

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**IDENTIFICACIÓN DE FACTORES LIMITANTES DEL
RENDIMIENTO DE UNA SECUENCIA DE CULTIVOS**

por

Pilar ETCHEGOIMBERRY DALL'ORSO

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Vegetales

MONTEVIDEO
URUGUAY
Junio 2019

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (PhD.) Santiago Dogliotti, Ing. Agr. (PhD.) José Terra y Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli el 11 de junio de 2019.
Autora: Ing. Agr. Pilar Etchegoimberry. Director: Ing. Agr. (Dr.) Oswaldo Ernst

AGRADECIMIENTOS

A Oswaldo, por haberme recibido la infinidad de veces que golpeé su puerta, siempre dispuesto a ayudarme a esclarecer mis inquietudes.

A Ramiro, Rocío e Ignacio, por su ayuda en la recolección y procesamiento de muestras.

Al grupo interdisciplinario de amigos, por acompañarme y alentarme durante todas las etapas de este trabajo, y por enseñarme a ver las cosas desde otros puntos de vista.

A Joaquín, por todo.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN	VII
SUMMARY	VIII
1 <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 BRECHA DE RENDIMIENTO DE UNA SECUENCIA DE CULTIVOS .	2
1.2 FACTORES QUE DETERMINAN LA BRECHA DE RENDIMIENTO ...	4
1.3 HIPÓTESIS	6
1.4 OBJETIVOS.....	6
2 <u>SOIL PROPERTIES AS YIELD LIMITING FACTORS ON A CROPPING SEQUENCE</u>	8
2.1 ABSTRACT	8
2.2 INTRODUCTION	9
2.3 METHODOLOGY	12
2.3.1 <u>Site description</u>	12
2.3.2 <u>Measurements</u>	13
2.3.3 <u>Data analysis</u>	14
2.3.3.1 Sequence average yield.....	14
2.3.3.2 Identification of yield limiting factor and yield gap.....	14
2.4 RESULTS.....	15
2.4.1 <u>Boundary-line analysis of sequence average yield response</u>	16
2.4.2 <u>Yield gap prediction</u>	19
2.4.3 <u>Boundary-line analysis of each crop yield</u>	21

2.5	DISCUSSION	22
2.6	ACKNOWLEDGMENTS.....	25
2.7	REFERENCES.....	25
3	<u>FACTORES DETERMINANTES DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL RENDIMIENTO DE UNA SECUENCIA DE CULTIVOS</u>	30
3.1	ABSTRACT	30
3.2	RESUMEN.....	31
3.3	INTRODUCCIÓN.....	32
3.4	MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.4.1	<u>Sitio experimental</u>	34
3.4.2	<u>Determinaciones</u>	36
3.4.3	<u>Delimitación de zonas de rendimiento</u>	36
3.4.4	<u>Factor limitante del rendimiento</u>	38
3.4.5	<u>Análisis de datos</u>	38
3.4.5.1	Análisis de correspondencia entre zonas de rendimiento y propiedades del suelo limitantes	38
3.4.5.2	Análisis de correlación.....	39
3.4.5.3	Análisis de componentes principales.....	39
3.4.5.4	Impacto de la descompactación mecánica sub_superficial sobre la resistencia a la penetración.....	40
3.5	RESULTADOS	40
3.5.1	<u>Zonas de rendimiento</u>	40
3.5.2	<u>Correspondencia entre zonas identificadas por propiedades limitantes del rendimiento y las identificadas por rendimiento medio y variabilidad temporal</u>	42
3.5.3	<u>Zonas de rendimiento y atributos topográficos</u>	46

3.5.4	<u>Zonas de rendimiento, propiedades de suelo y atributos topográficos</u>	47
3.5.5	<u>Descompactación sub superficial</u>	48
3.6	DISCUSIÓN.....	49
3.7	CONCLUSIONES.....	52
3.8	AGRADECIMIENTOS.....	52
3.9	BIBLIOGRAFÍA.....	53
4	<u>DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES</u>	57
5	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	61

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo fueron: (i) cuantificar la brecha de rendimiento (Y_g) de una secuencia de cultivos; (ii) identificar que propiedades la determinan y en que rango de valores, e (iii) identificar zonas homogéneas definidas por el rendimiento de la secuencia de cultivo y su variabilidad temporal, y relacionarlas con los factores limitantes del rendimiento. Se utilizó información de un experimento instalado en una chacra comercial, la cual estuvo en agricultura continua sin labranza durante aproximadamente 15 años. Los tratamientos correspondieron a siembra sin labranza y descompactación mecánica sub superficial, generando un gradiente de resistencia mecánica a la penetración (RP) del suelo que, combinada con la historia de manejo, (años de agricultura) y variabilidad natural del suelo, generó variabilidad en las propiedades físicas y químicas. Se realizó muestreo de suelo en 168 puntos, se determinaron atributos topográficos, y se determinó el rendimiento de tres cultivos sucesivos: soja, cebada y maíz. Relacionando las propiedades de suelo con el rendimiento de la secuencia a través del análisis de curva envolvente y considerando la ley del mínimo se identificaron las propiedades determinantes de la Y_g . En el 40% del área el COS limitó el rendimiento alcanzado. Para RP, P y relación de bases ((Ca+Mg)/K)) la superficie fue de 26, 24 y 10% respectivamente. Por encima de 3,4% el COS no limitó el rendimiento. Para RP por debajo de 1300 kPa no se comportó como propiedad limitante. La Y_g promedio producto de las propiedades de suelo fue de 0,162 expresada como rendimiento promedio de la secuencia, lo que equivalió a 0,4, 0,7 o 1,3 Mg/ha de soja, cebada o maíz respectivamente. Considerando la variabilidad temporal del rendimiento se determinaron 4 zonas de rendimiento diferencial: estable y alto (EA), estable y bajo (EB), inestable y alto (IA) e inestable y bajo (IB). Las propiedades limitantes del rendimiento no se relacionaron directamente con estas zonas de rendimiento. Estas propiedades se relacionaron con el nivel de rendimiento, mientras la topográfica fue quien explicó mayormente la variabilidad temporal, sobre todo en el caso de la variabilidad en rendimientos bajos (zona IB).

Palabras clave: agricultura continua, compactación de suelo, regresión de cuantiles.

IDENTIFICATION OF YIELD LIMITING FACTORS FOR A CROPPING SEQUENCE

SUMMARY

The objectives of this research were to: (i) quantify the yield gap (Yg) of a cropping sequence; (ii) identify which soil properties determine Yg and in what range of values, and (iii) identify homogeneous zones defined by the average sequence yield and its temporal variability, and relate them to yield limiting factors. We used information from an on-farm trial, which had been under no-till continuous cropping during fifteen years. Treatments corresponded to no-tillage and deep ripping tillage, generating a mechanical resistance to soil penetration (RP) gradient which, combined with the management history (years of agriculture) and natural soil variability, generated variability in physical and chemical properties. Soil sampling was carried out in 168 points, topographic attributes were determined, and yield of three successive crops was determined: soybean, barley and maize. By relating soil properties with average sequence yield, through boundary line analysis and considering the law of the minimum, we identified yield limiting soil properties. On 40% of the studied area SOC was identified as the limiting factor. PR, P and (Ca+Mg)/K relationship appeared in the 26 %, 24 % and 10 % respectively. Above 3.4% COS did not limit the yield. For RP, below 1300 kPa it did not behave as a limiting factor. The average Yg as consequence of the soil properties was 0.162 expressed as the average sequence yield, equivalent to 0.4, 0.7 or 1.3 Mg / ha of soybean, barley or maize respectively. Considering yield temporal variability, 4 zones of differential yield were determined: high and stable (HS), low and stable (LS), high and unstable (HU) and low and unstable (LU). The yield limiting properties were not directly related to these yield zones. Yield limiting factors explained yield level, while topographic attributes explained temporal variability, especially in the case of high variability in low yields (zone LU).

Keywords: continuous cropping, soil compaction, quantile regression.

1 INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda de alimentos y energía esperado para el 2050 requiere aumentar la producción agrícola. 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 y Godfray, 2012). Dos de las estrategias planteadas para lograr este incremento de producto por unidad de superficie son: i) la intensificación en el uso del área cultivada, sembrando 2 o 3 cultivos por año, y ii) la disminución de la brecha de rendimiento de cada cultivo (Bruinsma, 2009). Para el caso de Uruguay, donde las condiciones agroecológicas permiten producir dos cultivos por año, sería posible combinar ambas estrategias. Sin embargo, la implementación de la primera opción, si bien aumenta el rendimiento de la secuencia, en general se asocia con menores rendimientos de los cultivos individuales (Hochman et al., 2014, Fletcher et al., 2011).

Los sistemas de cultivos que incluyen más de un cultivo por año maximizan la interceptación y el uso de la radiación. En contrapartida, implican un efecto negativo en cuanto a momentos de siembra, ya que la duración del ciclo del primer cultivo conlleva a una siembra tardía del cultivo siguiente (Fletcher et al., 2011). Como consecuencia, el período de crecimiento no coincide con las mejores condiciones de oferta de radiación y temperatura, generando una disminución del rendimiento potencial del segundo cultivo. Por lo tanto, en estos esquemas existe una brecha de rendimiento producto de una práctica de manejo impuesta por el propio sistema de producción.

En este contexto surge la interrogante de cómo conciliar las alternativas propuestas para aumentar la producción, es decir cómo minimizar la brecha de rendimiento de los cultivos, cuando estos son parte de sistemas intensificados. Para

ello es necesario cuantificar la magnitud de la brecha de todo el sistema de cultivo e identificar los factores que la provocan.

1.1 BRECHA DE RENDIMIENTO DE UNA SECUENCIA DE CULTIVOS

Cuantificar la brecha de rendimiento implica necesariamente comparar el rendimiento obtenido contra cierto nivel de referencia. En el esquema propuesto por Evans (1993) el rendimiento potencial (Y_p) es definido como el rendimiento de un cultivar creciendo en condiciones de agua y nutrientes no limitantes, y en ausencia de condiciones de estrés biótico (malezas, plagas y enfermedades). El Y_p es estimado mediante modelos de simulación, por tanto, para una secuencia sería la suma del Y_p de cada cultivo, para las condiciones de crecimiento de cada uno. Fischer y Edmeades (2010), proponen considerar que el rendimiento alcanzable es aquel obtenido por los productores con la mejor tecnología disponible, y éste es la referencia para comparar el rendimiento promedio obtenido en cada unidad de producción.

En el presente trabajo se plantea como estrategia para abordar el problema, trabajar a una escala aún más reducida de análisis, estudiando una situación particular de modo sitio-específico. Para una determinada chacra, en la que los factores determinantes del rendimiento (radiación, temperatura, oferta hídrica) son iguales, el rendimiento alcanzable de referencia podría ser el sitio donde se alcanza el máximo rendimiento. Por tanto, la brecha de rendimiento sería la diferencia entre este rendimiento máximo y el rendimiento obtenido en cada sitio específico de la chacra (Figura 1.1).

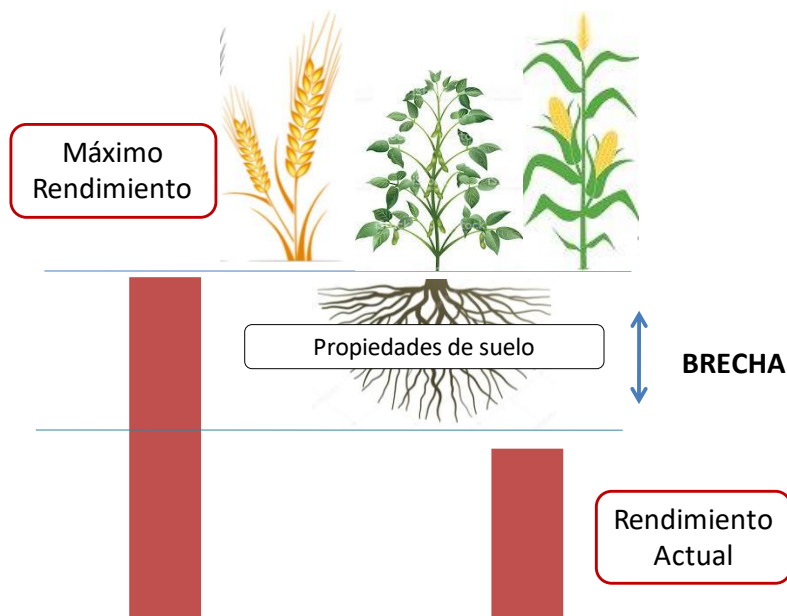


Figura 1.1: Marco conceptual para la estrategia de investigación.

