (siguiendo los criterios de Wander y Bollero, 1999) se explicó el 80% de la variación, con una correlación cofonética de 91,6%. Los R^2 parciales de los CP1, CP2 y CP3 fueron 0,37, 0,31 y 0,12, respectivamente.

En el CP1 las variables que tuvieron coeficiente más positivo fueron Mg, Rp-m y Rp-20mm, y negativo el pH-KCl, Rp-20/m y COS0-20. En el CP2 las variables que tuvieron mayor peso fueron CIC y Ca, afectándolo positivamente, y EC, afectándolo negativamente. Por último, el CP3 tuvo un coeficiente alto y positivo para la variable COS0-20, y alto y negativo para Na.

El análisis de regresión de los CP con el Rend-no-lim se relacionó significativamente únicamente con el CP1 (p-valor= 0,0629) y la Dif-rend se relacionó con el CP1 y el CP3 (p-valor= 0,0861 y 0,0393 respectivamente). Por otro lado, el Rend-act no se relacionó con ningún CP.

4.5.2 Construcción del índice de calidad de suelo

Se construyó un ICS a partir de los componentes principales 1 y 3 ya que fueron los únicos que se relacionaron con el rendimiento.

Cuadro No. 17. Índice de calidad de suelo para cada chacra

Punto	ICS
Situación 4	4,01
Situación 2	2,54
Situación 8	2,38
Situación 7	2,33
Situación 10	1,81
Situación 9	1,63
Situación 6	1,21
Situación 3	1,13
Situación 5	0,86
Situación 1	0,81

El ICS construido fue capaz de detectar diferencias entre las chacras analizadas ya que tomó valores entre 0,81 (peor calidad) y 4,01 (mejor calidad). Dichas diferencias fueron explicadas principalmente por propiedades físicas del suelo, debido a que en el CP1 las variables que más peso tuvieron fueron Rp-m, Rp-20mm y Rp-20/m entre otras. Además algunas propiedades químicas tomaron alto peso relativo en estos CP, destacándose el COS0-20, Mg y pH-KCl.

En la figura No. 14 se presenta la relación entre el ICS y los rendimientos.

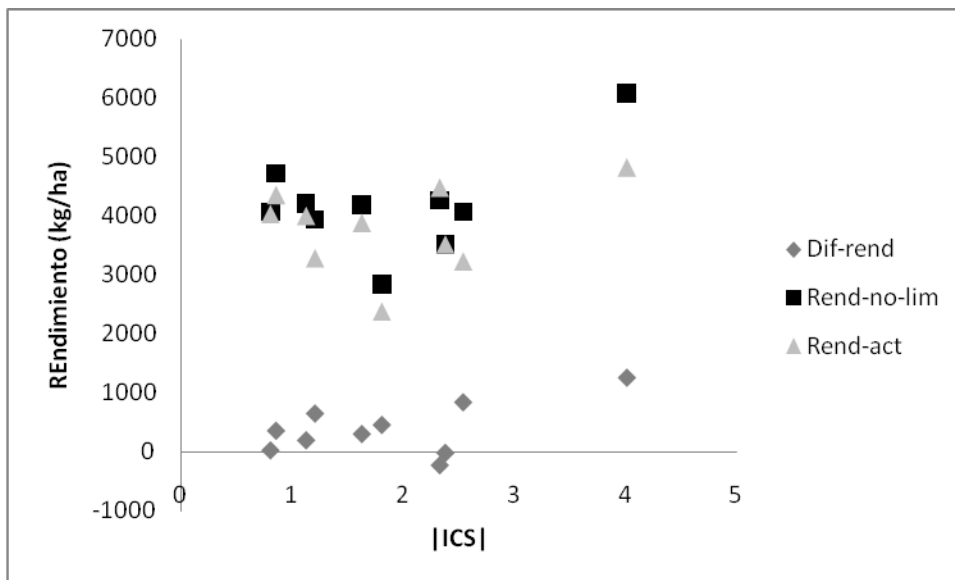


Figura No. 14. Rendimientos en función del índice de calidad de suelo

Si bien hubo una relación entre el CP1 y CP3 con Rend-no-lim y Dif-rend, no se encontró una tendencia clara con el ICS. Al no contar con valores de ICS comprendidos entre 2,5 y 4, no se puede afirmar que ICS mayores a 2,5 estén asociados a rendimientos mayores a 4000 kg/ha.