Analizar la brecha de rendimiento de una secuencia de cultivos compuesta por distintas especies creciendo sucesivamente a través del tiempo, trae aparejados ciertos desafíos. En primer lugar, es necesario definir cuál es el rendimiento global del sistema de cultivo. Guilpart et al. (2017) proponen para evaluar sistemas que integran diferentes especies (utilizadas en distintas intensidades y con distinto arreglo temporal) transformar los rendimientos a unidades de energía producida por unidad de área y tiempo. Para ello es necesario conocer el índice de cosecha, la producción de materia seca y el contenido de energía de cada cultivo. La principal desventaja de esta metodología es que la diferencia de biomasa producida por cada especie genera que aquellos cultivos de mayor producción, representen una mayor proporción del rendimiento global del sistema. Como alternativa otros autores (Blackmore et al., 2003, Joensgard y Halmoe, 2003) plantean transformar el rendimiento de cada cultivo en función del promedio de cada uno de ellos, y trabajar con valores estandarizados.

A su vez, estudiar esquemas que cuentan con varios cultivos sucesivos en el tiempo implica necesariamente estudiar el comportamiento de los rendimientos a

través del tiempo y su variación (Guilpart et al., 2017). Por esta razón, los trabajos que analizan el rendimiento de todo un sistema, en general determinan ambientes según el comportamiento del sistema en cuanto al nivel de rendimiento y a su varianza temporal (Blackmore et al., 2003, Joensgard y Halmoe, 2003). Para determinar esta última, Blackmore et al. (2003) proponen calcular la varianza del rendimiento para cada sitio dentro de la chacra. Dependiendo de este valor de varianza se clasifican zonas según si a través de los años son “estables”, es decir rinden cerca de la media independientemente del año y del cultivo, o si son “inestables”, cuando algunos años (o cultivos) rinden por encima de la media y otros por debajo.

1.2 FACTORES QUE DETERMINAN LA BRECHA DE RENDIMIENTO

Para una condición dada, el Yp está definido por la oferta de radiación y temperatura, por lo que las propiedades y atributos del suelo donde se producen los cultivos, no operan como un factor. Sin embargo, si dos sitios difieren en sus propiedades de suelo, la interacción de estas con el clima genera un rendimiento alcanzable diferente (Ernst et al., 2018). Trabajando a escala de chacra, los factores determinantes del rendimiento (radiación, temperatura, agua y nutrientes agregados) son iguales, por lo que es posible considerar que la variabilidad espacial del rendimiento obedece a diferencias en la captura y el uso de esos recursos, lo cual va a estar determinado por las propiedades de suelo de cada sitio (Bakhsh et al., 2000) (Figura 1.1).

La variabilidad espacial de las propiedades de suelo dentro de una misma chacra está gobernada por diferencias en el tipo de suelo, distinta posición en el paisaje, o por la ocurrencia de procesos de degradación producto del manejo de cada sitio por ejemplo, erosión, compactación, salinización (Pierce y Nowak, 1999).

El cambio en uso y manejo del suelo implementado en Uruguay y la región en los últimos 15 años implicó la sustitución de sistemas integrados de cultivos anuales con pasturas perennes por sistemas de agricultura continua sin labranza dominados por el cultivo de soja (Wingeyer et al., 2015, Franzluebbbers et al., 2014).

El cambio generó procesos de degradación del suelo variables dentro de chacra, incrementando la variabilidad espacial de los rendimientos. Varios autores han demostrado los cambios en las propiedades de suelo producto del cambio de sistema, destacando la disminución en macroporosidad y el tamaño de agregados, pérdida de carbono orgánico, y el aumento de la densidad aparente (Ernst y Siri, 2011, Moron et al., 2010, Aparicio y Costa, 2007). Además, en los últimos años surgieron evidencias de cambios en la estructura del suelo como la mayor proporción de estructuras laminares resultantes de sistemas agrícolas bajo siembra directa con alta proporción de soja dentro de la secuencia (Sasal et al., 2016). Este proceso de degradación de la calidad del suelo genera un escenario en el que la compactación ha sido identificada como una de las principales causas de pérdidas de rendimiento de los cultivos en sistemas bajo siembra directa (Botta et al., 2007, Hamza y Anderson, 2005). La compactación de suelo es un proceso complejo que involucra cambios en propiedades físicas de suelo (densidad aparente, porosidad) que a su vez son determinantes de propiedades químicas del suelo (Nawaz et al., 2013). Modifica indirectamente el crecimiento por sus efectos sobre el agua disponible (Rubio et al., 2018, Sadras et al., 2005), la concentración del CO₂ (Conlin y Van den Driessche, 2000) y la mineralización del carbono orgánico del suelo y de nitrógeno (De Neve y Hofman, 2000).

Las propiedades físicas y químicas del suelo se encuentran estrechamente relacionadas (Aparicio y Costa, 2007, Andrews et al., 2002), por tanto, identificar la propiedad responsable de la brecha de rendimiento implica un problema metodológico. En esta Tesis se plantea como alternativa para resolverlo trabajar con la lógica planteada por von Liebig (1855) en la ley del mínimo, la cual indica que el rendimiento de los cultivos va a estar limitado por aquel factor de crecimiento que se encuentre en menor proporción. Aplicando este concepto tanto sobre propiedades químicas como físicas podría identificarse aquella característica del suelo que se encuentra limitando el rendimiento y por tanto provocando la brecha de rendimiento. De la misma forma, identificando aquellas propiedades relacionadas con la

variabilidad temporal, podría identificarse a partir de que umbrales las propiedades incrementan la variabilidad temporal del rendimiento.

1.3 HIPÓTESIS

Este trabajo se basó en las siguientes hipótesis:

1. Existe variabilidad de rendimiento intra-chacra, lo que responde a la existencia de variabilidad en las propiedades funcionales del suelo siguiendo la ley Liebig (del factor limitante).

2. Es posible identificar valores críticos en propiedades físicas y químicas del suelo a partir de los cuales dichas propiedades actúan como limitantes del rendimiento, disminuyendo el rendimiento máximo de toda una secuencia, y aumentando la variabilidad temporal del rendimiento.

3. En el mediano plazo los sistemas de cultivos continuos sin labranza generan un proceso de compactación que se transforma en un factor restrictivo del rendimiento.

4. La distribución espacial de estas propiedades permite identificar zonas de la chacra que comparten los factores limitantes del rendimiento, lo que permitiría implementar estrategias de manejo sitio_específico del cultivo y/o del suelo.

1.4 OBJETIVOS

Los objetivos fueron:

1. Cuantificar la brecha de rendimiento de una secuencia de cultivos.

2. Identificar valores mínimos/máximos óptimos para propiedades físicas y químicas del suelo a partir de los cuales disminuyen las diferencias de rendimiento (máximo – actual) y la variabilidad temporal del mismo, a escala comercial.

3. Identificar zonas homogéneas dentro de chacras definidas por el rendimiento de la secuencia de cultivo y su variabilidad temporal y relacionarlas con los factores limitantes del rendimiento.

Los objetivos fueron desarrollados en dos artículos científicos. El primero de ellos redactados según las normas de la revista *Field Crops Research* y el segundo según las normas de la revista *Agrociencia Uruguay*.

2 SOIL PROPERTIES AS YIELD LIMITING FACTORS ON A CROPPING SEQUENCE.

Etchegoimberry P.^A, Ernst O.^A

^A Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Universidad de la República, Ruta 3, km 363, Paysandú 60000, Uruguay.

2.1 ABSTRACT

To satisfy increasing food and energy demand it is necessary to improve crop yield and increase cropping intensity. To accomplish this, it is necessary to quantify yield gap (Yg) between actual, attainable and potential yield, and identify its causes through intensive systems. Yield spatial variability within a field cannot be explained by defining factors (radiation, temperature and genetic) or limiting factors (rain or fertilization). We assumed that it is explained by differences in soil properties due to the presence of soil degradation processes. Our hypothesis was that grain yield spatial variability responds to soil properties variability in accordance with the Law of Minimum proposed by von Liebig (1855). The objective of this study was to identify soil chemical and physical properties (detect minimum and maximum values) responsible for the difference between maximum and actual yield for a cropping sequence. To include physical variability, we used information from an on-farm trial of deep ripping tillage. Crop sequence consisted of soybean (*Glycine max*), barley (*Hordeum vulgare*) and maize (*Zea mays*). Through boundary line analysis, we identified yield limiting factors. Soil organic carbon and penetration resistance appeared as limiting factors on 66% of the area. Yield gap produced by each soil property, estimated as standardized sequence average yield was 0.4, 0.7 and 1.3 Mg/ha for soybean, barley and maize respectively, which corresponded approximately to 15% of the average yield of each crop.

Keywords: agriculture, continuous cropping, quantile regression.

2.2 INTRODUCTION

Different approaches are proposed to meet the increase in demand for agricultural products expected by 2050: (i) expansion of cultivated land, (ii) intensification by growing two or three crops a year, (iii) narrowing the yield gap in farmers' fields, (iv) raising the yield ceiling by higher yielding varieties, and (v) reducing post-harvest losses and food waste (Laborte et al., 2012). Eighty percent of the growth in crop production must be a result of higher yields and increased cropping intensity (ii and iii), instead of coming from land expansion (Bruinsma, 2009). However, when yield gap analysis is limited to individual crops, yield gap through intensified cropping system (ii) is not quantified.

The main focus of the annual crop yield gap (Y_g) analysis has been to quantify the different production levels of individual crops using the framework defined by van Ittersum et al. (2013) and analyze the effects of environmental drivers on yield potential (Y_p) under unlimited water or nutrient supply and no biotic stress; water limited yield (Y_w), defined as Y_p but limited by water supply; water and nutrient co_limited yield (Y_{wn}), which is similar to Y_w but also limited by nutrient supply; and actual yield defined as mean yield obtained by farmers under commercial conditions. (van Ittersum and Rabbinge, 1997; van Ittersum et al., 2013).

Under temperate conditions, where temperature and radiation are favorable to summer and winter (spring) crops but yield is frequently limited by water availability; each individual crop is part of a continuous sequence seeded in the same field in different growing seasons. Under such conditions, the productivity of one crop will depend on the performance and management of each crop but interacting with soil properties. For example, summer and winter (spring) crops are seeding under different soil depth and soil chemical and physical properties, representing a potential yield both limited by water and/or nutrient environment. To maximize the productivity of a crop sequence, it is necessary to optimize the productivity of sequence rather than trying to maximize the production of one crop. This implies an

adjusted crop management for each crop, but also soil properties over critical levels required for a good cropping sequence performance.

Precision agriculture provides an opportunity to evaluate the impact of soil properties on attainable yield (Y_{att}) and Y_g of a cropping sequence, including spatial and temporal yield variability. We propose that Y_g can be defined as the difference between the maximum observed yield under specific defining yield growth factors (our reference yield) and yield obtained in site-specific soil conditions, defined as actual yield (Y_a). Under similar cultivar and climate factors (temperature, solar radiation level and water supply, soil properties (water retention characteristics, soil depth, texture, pH, and organic matter content) are the yield limiting factors responsible for Y_g . Differences in soil properties and landscape features that affect available water-holding capacity or soil drainage and aeration are mainly explained by the occurrence of different soil types (Bakhsh et al. 2000; Terra et al., 2006; Pravia, 2009). Within the same soil type, differences in water availability are governed by the presence of soil degradation processes (e.g.: erosion, compaction); and variation in landscapes (Pierce and Nowak, 1999).

Several studies have shown changes in soil properties promoted by production systems. Losses of soil macro porosity, soil organic carbon content, potentially mineralizable nitrogen, soil water infiltration rate, soil structure in the upper layers, soil aggregate stability, potassium content, pH and bulk density are the more relevant changes quantified under continuous annual no-till cropping systems (Aparicio and Costa, 2007; Ernst and Siri, 2011; Moron et al., 2012; Sasal et al., 2016; Ernst et al., 2018). These changes on soil properties show the weight of soil compaction as degradation process of these cropping systems. Soil compaction is one of the main yields limiting factors, modifying water and nutrient availability (Batey, 2009). Sadras et al., (2005) argue that soil compaction effect on crop growth is primarily mediated by reduction in capture of water and photosynthetically active radiation. Therefore, real resources availability (water and nutrients) can be reduced by soil compaction. Deep tillage (DT), like paraplow, has become popular among farmers looking for a quick solution to this problem (Hamza y Anderson, 2005).

However, while DT improves soil physical quality (Álvarez et al., 2009) with a minimum disturbance of soil surface, its impact on crops yield is variable, depending on the specific soil and climate interaction (Pittelkow et al., 2015). We argue that this variability on crop yield response results from failures in yield limiting factor identification.

Soil properties determining yield variability are interrelated, changing together. It arises as a question then: Which of them is the yield limiting factor determining cropping sequence grain yield and yield gap on a field scale?

Von Liebig (1855) proposed the law of the minimum of the limiting factors, which states that yield depends on the growth factor that is available for plants in the smallest relative amount. Webb (1972) presented an alternative to analyze yield response to any input called “boundary line”. It consists in fitting a line above data dispersion, which represents the upper limit of yield that can be reached for each input level, in the absence of other limiting factors. Points that fall below the boundary line are limited by another variable. This method allows separating each single factor that explains yield variation (Shatar and McBratney, 2004). By adjusting the boundary line for each soil attribute and overlapping them it can be identified which soil property is the responsible for yield lower level.

Our hypotheses were: cropping sequence yield and its spatial variability respond to soil properties variability in accordance with de law of minimum proposed by von Liebig (1855), and soil compaction is the main responsible for the Yg within a field. The objectives of this study were: (i) to identify which physical and chemical soil properties are yield limiting factors for a cropping sequence using the boundary line analysis; and (ii) to quantify the Yg produced by them (as the difference between maximum obtained and actual yield).

2.3 METHODOLOGY

2.3.1 Site description

In order to quantify the impact of soil properties on yield variability it was imperative to work over a condition of high soil variability. To achieve this, it was chosen a site which combined natural soil variability, and soil variability due to management practices. This last was expected as this field had been under no-till continuous cropping during fifteen years, and in 2014 an on-farm trial to research about soil compaction was installed on it. The field is located in Mercedes, Uruguay ($33^{\circ}25'47.6''S$, $57^{\circ}58'47.7''W$), and according to the USDA soil classification, the soil is a Typic Argiudoll.

Soil compaction trial consisted of two treatments applied in two consecutive years: deep ripping (DR) and no-tillage (NT), this last being the control treatment. They were applied previous to winter crop or during fallow. First, in 2014 there were installed six plots (three repetitions per treatment) of 20 x 300 m. In 2015 there were installed another six plots of the same dimensions, adjacent to the previous ones (Fig. 2.1). Deep ripping had a working depth of 0.45m.

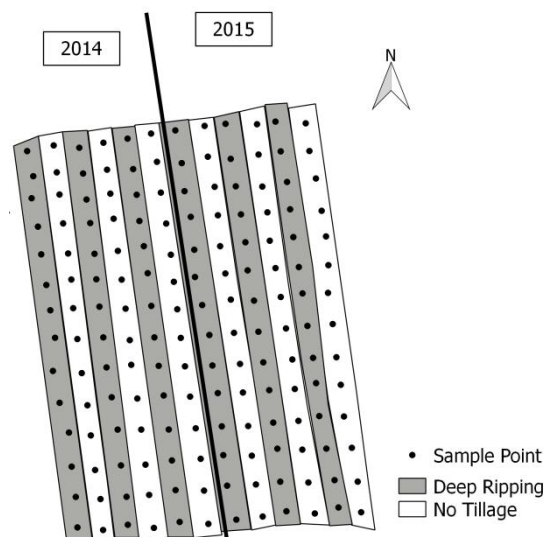


Figure 2.1: Location of the studied field and treatments illustration. Plots under 2014 and 2015 imply deep ripping treatment was applied each year.

On the entire area, the crop sequence adopted consisted of soybean (*Glycine max*), barley (*Hordeum vulgare*) and maize (*Zea mays*). The agronomic practices applied on the entire area (cultivar, sowing and harvest dates, fertilization, pesticides) were those decided by the farmer. Soybean was planted in November 30th, 2015, barley on June 17th, 2016 and maize on November 30th, 2016. The growing season rainfall was 805 mm, 290 mm and 918 mm for soybean, barley and maize respectively (Fig. 2.2).

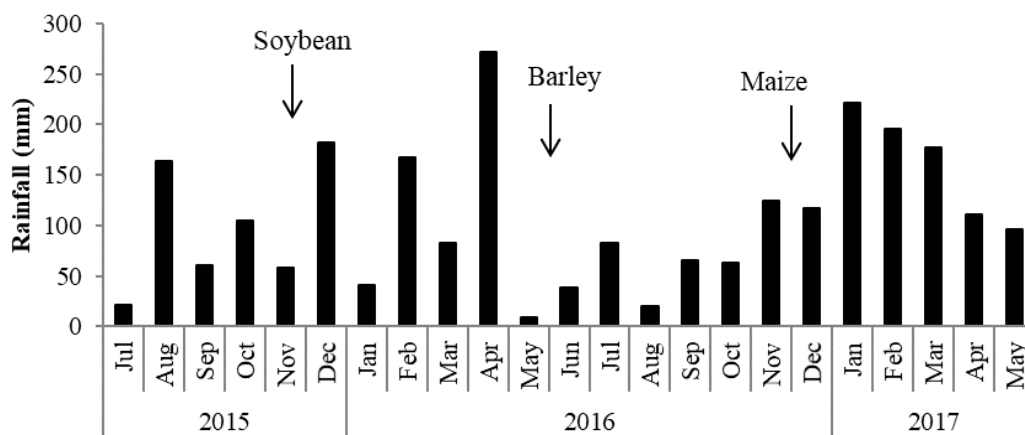


Figure 2.2: Rainfall during sequence growing season. Arrows indicate the sowing date of each crop.

2.3.2 Measurements

Each measurement was made on a rectangular grid of 20 x 30 m, resulting in fourteen sampling points per plot (Fig. 2.1). Soil was sampled before maize harvest. Eight sub-samples were pooled so that one composite soil sample was obtained from each sampling point. Two samples from different depths were taken: 0 - 0.10 and 0.10 – 0.20 m. Dried soil samples (40°C until constant mass) were analyzed for soil organic carbon (SOC) (Nelson and Sommers, 1996), soluble phosphorus (P) (Bray and Kurtz, 1945), exchangeable K, Ca and Mg (extraction with 1M acetate), pH (H₂O y KCl), and titratable acidity at pH = 7.

The apparent electric conductivity (ECa) was also measured with a portable sensor “Spectrum EC110”, at two depths: 0 - 0.15 and 0.15 - 0.30 m. Soil penetration resistance (PR) was determined from the mean of two measurements at each point,

up to a depth of 0.40 m, with a “Remik CP20”. PR was measured with soil close to field capacity in order not to overestimate it due to lack of moisture (Cazorla y Masiero, 2006).

Grain yield was recorded using harvesters fitted with grain yield monitor and positioning system. The yield at each point was estimated based on the nearest record.

2.3.3 Data analysis

2.3.3.1 Sequence average yield

In order to work with all the sequence, the sequence average yield was calculated according to the methodology proposed by Blackmore et al. (2003). Sequence average yield (Y_s) was calculated considering the average yield of each crop and the number of crops as:

$$Y_{is} = \frac{\sum(Y_{ij} - Y_j)}{n}$$

Where: Y_{is} is the sequence average yield at grid point i , Y_{ij} is the yield at grid point i of crop j , Y_j is the average yield of crop j , and n is the number of crops.

2.3.3.2 Identification of yield limiting factor and yield gap

We used the boundary line approach as proposed by Shatar and McBratney (2004) to fit the model that describes the highest sequence yield observed for the range of soil properties values measured. These models were performed for the 90th percentile in the R statistical environment using the *quantreg* package for quantile regression (Koenker, 2016). Before fitting the boundary line, outliers with the largest 5% Mahalanobis distances were removed (Shatar and McBratney, 2004).

Based on fitted boundary lines, the minimum fitted yield for each of the sample points was estimated, and then the yield limiting factor was identified. The identified and non-identified yield gaps were estimated as proposed by Casanova et al. (1999).

Apart from working with de sequence yield, yield limiting factors were identified for each of the crops that compose the sequence using the same procedure.

2.4 RESULTS

Table 2.1 shows the range of values observed for each soil property measured, and crop yield. Crop yield had a variation coefficient (CV) of 14, 18.7 and 13.6% for soybean (Ys), barley (Yb) and maize (Ym), respectively (Table 2.1). On the other hand, soil properties showed different levels of variation, from 8.1% for SOC to 35.6 % for P on the deepest layer (Table 2.1).

As an indicator of physical condition, PR was on average for the first 0.10 m 865 kPa, while for the two inferior strata (0.10-0.20 and 0.20-0.26 m) it took values near 1300 kPa. Despite the PR average, it should be noted that maximum values were close to 2000 kPa.

Table 2.1: Mean, variation coefficient (CV), maximum and minimum of yield and soil physical and chemical properties.

	Mean	CV (%)	Maximum	Minimum
Ys (Mg/ha)	2.4	14.1	3.9	0.5
Yb (Mg/ha)	4.85	18.7	7.3	1.9
Ym (Mg/ha)	8.20	13.6	12.7	3.5
Ca (cmol/kg)⁽¹⁾	18.23	18.0	29.32	11.53
Mg (cmol/kg)⁽¹⁾	1.80	15.9	2.60	1.21
K (cmol/kg)⁽¹⁾	0.69	19.3	1.09	0.42
Ca (cmol/kg)⁽²⁾	19.63	19.6	33.51	10.69
Mg (cmol/kg)⁽²⁾	1.60	24.0	2.70	0.60
K (cmol/kg)⁽²⁾	0.61	20.5	0.97	0.29
ECa (mS/cm)⁽¹⁾	300	22.0	445	155
ECa (mS/cm)⁽²⁾	502	16.0	647	228
P (mg/kg)⁽¹⁾	38.35	21.6	61.77	10.39
P (mg/kg)⁽²⁾	8.36	35.6	19.14	1.13
SOC (%)⁽¹⁾	3.40	8.1	4.14	2.55
SOC (%)⁽²⁾	2.48	9.5	3.32	1.83
PR (kPa)⁽¹⁾	865	24.0	1416	420
PR (kPa)⁽²⁾	1333	19.0	1970	733
PR (kPa)⁽³⁾	1385	17.0	1989	876
(Ca + Mg)/K⁽¹⁾	29.5	16.4	43.2	17.9
(Ca + Mg)/K⁽²⁾	35.7	15.2	51.1	21.3

Ys: soybean yield. Yb: barley yield. Ym: Maize yield. EC: electric conductivity.

SOC: soil organic carbon. PR: penetration resistance. ⁽¹⁾: 0 - 0.1 m depth. ⁽²⁾: 0.1 - 0.2 m depth. ⁽³⁾: 0.2 - 0.26 m depth.