El punto de ICS igual a 4 podría estar evidenciando la existencia de una relación positiva entre el ICS y el rendimiento, para lo cual sería necesario contar con valores de ICS en el rango mencionado anteriormente. Esto podría ser logrado mediante el análisis de un mayor número de chacras.

La ausencia de tendencias claras, también podría ser explicada por la existencia de otras fuentes de distorsión tales como: fecha de siembra, cultivares, manejos de fertilización, control de los factores reductores del rendimiento, rotación, entre otras. Un ICS debería tener la capacidad de discriminar situaciones con al menos Rend-no-lim contrastantes aun en situaciones en que el manejo no fuera estrictamente comparable, de manera de ser una herramienta de utilidad para la selección de chacras.

Las características de plasticidad del cultivo de soja más las condiciones hídricas favorables durante el período crítico de definición del rendimiento (R2-R6), pueden ser la causa de la falta de respuesta a variaciones del ICS.

4.6 PREGUNTAS SIN RESPONDER

En este capítulo se dejan planteadas algunas preguntas que quedan sin responder y podrían ser el objetivo de futuros trabajos.

Dado que este estudio se llevó a cabo durante una zafra atípicamente lluviosa, la primera pregunta que surge es ¿cuál hubiese sido la respuesta en rendimiento del cultivo al ICS si el año hubiese sido normal, o en contraste, seco?

Los niveles de los nutrientes varían considerablemente según tipo de suelo e historia de chacra. Dado que en este estudio los niveles de nutrientes estuvieron entorno a los niveles de suficiencia, la pregunta sería ¿cuál hubiese sido el resultado de este estudio si los hubiesen presentado niveles de nutrientes inferiores a los críticos?

Se plantea la existencia de otras variables del suelo que no fueron medidas en este trabajo y que podrían contribuir en la definición del ICS. Entonces, ¿se podría mejorar el ajuste del modelo que relaciona al rendimiento en soja con el ICS al haber incluido otras variables, tales como estabilidad de agregados, densidad aparente, espesor del horizonte A, entre otras?

Por último, en lo que respecta al estudio de chacras, ¿hubiese sido posible encontrar una relación entre el ICS construido y el rendimiento en soja a nivel comercial, de haber contado con valores de ICS en el rango de 2,5 a 4?

5. CONCLUSIONES

Se encontraron diferencias en las propiedades físicas y químicas del suelo explicadas por la historia de manejo del mismo.

La historia de manejo del suelo determinó diferencias en el rendimiento en soja, las cuales no pudieron ser corregidas a través del manejo nutricional del cultivo, por lo que no existió brecha de rendimiento por nutrientes.

Se identificó un grupo de variables que permitió la construcción de un índice de calidad de suelo, que muestra diferencias significativas entre distintas historias de manejo del mismo.

Existió una regresión lineal del rendimiento en soja con el índice de calidad de suelo ($R^2=0,65$), donde un aumento en una unidad del índice generó un aumento en el rendimiento de 109 kg/ha.

Al estudiar datos de chacras de productores, se construyó un índice que permitió captar diferencias entre los suelos, pero no permitió identificar una tendencia clara con los rendimientos. Dentro de las chacras estudiadas, la brecha de rendimiento atribuida a nutrientes varió entre -217 y 1257 kg/ha, sin relacionarse con el ICS.

6. RESUMEN

La agricultura uruguaya ha tenido un gran crecimiento en la última década, siendo el principal responsable de este aumento el cultivo de soja. Este incremento se ha basado en la intensificación de la zona tradicionalmente agrícola y la expansión hacia zonas marginales. Conocer los factores limitantes del rendimiento y la magnitud en que cada uno influye sobre el mismo, es fundamental para implementar medidas de manejo tendientes a acortar la brecha de producción existente entre el rendimiento alcanzable (RA) de soja en Uruguay y el obtenido a nivel comercial. En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la calidad del suelo definida por la historia de manejo del mismo, como determinante de dicha brecha. Para esto se construyó un índice de calidad de suelo (ICS) empleando variables del suelo, y se lo relacionó con el rendimiento en soja, bajo distintos manejos de fertilización (MF). La historia de manejo del suelo (HMS) determinó diferencias en el rendimiento en soja, las cuales no pudieron ser corregidas a través del manejo nutricional del cultivo. Existió una regresión lineal del rendimiento con el ICS ($R^2=0,65$), donde un aumento en una unidad del índice generó un aumento en el rendimiento de 109 kg/ha. Además se evaluaron cultivos comerciales de soja de segunda, donde se construyó un ICS y se lo relacionó con el rendimiento con fertilización residual no limitante (Fert-no-lim), rendimiento con criterios actuales de fertilización (Rend-act) y con la diferencia entre dichos rendimientos (Dif-rend). En esta instancia, el ICS construido permitió captar diferencias entre los suelos, pero no identificar una tendencia clara con los rendimientos.