2.4.1 Boundary-line analysis of sequence average yield response

Quantile regression for the upper 0.90 quantile was fitted for sequence average yield as a function of each of the soil properties. Phosphorus and SOC

concentration at both depths, bases relationship as $(Ca+Mg)/K$ (0-0.1 m), and PR (0.1-0.2 and 0.2-0.26 m) showed significant fit (p -value < 0.05) (Fig. 2.3). PR and $(Ca+Mg)/K$ had a linear negative effect on yield (Fig. 2.3 B, Fig. 2.3 C) while SOC and P concentration had an exponential positive effect on yield (Fig. 2.3 A, Fig. 2.3 D).

Yield observations closest to the boundary line show that the corresponding soil properties, for example PR in figure 2.3 B, are non-limiting crop growth factors, while those points that are farther away have some other unknown growth limiting factor.

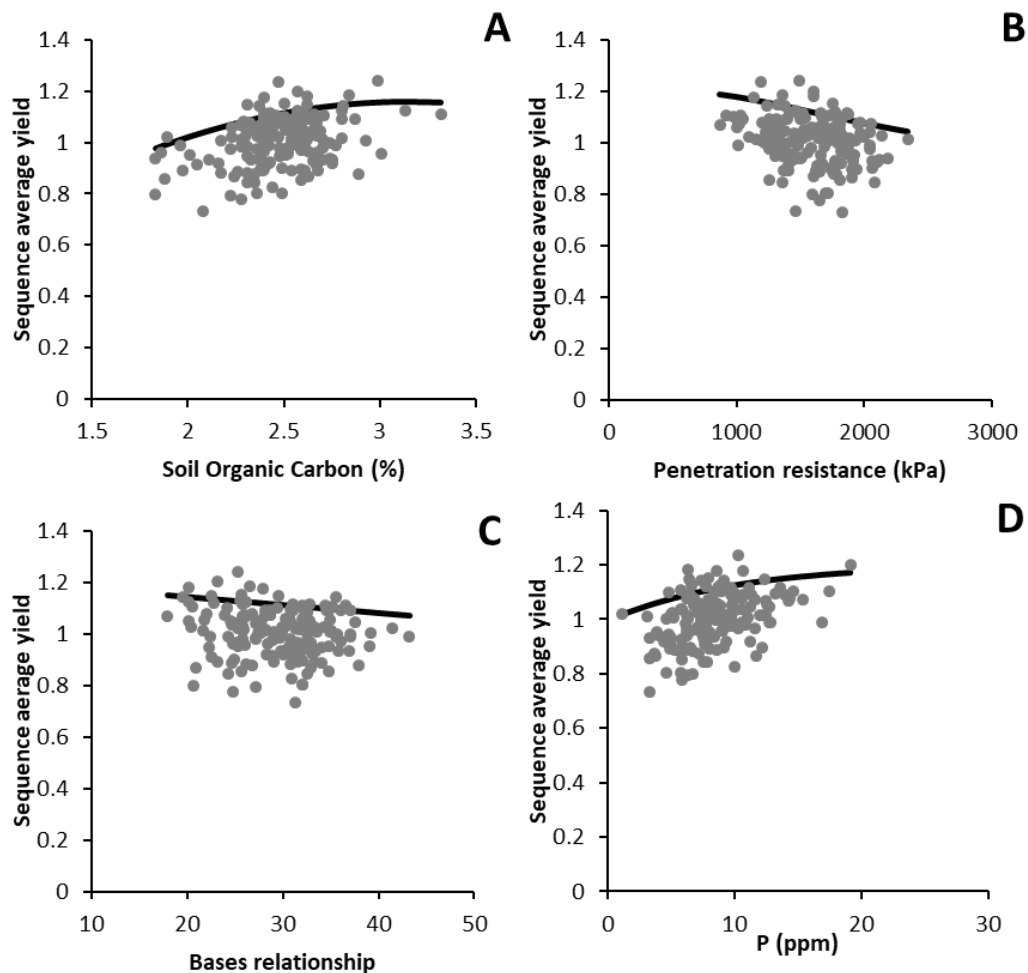


Figure 2.3: Sequence average yield response to soil organic carbon (A), penetration resistance (B), bases relationship as $(Ca+Mg)/K$ (C) and phosphorus (D). The straight lines represent the boundary line fitted for percentile 0.90.

Once each curve was fitted, it was possible to identify yield limiting factor at each sample point (Fig. 2.4). For the 40% of the studied area SOC was identified as the limiting factor. PR, P and (Ca+Mg)/K relationship appeared in the 26 %, 24 % and 10 % respectively.

Taking into account spatial distribution of those points where PR was the limiting factor, there is not a clear trend that shows they are located above NT treatment (Fig. 2.4, black points under NT vs black points under DR).

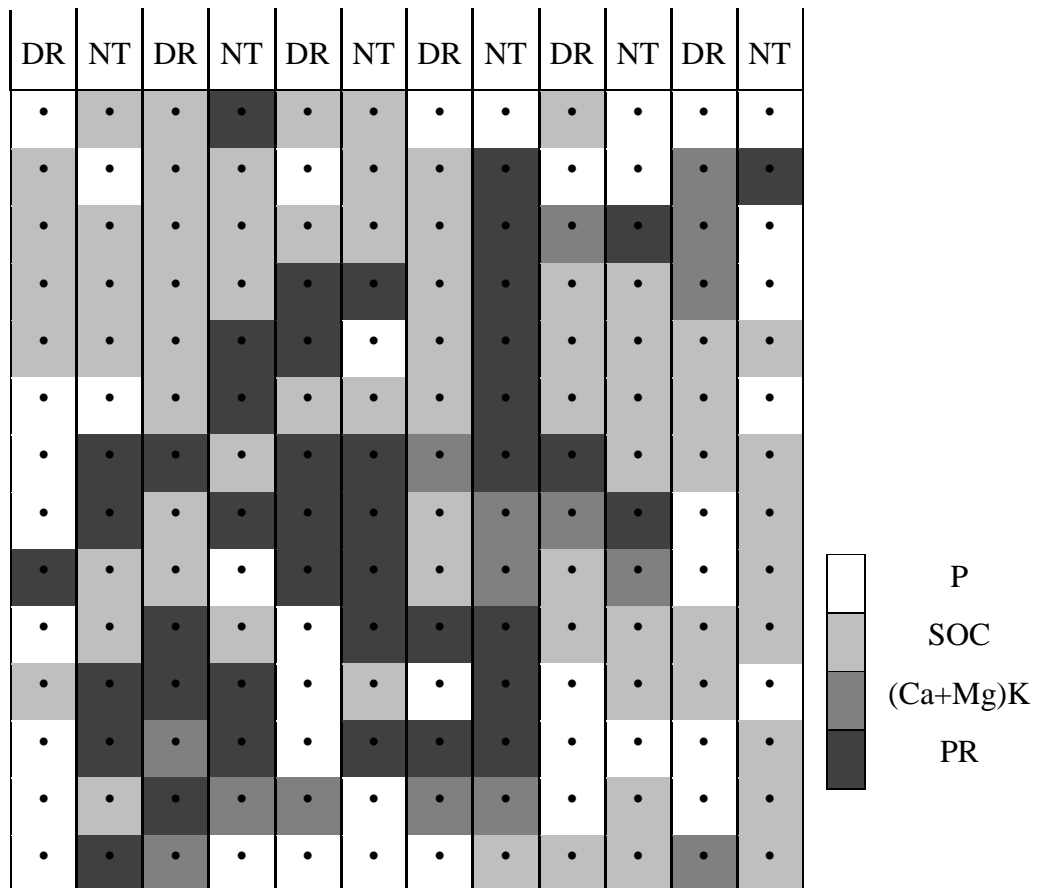


Figure 2.4: Yield limiting factor per point. DR: deep ripping treatment, NT: no tillage treatment. P: phosphorus concentration; SOC: soil organic carbon; PR: penetration resistance.

By analyzing values taken by each property when they appeared as limiting factors, we found that when SOC > 3.4 % on the topsoil or SOC > 2.8 % in 0.1 - 0.2 m it did not appear as a yield limiting factor. P concentration above 35 mg/kg or 8.9 mg/kg for each depth did not limit sequence average yield. For PR the reference values obtained were 1350 and 1270 kPa for each depth, if PR is below both values it should not be a problem. In the case of (Ca+Mg)/K relationship, the smallest value where it was the limiting factor was 28.6, below this threshold this relationship did not limit yield.

2.4.2 Yield gap prediction

Comparing sequence average yield fitted for the upper quantile (Ys_{fit}) versus the observed sequence's average yield (Ys_{obs}), yield gap can be estimated (Fig. 2.5). First, comparing Ys_{fit} with the maximum observed yield, we determined the identified yield gap (Id_Yg). This means that the difference between fitted yield and maximum is consequence of each limiting factor identified. Secondly, with the difference between Ys_{fit} and Ys_{obs} the non-identified yield gap ($Non\ Id_Yg$) was calculated (Fig. 2.5). $Non\ Id_Yg$ means that the observed yield was even lower than that estimated for the yield limiting factor. Id_Yg was on average 0.162 (as standardized average sequence yield), while $Non\ Id_Yg$ was on average 0.077 (Table 2.2). From the total Yg , 70% corresponded to Id_Yg , while 30% to $Non\ Id_Yg$.

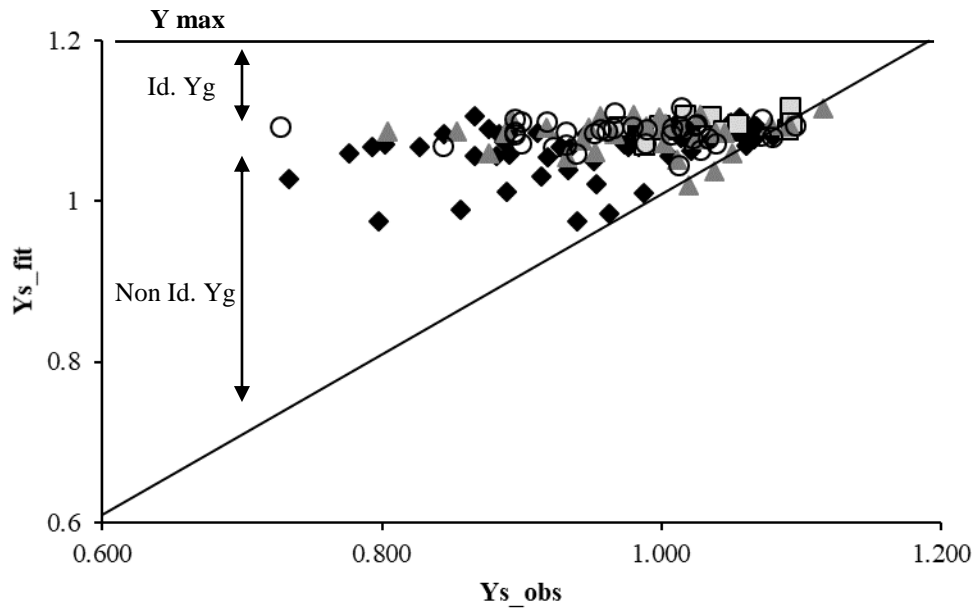


Figure 2.5: Fitted sequence average yield (Y_{s_fit}) vs observed sequence's average yield (Y_{s_obs}), according to each yield limiting factor (\blacklozenge : Soil organic carbon, \blacksquare : Bases relationship as (Ca+Mg/K), \blacktriangle : Phosphorus, \circ : Penetration resistance).

Considering each of the yield limiting factors identified in 3.1, the yield gap produced by each soil property was estimated (Table 2.2). When SOC was the yield limiting factor, it produced an Yg of 0.174, while for (Ca+Mg)/K, P and PR, Yg was 0.145, 0.157, and 0.155 respectively.

By knowing each crop yield, it was possible to transform this standardized average sequence Yg into Mg/ha. On average, soybean yield gap (Y_g^{Soy}) was 0.4 Mg/ha, barley yield gap (Y_g^B) was 0.7 Mg/ha, and maize yield gap was (Y_g^M) 1.3 Mg/ha. These values are not cumulative; they represent the yield gap through all the sequence.

After separating Yg generated by PR between each treatment, Yg in those plots with deep ripping was 0.103 while on NT plots it was 0.140. The difference between them was equivalent to 0.09 Mg/ha, 0.180 Mg/ha or 0.300 Mg/ha for soybean, barley or maize respectively.

Table 2.2: Identified and non-identified sequence yield gap (Y_g^S), identified soybean (Y_g^{Soy}), barley (Y_g^B) and maize (Y_g^M) yield gap, on average and for each of the yield limiting factors.

	Mean	SOC	(Ca+Mg)/K	P	PR
Non Id. Y_g^S	0.077	0.083	0.041	0.069	0.088
Id Y_g^S	0.162	0.174	0.145	0.157	0.155
Id Y_g^{Soy} (Mg/ha)	404	434	361	390	385
Id Y_g^B (Mg/ha)	788	846	704	761	751
Id Y_g^M (Mg/ha)	1330	1428	1189	1284	1268

SOC: soil organic carbon; P: phosphorus; PR: penetration resistance.

2.4.3 Boundary-line analysis of each crop yield

Soybean and barley yield showed significant fit ($p < 0.05$) on the upper 0.90 quantile for P concentration, SOC and PR. To account for these effects, we analyzed the reference value for each of these properties from which they did not limited yield (Table 2.3). For both crops, SOC took similar values to the sequence (3.4%). In the case of PR, soybean tolerated higher values, being the reference value of 1400 kPa. Conversely, it had a lower limit for P concentration than barley and the sequence; over 5.8 mg/kg this property may not be the mayor yield limiting factor on soybean. The effect of soil properties on maize could not be explained by adjusting the boundary line, as none of the measured soil properties showed a significant fit ($p < 0.05$) for de upper quantile.

Table 2.3: Reference value for each yield limiting factor identified for soybean, barley and maize separately.

	Reference value			
	Sequence	Soybean	Barley	Maize
SOC (%)	3.4	3.4	3.3	---
P (mg/kg)	8.9	5.8	8.6	---
PR (kPa)	1350	1422	1293	---

SOC: soil organic carbon; PR: penetration resistance.

2.5 DISCUSSION

Using information from a deep ripping experiment, we imposed variability in soil physical properties over similar soil chemical properties. Yield and soil properties variation were enough to identify soil properties acting as yield limiting factors under similar yield defining factors (radiation, temperature, rainfall and cultivar).

The boundary line analysis made it possible to identify yield-limiting factors on a site-specific scale, resulting in a profitable statistical tool to catch a glimpse of which are the main factors that may be limiting attainable yield. This would not have been possible through a classical correlation analysis between sequence average yield and soil properties. This method may simplify yield response ignoring possible interactions among variables (Shatar and Mc Bratney, 2004).

The proportion of the area in which SOC and PR (66 %) were yield limiting factors could be indicative of soil physical degradation. Both soil properties have been related to soil compaction problems (Álvarez et al., 2009, Botta et al., 2007, Hamza y Anderson, 2005, Sadras et al., 2005). However, while PR estimates soil hardness directly, SOC is a soil quality indicator related to nutrient, soil water dynamic and soil aggregate stability (Martínez et al., 2008, Díaz Zorita et al., 2002, Soane, 1990). Our SOC critical level was 3.4%, and PR critical level varied between 1350 and 1270 kPa depending on soil depth. Both differ from reference values established in the bibliography. For example, Díaz Zorita et al. (1999) found that

SOC critical value for wheat yield varied between 1.7 – 2.0 % and PR critical level for root growth has been established over 2000 kPa (Boone et al., 1986; Glinski and Lipiec, 1990).

Three main reasons would explain these results: i) critical SOC level depends on soil texture, soil profile depth and soil tillage system. While Díaz Zorita (1999) considered a soil texture gradient including both, conventional tillage and no-till, our results were obtained under the same soil texture and under permanent no-till during at least 17 years; ii) our critical values correspond to yield limiting factor to reach attainable yield of a cropping sequence under field conditions, when soil properties are interrelated; iii) under such conditions, critical levels represent the value from which either SOC or PR are not limiting factors.

Although we expected deep tillage to ensure PR was not yield limiting factor, it appeared even on plots under DT. This treatment reduced PR but not enough to leave it beyond the critical range where it limits sequence yield. Low and random response to DT reported in the bibliography (Rubio, 2018, Schneider et al., 2017, Álvarez et al., 2009) could be an outcome of a failure of yield limiting factors identification. Although deep tillage effects decrease when increasing water availability (Schneider et al., 2017), under our favorable climatic conditions, with enough rainfall during growing season, Yg under DT treatment was 27 % less than under NT plots.

Furthermore, our main hypothesis was that soil compaction would be the most important yield limiting factor on NT systems; however, other soil properties as (Ca+Mg)/K relationship or P appeared on a large proportion of the area.

By combining yield limiting factors, we quantify their impact on the sequence yield. Considering each crop average yield gap in relation with the maximum observed yield, we estimated how much of each crop yield represented the Yg (Table 2.2). Regardless of which the yield limiting factor was; approximately 15% of the sequence yield was lost as a consequence of soil properties. The non-identified Yg was probably due to some soil property we did not measure.

Our analysis of sequence yield assumed that each crop response to soil properties is the same. When we analyzed them separately, we found that soybean and barley had repeated sequence's behavior, but maize had not. This difference was partially associated with the fact that during maize growing season water availability was extremely favorable. Sadras et al. (2005) proposed that soil compaction has impact under non-extreme water availability conditions, therefore our conditions could have probably mitigated the negative effect that soil properties could have caused.

The utility of identifying yield limiting factors is to propose some strategies to revert them. For example, if available nutrients would have appeared as the main yield limiting factor, one simple strategy to improve the situation could have been to increase fertilization. Instead, the fact that SOC and PR seem to be the most important yield limiting factors leads us to consider more complex solutions. There is evidence about the positive effect of deep tillage on decreasing PR levels, but yield response or the duration of its effect is not clear, and is greatly related to with PR levels, and the environmental conditions (Álvarez et al., 2009). Our results confirm that deep tillage may not improve soil conditions enough. On the other hand, increasing SOC levels is related to the amount of crop residues, which may involve the correct election of the cropping sequence components.

In conclusion, through the boundary line analysis, it was possible to identify yield limiting factors for a cropping sequence, being for these experimental conditions SOC and PR the most important ones. Furthermore, the impact of soil attributes on sequence yield was quantified as the identified yield gap on a site-specific scale. The magnitude of the identified Yg compared with the total Yg shows up to what extent soil conditions are a determinant factor of actual yield, and the importance of reconvertion degradation processes. Our results show that there are methodological tools that allow us to discover the causes of yield gap and develop specific strategies to mitigate its consequences, in the most efficient way.

2.6 ACKNOWLEDGMENTS

Funding for research was provided by *Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) de Uruguay, Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA) Proyecto # 337*. P.Etchegoimberry received a grant for her magister research program from the *Agencia Nacional de Investigación e Innovación de Uruguay* under the code: POS_NAC_2016_1_130394. We acknowledge the contributions of Rocío Krall and Ignacio Prieto, who assisted with data collection.

2.7 REFERENCES

- Álvarez, C.R., Torres, M., Chamorro, E.R., D'ambrosio, D., Miguel, A., Taboada, M.Á., 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Revista Ciencia del Suelo (Argentina)*. 27 (2), 159-169.
- Aparicio, V., Costa, J.L., 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research*. 96, 155–165.
- Bakhsh, A., Colvin, T.S., Jaynes, D.B., Kanwar, R.S., Tim, U.S., 2000. Using soil attributes and GIS for interpretation of spatial variability in yield. *American Society of Agricultural Engineers*. 43(4), 819-828.
- Batey, T., 2009. Soil compaction and soil management -a review. *Soil Use and Management*. 25(4), 335–345.
- Blackmore, S., Godwin, R.J., Fountas, S., 2003. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. *Biosystems Engineering*. 84 (4), 455–466.
- Boone, F.R., van der Werf, K.H., Kroesbergen, B., ten Hag, B.A., Boers, A., 1986. The effect of compaction of the arable layer in sandy soil on the growth of maize for silage. I. Mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 34, 155-171.

- Botta, G.F., Pozzolo, O., Bomben, M., Rosatto, H., Rivero, D., Ressia, M., Tourn, M., Soza, E., Vázquez, J., 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max L.*): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil and Tillage Research*. 96, 145 -154.
- Bray, R. H., Kurtz, L.T., 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*. 59, 39 - 45.
- Bruinsma, J., 2009. The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? In: Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. (2009, Roma) Food and Agriculture Organization of the United Nations Economic and Social Development Department. 2- 32
- Casanova, D., Goudriaan, J., Bouma, J., Epema, G.F., 1999. Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice. *Geoderma*. 91, 191–216.
- Cazorla, C.R., Masiero, B., 2006. Resistencia a la penetración como indicador de compactación en ensayos de larga duración bajo siembra directa en Marcos Juárez. In: Díaz Roselló, R. ed. *Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur*. Montevideo, PROCISUR. pp. 123-132
- Díaz Zorita, M., Buschiazzo, D. E., Peinemann, N., 1999. Soil organic matter and wheat productivity in the semiarid argentine pampas. *Agronomy Journal*. 91 (2), 276-279.
- 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 Research*. 65, 1–18.
- Ernst, O.R., Siri, G., 2011. La agricultura en Uruguay: su trayectoria y consecuencias. In: *II Simposio Nacional de Agricultura (2011, Paysandú, Uruguay)*. Montevideo. Editorial Hemisferio Sur. 149 - 163.

- 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 Crops Research*. 217, 180–187.
- Glinski, J., Lipiec, J., 1990. *Soil physical conditions and plant roots*. Boca Raton, Florida. CRC Press Inc. 260p.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*. 82, 121–145.
- Koenker, R., 2016. *Quantreg: Quantile Regression*. R Package Version 5.26. [Online] 25th October 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=quantreg>.
- Laborte, A.G., de Bie, K., Smaling, E.M.A., Moya, P.F., Boling, A., van Ittersum, M.A., 2012. Rice yields and yield gaps in Southeast Asia: past trends and future outlook. *European Journal of Agronomy*. 36, 9–20.
- 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, 179–204.
- Martínez, E., Fuentes, J.P., Acevedo E., 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Science Plant Nutrition*. 8 (1), 68-96.
- Moron, 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., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2*, 2nd edition. 9, 961–1010. American Society of Agronomy.
- Pierce, F.J., Nowak, P., 1999. Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*. 67, 1–85.

- Pittelkow, C.M., Linnquist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., Jan van Groenigen, K., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C., 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research*. 183, 156-168.
- Pravia, M. V., 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio temporal en la investigación de cultivos agrícolas. Magister thesis, Universidad de la República, Uruguay.
- Rubio, V., 2018. Diagnóstico de la calidad física del suelo: impacto en el cultivo de maíz, efecto del paraplow como medida correctiva. Magister thesis, Universidad de la República, Uruguay.
- Sadras, V.O., O’Leary, G.J., Rogeta, D.K., 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*. 91, 131–148.
- Sasal, M.C., Boizard, H., Andriulo, A.E., Wilson, M.G., Leonard, J., 2016. Platy structure development under no-tillage in the northern humid pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and Tillage Research*. 173, 33-41.
- Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., Seidel, S. J., 2017. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil and Tillage Research*. 174, 193-204.
- Shatar, T.M., Mcbratney, A.B., 2004. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *Journal of Agricultural Science*. 142, 553–560.
- Soane, B. D., 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*. 16, 179-201.
- Terra, J.A., Shaw, J.N., Reeves, D.W., Raper, R.L., van Santen, E., Schwab, E.B., Mask, P.L., 2006. Soil management and landscape variability affects field-

scale cotton productivity. *Soil Science Society of America Journal*. 70, 98–107.

van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*. 52, 197–208.

van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance: a review. *Field Crops Research*. 143, 4–17

von Liebig, J., 1855. *The Natural Laws of Husbandry* London, UK: Walton and Maberly. 408p

Webb, R.A., 1972. Use of the boundary line in the analysis of biological data. *Journal of Horticultural Science*. 47, 309-319.