Palabras clave: Soja; Brecha de rendimiento; Manejo del suelo; Calidad de suelo; Índice de calidad de suelo.

7. SUMMARY

Uruguay's agriculture has had an important growth in the last decade, being the soybean cultivation, the main responsible for it. This increase was based on the intensification of the traditional agricultural region and the expansion into marginal areas. Knowing the yield limiting factors and the magnitude in which each factor influences on it, is essential to implement management measures designed to bridge the gap existing between the achievable soybean yield (RA) in Uruguay and the one obtained commercially. In this context, the aim of this study was to evaluate the effect of soil quality defined by the history of soil management as a determinant of that gap. For this purpose, a soil quality index (ICS) was built, using soil variables, and it was related to the soybean yield under different fertilizer managements (MF). The history of soil management (HMS) determined differences in soybean yield, which could not be corrected through nutritional crop management. There was a linear regression between yields and |ICS| ($R^2 = 0.65$), where one unit increase of the index generated a yield growth of 109 kg / ha. Furthermore, commercial soybean crops were analyzed, where a ICS was built and it was related to non-limiting residual fertilization yield (Fert-no-lim), to current criteria fertilization yield (Rend-act) and to the difference between those yields (Diff-rend). In this instance, the ICS built, allowed to capture differences between soils, but not to identify a clear trend in yields.

Keywords: Soybean; Yield gap; Soil management; Soil quality; Soil quality index.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Andrews, S. S.; Karlen, D. L.; Mitchell, J. P. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Enviroments*. no. 90: 24-45.
2. Andriani, J. M. 2002. Estrés hídrico en soja. (en línea). *IDIA XX*. no. 3: 48-51. Consultado 09 mar. 2014. Disponible en <http://www.biblioteca.org.ar/libros/210905.pdf>
3. Aparicio, V.; Costa, J. L. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. Balcarce, Unidad Integrada/Universidad. Facultad de Ciencias Agrarias/ INTA Balcarce. pp. 155-165.
4. Arias, N.; De Battista, J. J. 2003. Fertilización de soja en vertisoles. *In: Jornada Nacional de Soja (2003, Mercedes, Soriano)*. Memorias. s.n.t. pp. 77-82.
5. Barbazán, M.; Bautes, C.; Beux, L.; Bordoli, M.; Cano, J.; Ernst, O., García, A.; García, F.; Quincke, A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelo. *Agrociencia (Montevideo)*. 15 (2): 93- 99.
6. Bautes, C.; Barbazán, M.; Beux, L. 2010. Respuesta a potasio en cultivos extensivos en suelos de Soriano. *In: Jornada Técnica; el Efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de cultivos (2010, Mercedes, Soriano)*. Memorias. Montevideo, INIA. pp. 31-36 (Actividades de Difusión no. 605).
7. Berger, A. 2013. Rendimiento potencial. ¿Cuál es el techo para Uruguay?. *In: Jornada Objetivo 4 Mil ¿Qué nos falta? (2013, Colonia del Sacramento, Colonia)*. Trabajos presentados. Colonia del Sacramento, INIA. s.p.
8. Bidegain, A. 2012. Cuantificación de la repuesta en rendimiento en grano en el cultivo de soja en función de la capacidad de almacenaje de agua del suelo, contenido de agua inicial y distribución de precipitaciones durante el ciclo del cultivo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 34 p.