3 FACTORES DETERMINANTES DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL RENDIMIENTO DE UNA SECUENCIA DE CULTIVOS

Etchegoimberry P.¹, Ernst O.¹.

¹ Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Universidad de la República, Ruta 3, km363, Paysandú 60000, Uruguay.

3.1 ABSTRACT

Precision agriculture involves delimiting environments in which yield determining and limiting factors are equal, in order to reverse limiting factors. To delimit these environments, information from yield monitors can be used, considering in addition to spatial variability, yield temporal variability. Soil compaction has been determined as one of the factors which determine yield spatial variability on field scale. Our hypotheses were: i) yield spatial variability of a crop sequence is the result of the interaction between natural soil variability and soil variability resulting from management; and ii) compaction is the main limiting performance. Our objectives were to: i) identify management zones by combining yield spatial and temporal variability, and ii) identify which soil properties or terrain attributes determine these zones. In order to generate soil variability induced by management, information from a sub-surface decompaction trial was used. The cropping sequence used was: soybean - barley - maize. Four management zones were delimited: high and stable (HS); low and stable (LS); high and unstable (HU) and low and unstable (LU). High yield was associated with better chemical properties (K and P concentration, and soil organic carbon), while low yield was associated with greater penetration resistance. IB zone was the least favorable situation and was mainly associated with its location in the landscape, corresponding to areas of water accumulation.

Keyword: continuous cropping, precision agriculture, yield temporal variability.

3.2 RESUMEN

La agricultura de precisión implica delimitar ambientes en los que los factores que determinan el rendimiento y lo limitan sean iguales, para luego revertirlos. Para delimitar estos ambientes puede utilizarse información proveniente de monitores de rendimiento, considerando además de la variabilidad espacial, la variabilidad temporal del rendimiento. La presencia de zonas de compactación diferencial a nivel productivo señala a este proceso de degradación como la causa principal de la variabilidad del rendimiento. Nuestras hipótesis fueron: la variabilidad espacial del rendimiento de una secuencia de cultivos es producto de la interacción entre la variabilidad de las características intrínsecas del suelo y la variabilidad de las propiedades del suelo producto del manejo; la compactación es la principal limitante del rendimiento. Los objetivos fueron: i) identificar zonas de rendimiento combinando su variabilidad espacial y temporal, ii) identificar las propiedades de suelo y atributos del terreno que determinan estas zonas. Para generar la variabilidad inducida por manejo se utilizó información de un ensayo de descompactación sub superficial. La secuencia de cultivos fue soja – cebada – maíz. Se delimitaron cuatro zonas de rendimiento: estable alto (EA); estable bajo (EB); inestable alto (IA) e inestable bajo (IB). Las zonas de rendimiento alto se asociaron a mejores propiedades químicas (concentración de nutrientes K y P, y porcentaje de COS) mientras que las de bajo rendimiento se asociaron con mayor resistencia a la penetración. La zona IB fue la situación menos favorable y se asoció principalmente a su ubicación en el paisaje, correspondiendo a zonas de acumulación de agua.

Palabras clave: agricultura continua, agricultura de precisión, variabilidad temporal.

3.3 INTRODUCCIÓN

El sistema de producción agrícola establecido en los últimos años en Uruguay y la región, dominado principalmente por el cultivo de soja, provocó cambios en las propiedades de suelo cuantificables en pérdida de carbono orgánico (COS) (Novelli et al., 2013; Álvarez y Steinbach, 2009) y cambios en propiedades físicas. Dentro de estas, el incremento de estructuras de tipo laminar en capas superficiales, el aumento de la resistencia mecánica a la penetración (RP) y la densidad aparente, y la reducción de la tasa de infiltración de agua, generalmente englobados bajo el rótulo de compactación de suelo (Sasal et al., 2016; Ernst et al., 2016; Passioura, 2002; Hamza y Anderson, 2005; Botta et al., 2007). Este proceso de degradación se asocia a la intensificación de la agricultura, definido como años de agricultura continua sin labranza, y se manifiesta en una reducción progresiva del rendimiento alcanzable (Ernst et al., 2018, 2016).

La pérdida de calidad de suelo reduce su capacidad buffer, siendo necesario un manejo más sofisticado del suelo, el agua y los insumos (Cassman, 1999). Frente a este escenario, la agricultura de precisión aparece como el enfoque indicado para asegurar un uso más eficiente de los recursos (Basso et al., 2007; Cassman, 1999). Para ello es necesario conocer las condiciones específicas de oferta de recursos y ambiente edáfico que enfrenta cada cultivo para incluirlas como un factor limitante del rendimiento y ajustar el uso de insumos considerando esta restricción.

A nivel comercial las chacras son manejadas como unidades uniformes. Sin embargo, los mapas de rendimiento generados a partir del registro con cosechadoras equipadas con monitores georreferenciados muestran la alta variabilidad espacial existente dentro de las mismas. Dicha variabilidad ha sido relacionada con variabilidad espacial en indicadores de calidad de suelo (Papiernik et al., 2005), permitiendo delimitar zonas con requerimientos de manejo diferenciales a partir de la caracterización de las propiedades de suelo.

Este enfoque presenta dos limitantes principales: i) no existe un solo indicador de calidad de suelo que sea capaz de explicar la variabilidad total del

rendimiento; ii) determinar zonas a partir de propiedades del suelo implica necesariamente una alta densidad de muestreo, lo que lo transforma en una alternativa muy costosa. Como alternativa, es posible identificar zonas a partir de mapas de rendimiento generados por la alta densidad de muestreo que registran cosechadoras equipadas con monitores de rendimiento y GPS. En la actualidad esto es una herramienta de amplia utilización, bajo costo y fácil acceso, que permiten trabajar a partir de la variable de respuesta de los cultivos a las distintas condiciones de suelo.

Delimitar ambientes diferentes y su manejo específico implica que los factores que determinan el rendimiento (van Ittersum et al., 2013), son homogéneos dentro de cada ambiente, pero que difieren en los que lo limitan. La ubicación espacial de propiedades y atributos de baja tasa de cambio a lo largo del tiempo (como textura, profundidad del perfil, ubicación topográfica, carbono orgánico) permitiría identificar zonas repetibles en el tiempo (Joensgard y Halmoe, 2003). Sin embargo, el efecto de estas propiedades sobre el rendimiento depende de la interacción con condiciones climáticas (Pravia, 2009) y con la especie utilizada. Un adecuado análisis de la variabilidad espacial del rendimiento requeriría entonces información de varios años y varios cultivos (Joensgaard y Halmoe, 2003) lo que, para el caso de Uruguay, implica considerar una secuencia compleja de cultivos anuales, que incluye opciones de ciclo estival e invernal.

Varios trabajos combinan la variabilidad espacial y temporal del rendimiento para delimitar zonas de manejo diferentes, haciendo énfasis en identificar las propiedades de suelo que determinan zonas en las que el rendimiento del cultivo se califica como “bajo”, es decir por debajo de la media, independientemente del año de evaluación (Blackmore et al., 2003; Joensgard y Halmoe, 2003; Marques da Silva, 2006; Basso et al., 2007; Kravchenko y Bullock, 2000). En la mayoría de los casos estas zonas tienen menor concentración de COS, menor profundidad del perfil, o condiciones topográficas que determinan variabilidad en la disponibilidad hídrica. Estas características en general son propias del tipo de suelo o de la condición topográfica de cada una de las zonas.

La ocurrencia y el nivel de impacto de procesos de degradación como la compactación de suelo son producto de la interacción entre las características intrínsecas del suelo y el manejo (Rubio, 2018), por lo que sería esperable que en una chacra existan distintos grados de compactación. Para mitigar los efectos negativos de la compactación han sido propuestas herramientas de laboreo profundo (Hamza y Anderson, 2005). Los resultados obtenidos en la región tras descompactar el suelo han mostrado una respuesta positiva disminuyendo la RP del suelo, pero el efecto sobre el rendimiento de los cultivos es variable y dependiente de las condiciones climáticas (Álvarez et al., 2009; Rubio, 2018; Girardello et al., 2014).

En este trabajo se plantea como hipótesis que la variabilidad espacio-temporal del rendimiento puede ser explicada por la interacción entre la variabilidad de las características intrínsecas del suelo y propiedades del suelo afectadas por el manejo.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) identificar zonas de rendimiento combinando su variabilidad espacial y temporal, ii) identificar las propiedades del suelo y atributos del terreno que las determinaron.

Para ello se utilizó información proveniente de un experimento instalado el otoño del 2014, en una chacra comercial situada en el departamento de Soriano, Uruguay, la cual estuvo en agricultura continua sin labranza durante aproximadamente los 15 años previos. Los tratamientos corresponden a una comparación de siembra sin labranza contra descompactación mecánica sub superficial, generando así un gradiente de resistencia mecánica a la penetración (RP) del suelo que, combinada con la historia de manejo, (años de agricultura) y variabilidad natural del suelo, generó variabilidad en las propiedades físicas y químicas para un ambiente inicialmente homogéneo.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Sitio experimental

Se evaluaron dos tratamientos: descompactación sub superficial con paraplow (D), y un tratamiento testigo sin descompactar (SD), en fajas apareadas de

aproximadamente 300 m de largo por 30 m de ancho, con tres repeticiones. La profundidad de trabajo del paraplow fue de 0,45 m. El experimento fue instalado en dos años consecutivos (2014 y 2015), y espacialmente de forma contigua, manteniendo intercaladas las fajas SD. El área experimental fue de aproximadamente 11 ha. La descompactación fue realizada previa a la siembra de los cultivos de invierno. En cada una de las fajas se georeferenciaron 14 puntos de muestreo, en los cuales se realizaron todas las determinaciones (Figura 3.1).

La secuencia de cultivos utilizada durante los últimos años fue Soja – Cebada – Maíz. Las prácticas de manejo de cultivos (cultivar, fecha de siembra, fertilización, pesticidas), fueron las aplicadas a nivel comercial, homogéneas para toda el área, y decididas por el productor. La soja fue sembrada el 30 de noviembre de 2015, la cebada el 17 de junio de 2016 y el maíz el 30 de noviembre de 2016. Las precipitaciones acumuladas durante la estación de crecimiento de cada cultivo fueron de 805, 290 y 918 mm en soja, cebada y maíz respectivamente.

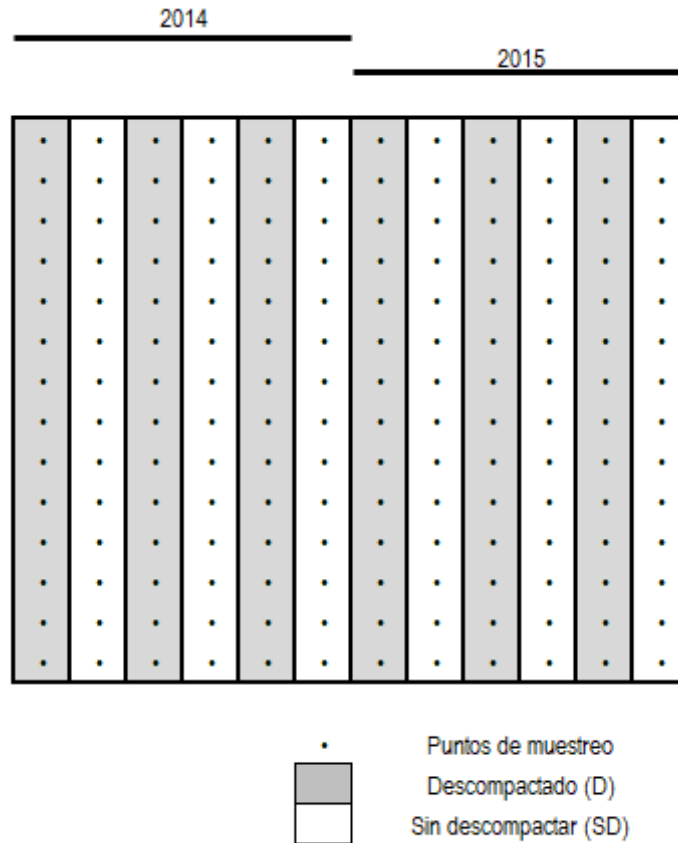


Figura 3.1: Esquema del experimento. El año expresado en la parte superior indica las fajas que fueron instaladas en el 2014, y las que fueron instaladas en el 2015.

3.4.2 Determinaciones

Luego de la cosecha del maíz, se tomaron 8 submuestras de suelo a dos profundidades (0- 0,10 y 0,10- 0,20 m), dentro de un radio de 10 m alrededor de cada punto de muestreo georreferenciado, conformando una muestra compuesta para cada profundidad. Luego de secadas, las muestras fueron analizadas para determinar concentración de P soluble (Bray and Kurtz, 1945), K, Ca y Mg (extracción mediante acetato), carbono orgánico (COS) (Nelson y Sommers, 1996), pH (en H₂O y KCl), y acidez titulable a ph = 7.

En cada punto se midió la resistencia mecánica a la penetración del suelo (RP), como el promedio de dos medidas, hasta una profundidad de 0,40 m, utilizando un penetraógrafo “Remik CP20”. Las determinaciones de RP fueron realizadas cuando el suelo se encontró próximo a capacidad de campo, evitando sobreestimar esta medida debido a la falta de humedad (Cazorla y Masiero, 2006). También se determinó la conductividad eléctrica aparente mediante un sensor portátil “Spectrum EC 110” a dos profundidades (0-15 y 15-30 cm).

Para caracterizar los atributos del terreno, se dispuso para cada punto, de los siguientes indicadores calculados a partir de información de un relevamiento topográfico: índice topográfico de humedad (TWI), índice de potencia de la corriente (SPI) y factor de longitud de pendiente (LS).

El rendimiento de cada cultivo fue obtenido mediante cosechadora equipada con monitor de rendimiento y GPS, registrando el rendimiento cada 5 metros de distancia, y luego, utilizando la medida del punto más cercano, se asignó un valor de rendimiento a cada punto de muestreo.

3.4.3 Delimitación de zonas de rendimiento

Para delimitar las zonas diferentes a partir del rendimiento de la secuencia de cultivos se utilizó la metodología propuesta por Blackmore et al. (2003), la cual

considera dos aspectos de variabilidad de rendimiento: variación espacial y variación temporal. La variación espacial se cuantificó mediante el promedio de rendimiento en cada punto de muestreo a través de los años. Dado que se utilizaron cultivos de distinta especie, en primer lugar se estandarizó el rendimiento de cada cultivo con respecto su rendimiento promedio. Por lo tanto, para cada punto el rendimiento promedio de la secuencia se calculó como:

$$Y_{is} = \frac{\sum(Y_{ij} - Y_j)}{n}$$

donde: Y_{is} es el rendimiento promedio de la secuencia en el punto i , Y_{ij} es el rendimiento en el punto i para el cultivo j , Y_j es el rendimiento promedio del cultivo j , y n es el número de cultivos.

Valores de Y_{is} mayores o iguales al promedio de la chacra se los clasificó como de rendimiento alto (A) y los menores al promedio de la chacra como de rendimiento bajo (B).

La variación temporal se analizó mediante la varianza del rendimiento para cada punto de muestreo a través de los años:

$$Y_{TVi} = \frac{\sum(Y_{ij} - Y)^2}{n}$$

donde: Y_{TVi} es la varianza temporal en el punto i , Y_{ij} es el rendimiento en el punto i para el cultivo j , Y es el rendimiento promedio de todo el campo y todos los años, y n es el número de cultivos.

El valor Y_{TVi} caracteriza la inestabilidad del rendimiento a través de los años. Un valor bajo indica que el rendimiento del sitio fue siempre cercano a la media, mientras que un valor alto indica que el rendimiento del sitio con respecto al promedio es variable entre años, siendo algunos años superiores y otros inferiores a la media. Debido a que este índice no presentó distribución normal se lo transformó utilizando $-\log Y_{TVi}$, convirtiéndose en un índice de estabilidad (IE), en el que mayores valores indican menor variabilidad interanual del rendimiento.

Cada punto de muestreo se clasificó como de rendimiento estable (E) o inestable (I) en base a un valor crítico definido de forma arbitraria como aquel IE que se correspondió con el punto de inflexión de la curva generada a partir de la frecuencia acumulada del área clasificada como de rendimiento inestable y bajo (IB). El límite tomó el valor de $IE = 1,52$. Valores de $IE \geq 1,52$ fueron calificados como E, y los valores de $IE < 1,52$, como I.

Utilizando la clasificación de cada punto con respecto a su rendimiento promedio y a su índice de estabilidad se identificaron 4 zonas de rendimiento diferencial: alto y estable (AE), bajo y estable (BE), alto e inestable (AI), bajo e inestable (BI). Para determinar su ubicación espacial se utilizó el software ArcGis 10.0, interpolando tanto el rendimiento como el índice de estabilidad mediante kriging ordinario y utilizando un modelo exponencial para el ajuste del semivariograma.

3.4.4 Factor limitante del rendimiento

Para cada punto de muestreo se dispuso del factor limitante (propiedad del suelo) del rendimiento de la secuencia. Estos fueron identificados superponiendo la curva envolvente que describe el mayor rendimiento observado para el rango de valores de cada propiedad del suelo medida (Shatar y McBratney, 2004). La curva envolvente se ajustó para percentil 90 en el software estadístico R utilizando el paquete *quantreg* para la regresión por cuantiles (Koenker, 2016). Los resultados se presentan en el capítulo 2 de esta tesis.

3.4.5 Análisis de datos

3.4.5.1 Análisis de correspondencia entre zonas de rendimiento y propiedades del suelo limitantes

Para explorar la correspondencia entre las zonas identificadas con las propiedades limitantes del rendimiento medio de la secuencia de cultivos (capítulo 2) y zonas de rendimiento generadas en base a rendimiento medio de la secuencia y su estabilidad temporal (este capítulo) se realizó un análisis de correspondencia. El

mismo utiliza la prueba Chi cuadrado para evaluar la matriz de desviaciones con respecto al valor esperado bajo el supuesto de independencia. Este análisis fue realizado en el software Infostat.

3.4.5.2 Análisis de correlación

Se estudió la correlación de Pearson entre el rendimiento promedio de la secuencia, el índice de estabilidad y los atributos del terreno. Identificado el atributo topográfico con mayor correlación con el rendimiento y su estabilidad, se analizó la relación simultánea entre estas tres variables. Utilizando el método de *splines*, se interpoló el rendimiento en función del atributo topográfico y la estabilidad del rendimiento. Este método de interpolación estima valores utilizando aquella función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, pero que pasa exactamente por todos los puntos de entrada. Dicho análisis se realizó utilizando el paquete *akima* del software R.

3.4.5.3 Análisis de componentes principales

Se realizó un análisis de Componentes Principales (CP) para analizar la interdependencia de las propiedades identificadas como limitantes del rendimiento (capítulo 2) y atributos del terreno, categorizadas por zonas de rendimiento (AE, AI, BE y BI). El mismo permite reducir el número de variables a considerar generando un nuevo conjunto de variables no correlacionadas denominadas componentes principales (CP) que explican la estructura de variación y su asociación con las zonas de rendimiento. Se retuvieron los CP necesarios para explicar al menos 70% de la varianza total, cuyo *eigenvalue* $> 1,0$ y su contribución al r^2 parcial $> 5\%$ (Wander y Bollero, 1999). Las variables incluidas en el análisis fueron: COS, P, K, relación de bases $((Ca+Mg)/K)$, RP, SPI y TWI. Previo al análisis las variables fueron estandarizadas (media = 0 y desvío estándar = 1), de manera de transformar los datos originales a datos con el mismo orden de magnitud. Este análisis se realizó utilizando el software Infostat.

3.4.5.4 Impacto de la descompactación mecánica sub_superficial sobre la resistencia a la penetración.

Se analizó el efecto del tratamiento D sobre la RP dentro de cada una de las zonas delimitadas, utilizando un modelo mixto, en el que el tratamiento se consideró como efecto fijo, y el año en que se realizó la descompactación como efecto aleatorio. Además, se determinó el número de puntos dentro de cada zona que correspondieron con cada uno de los tratamientos.

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Zonas de rendimiento

El promedio y la variación del rendimiento de cada cultivo se resumen en el cuadro 3.1. La variación del rendimiento cuantificada por el coeficiente de variación fue de 14, 19 y 14 % para soja, cebada y maíz respectivamente. Al estandarizar el rendimiento de los tres cultivos, el rendimiento promedio de la secuencia (Ys) corresponde al valor de 1.

Cuadro 3.1: Rendimiento medio (Media), coeficiente de variación (CV), rendimiento máximo y mínimo de los cultivos de soja, cebada, y maíz, rendimiento promedio estandarizado de la secuencia (Ys) e índice de estabilidad (IE).

	Media	CV (%)	Máximo	Mínimo
Soja (Mg/ha)	2,4	14,1	3,9	0,5
Cebada (Mg/ha)	4,8	18,7	7,3	1,9
Maíz (Mg/ha)	8,2	13,6	12,7	3,5
Rend. Promedio (Ys)	1,0		1,33	0,61
Índice de estabilidad (IE)	1,55		3,42	0,17

La diferencia en Ys entre los grupos clasificados como EB e IB y los EA e IA estuvo en el rango inferior y superior del rendimiento respectivamente. Mientras que el menor rendimiento en EB fue 0,89, en IB fue 0,61 y los máximos fueron 1,10 y 1,33 para los ambientes EA e IB. En cuanto al IE este tomo los mayores valores en la zona EA, y los menores en la zona IB (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2: Rango de rendimiento promedio (Ys) e índice de estabilidad (IE) para cada uno de los grupos confeccionados: estable bajo (EB), estable alto (EA), inestable alto (IA), inestable bajo (IB).

	Ys		IE	
	Min	Máx	Min	Máx
EB	0,89	0,99	1,53	3,09
EA	1,00	1,12	1,53	3,42
IA	1,01	1,33	0,46	1,47
IB	0,61	0,99	0,17	1,51

La relación entre Ys e IE (Figura 3.2) permitió identificar que los Ys menores se correspondieron con los IE menores. Por tanto, los menores rendimientos de la secuencia ocurrieron es en la zona donde además de ser bajos, fueron inestables (IB). El mismo comportamiento, pero de forma inversa, ocurrió en los puntos clasificados como de alto rendimiento, los que aumentaron al disminuir el IE. Por tanto, los mayores Ys ocurrieron en la zona IA. El Ys de los puntos clasificados como “estables” se encuentran más cerca de la media, y están compuestos por las zonas EA y EB. Por tanto, las diferencias en Ys promedio de cada zona resultaron menores que con las zonas IB e IA.

Del total del área experimental un 32 % se clasificó como EA, 24% como IA, 21% como EB y un 22% como IB, (Figura 3.4) quedando clasificada como inestable (I) un 46% del área.