9. Cantú, M. P.; Becker, A.; Bedano, J. C.; Schiavo, H. F. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 25(2): 173-178.
10. Centurión, H.; Chinazzo, M.V. 2012. Rendimiento alcanzable en trigo en función de los años de agricultura; relevamiento de chacras. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 65 p.
11. Cruzate, G.; Casas, R. 2003. Balance de nutrientes. *INTA. Revista Fertilizar*. no. 8: 7-13.
12. Del Pino, A. 2012. Acidez de suelos y encalado. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. 11 p. Consultado 1º. set. 2014. Disponible en http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/curso/docs/acidez_encalado_impr.pdf
13. Fischer, R. A.; Edmeades, G. O. 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Science*. no. 50: 85-98.
14. García, F.; Picone, L. 2004. Fósforo; dinámica y manejo en sistemas de siembra directa. *Informaciones Agronómicas*. no. 55: 1-5.
15. _____. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo. *Informaciones Agronómicas*. no. 27: 1 – 7.
16. Giménez, L.; García, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano en dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Montevideo)*. 15 (2): 100-108.
17. _____. 2014. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia (Montevideo)*. 18 (1):53-64.
18. González, N. 2006. Fijación de nitrógeno en soja; situación actual y perspectiva en Argentina. *In: Congreso de la Soja del Mercosur (3º., 2006, INTA Balcarce)*. Trabajos presentados. s.n.t. pp. 10-13.
19. Hoffman, E., Ernst, O. 2007 Diagnóstico del manejo de la fertilización en cultivos de secano en Uruguay. *In: Seminario Internacional de Nutrición Vegetal (2007, Paysandú)*. Criterios para la fertilización de cultivos y pasturas. s.n.t. s.p.

20. Jiang, P.; Thelen, K. 2004. Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north-central corn-soybean cropping system. *Agronomy Journal*. 96: 252 - 258.
21. Kantolic, A. 2003. Bases funcionales de la determinación del rendimiento y manejo del cultivo de soja. *In*: Satorre, E. H. ed. *El libro de la soja*. Buenos Aires, AR, SEMA/CREA/AAPRESID. pp. 29-38.
22. Kravchenko, A. N.; Bullock, D.G. 2000. Spatial variability. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*. 92: 75-83.
23. Lobell, D. B.; Cassman, K. G.; Field, C. B. 2009. Crop yield gaps; their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*. 34(1): 179.
24. Manna, M. C.; Swarup, A.; Wanjari, R. H.; Mishra, B.; Shahi, D. K. 2007. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil and Tillage Research*. 94: 397–409.
25. Manlla, A.; Salvagiotti, F. 2011. Explorando brechas de producción y rendimiento potencial en soja: oferta de recursos y máximos rendimientos alcanzables en condiciones de campo. *In*: Congreso de la Soja del Mercosur (5º., 2011, INTA Oliveros). Para mejorar la producción. s.l., INTA. pp. 61-66.
26. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2006. Anuario estadístico 2005. s.p.
27. _____. _____. 2014. Anuario estadístico 2013. 270 p.
28. Molfino, J.; Califra, A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay; segunda aproximación. Montevideo, MGAP. División Suelos y Aguas. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. 12 p.
29. Otaño, C.; Zarucki, I. 2010. Impacto de distintos niveles de fertilidad y atributos del terreno sobre la variabilidad de rendimiento del cultivo de soja a escala de chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 107 p.

30. Paustian, K.; Collins, H.P.; Paul, E.A. 1997. Management controls on soil carbon. *In*: Paul, E. A.; Paustian, K.; Elliot, E.T. Cole, V.V. eds. Soil organic matter in temperate agroecosystems; long-term experiments in North America. Boca Raton, FL, USA, CRC. pp. 15-49.
31. Salvagiotti, F. 2009. Manejo de soja de alta producción. INTA. Para mejorar la producción. no. 42: 57-62.
32. _____; Enrico, J. M.; Bodrero, M.; Bacigaluppo, S. 2010. Producción de soja y uso eficiente de los recursos. INTA. Para mejorar la producción. no. 45: 151-154.
33. Terra, J. A.; Melo, D.; Sawchik, J. 2010. Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimientos de cultivos agrícolas en Uruguay. *In*: Taller Internacional Sociedad Uruguay Ciencia Suelo ISTRO (2010, Colonia). Trabajos presentados. Colonia, SUCS. p. irr.
34. _____; Pravia, V.; Roel, A. 2010. Impacto de la intensidad de uso del suelo y la variación del terreno sobre la productividad del cultivo de soja. *In*: Reunión Técnica (1a., 2010, Colonia del Sacramento, Colonia, Uruguay). Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Montevideo, Sociedad Uruguaya de Ciencias del Suelo / International Soil and Tillage Research Organization. pp. 18-27.
35. Van Ittersum, M. K.; Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*. 52(3): 197-208.
36. Wander, M. M.; Bollero, G. A. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*. 63: 961-971.
37. Zhang, R. 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* no. 61: 1024-1030.