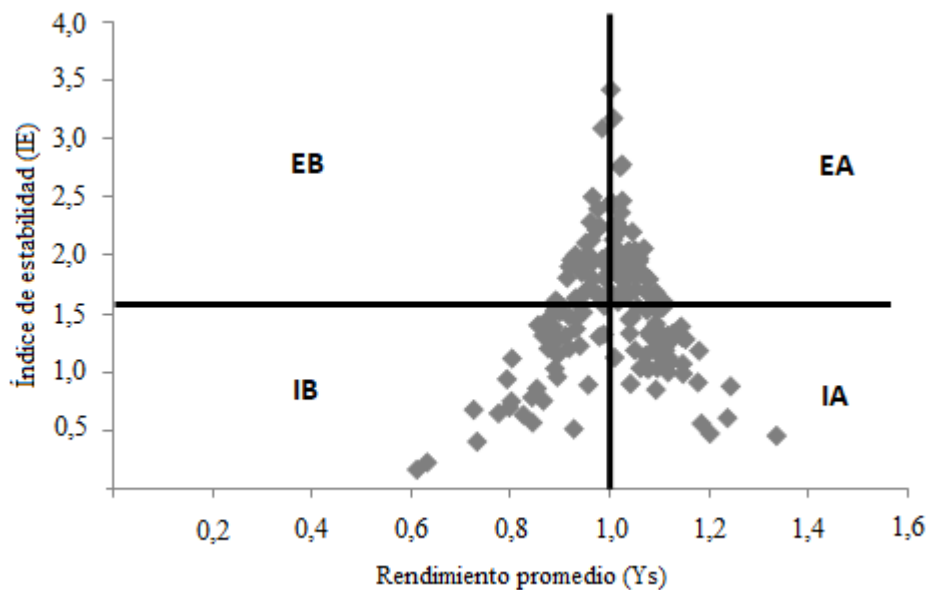


Figura 3.2: Índice de estabilidad en función del rendimiento promedio de la secuencia (Ys). Los cuadrantes representan las zonas de rendimiento diferencial: estable bajo (EB), estable alto (EA), inestable bajo (IB), inestable alto (IA).

3.5.2 Correspondencia entre zonas identificadas por propiedades limitantes del rendimiento y las identificadas por rendimiento medio y variabilidad temporal.

La correspondencia entre zonas identificadas por rendimiento medio de la secuencia y su variabilidad temporal (Figura 3.3) y las identificadas por propiedades limitantes del rendimiento de la secuencia (Figura 3.4) fue baja (Cuadro 3.3). Por lo tanto, las zonas de rendimiento identificadas por rendimiento y variabilidad temporal no parecerían estar determinadas por zonas que comparten la misma propiedad del suelo comolimitante. Sin embargo, graficando las primeras dos dimensiones del análisis de correspondencia (Figura 3.5), el eje 1, con un valor de inercia del 71%, permite diferenciarla zona IB del resto, asociándose con el COS como limitante del rendimiento. Dentro de esta zona, el COS fue el factor limitante en el 58% de los puntos. En los demás ambientes la correspondencia fue baja, por lo que no es posible diferenciar entre ellos en base a las propiedades limitantes del rendimiento.

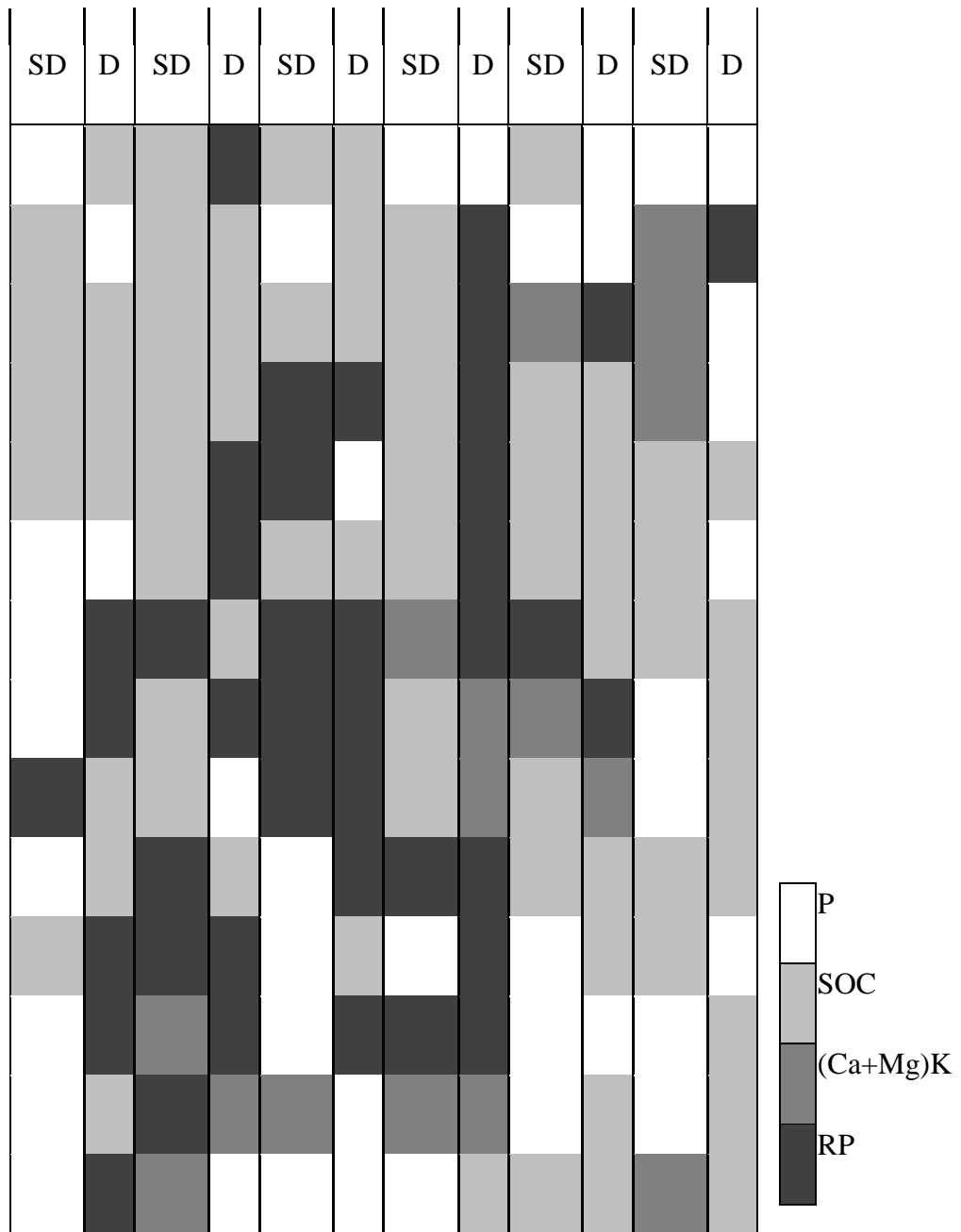


Figura 3.3: Factor limitante identificado para cada punto. D: tratamiento descompactado, SD: tratamiento sin descompactar. P: fósforo; SOC: carbono orgánico del suelo; RP: resistencia a la penetración.

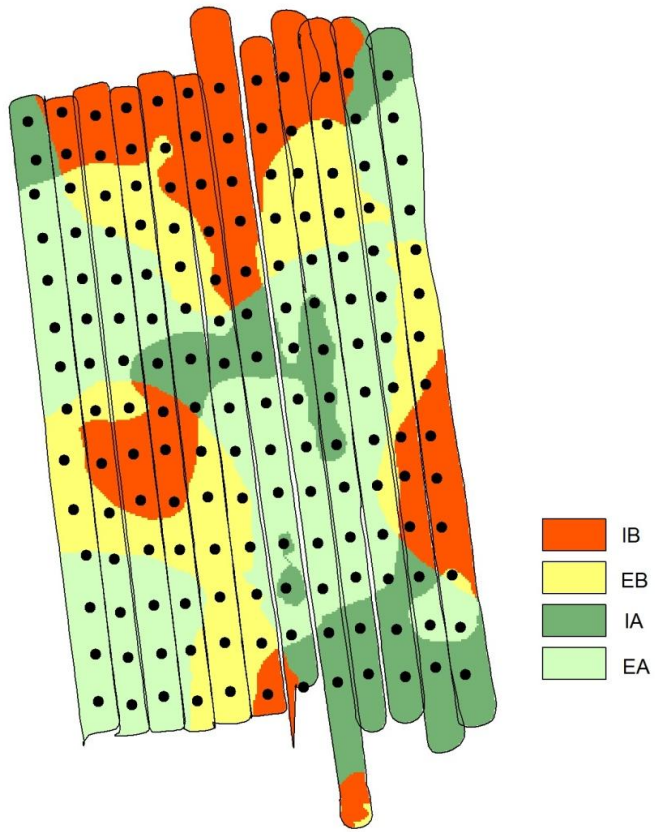


Figura 3.4: Ubicación espacial de las zonas identificadas por el rendimiento medio de la secuencia y su variabilidad temporal. EA= rendimiento estable y alto; EB= estable bajo; IA= inestable alto; IB= inestable bajo.

Cuadro 3.3: Frecuencia relativa representando el número de puntos de cada zona de rendimiento en la que se presentó cada limitante de suelo. Zonas de rendimiento: estable alto (EA), estable bajo (EB), inestable alto (IA), inestable bajo (IB). Propiedades de suelo identificadas como limitante: concentración de fosforo (P), carbono orgánico del suelo (COS), resistencia a la penetración (RP) y relacion de bases como (Ca+Mg)/K (CaMgK).

	P	COS	RP	CaMgK	Total
EB	0,22	0,36	0,33	0,08	1
EA	0,25	0,34	0,30	0,11	1
IA	0,28	0,40	0,18	0,15	1
IB	0,19	0,58	0,22	0,00	1
Total	0,24	0,41	0,26	0,09	1

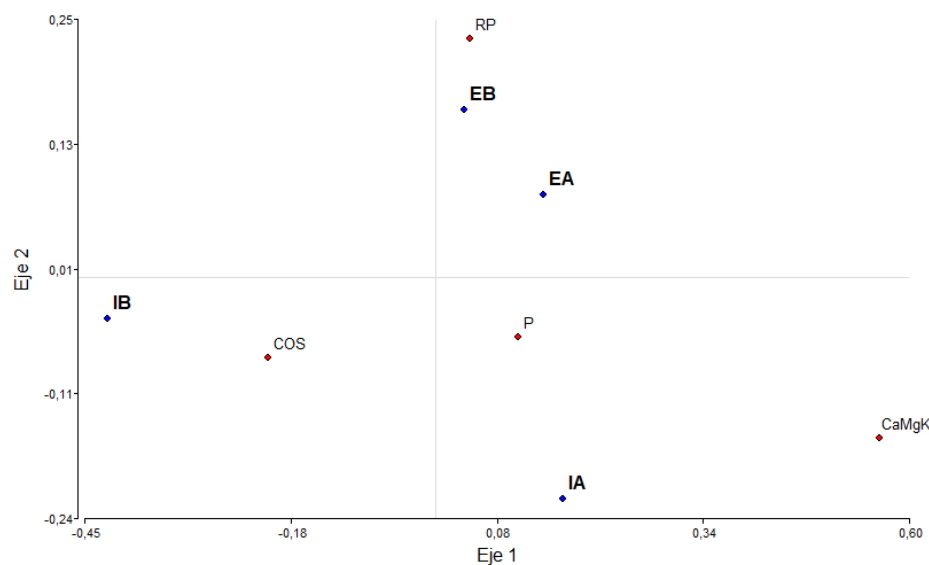


Figura 3.5: Análisis de correspondencia entre zonas identificadas a partir del rendimiento (IB: inestable bajo; EB: estable bajo; IA: inestable alto; EA: estable alto), y limitantes del rendimiento (P: concentración de fósforo; COS: carbono orgánico del suelo; RP: resistencia a la penetración; CaMgK: relación de bases como (Ca+Mg)/K).

3.5.3 Zonas de rendimiento y atributos topográficos

Existió una correlación negativa significativa ($p \leq 0,05$) entre Ys e IE con los atributos del terreno SPI y TWI. Además TWI y SPI también estuvieron correlacionados (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4: Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables rendimiento promedio (Ys), índice de estabilidad (IE), índice topográfico de humedad (TWI), índice de potencia de la corriente (SPI) y factor de longitud de pendiente (LS). Valores en **negrita** mostraron correlación significativa (p valor $< 0,05$).

	Ys	IE	LS	TWI	SPI
Ys	1				
IE	0,12	1			
LS	-0,04	0,07	1		
TWI	-0,35	-0,26	-0,09	1	
SPI	-0,21	-0,07	0,84	0,29	1

La relación entre Ys, IE TWI (Figura 3.6) muestra que ambos, Ys e IE se redujeron al aumentar TWI. Es decir en aquellas posiciones del paisaje donde ocurre acumulación de agua los rendimientos fueron más inestables, determinando los menores valores de Ys.

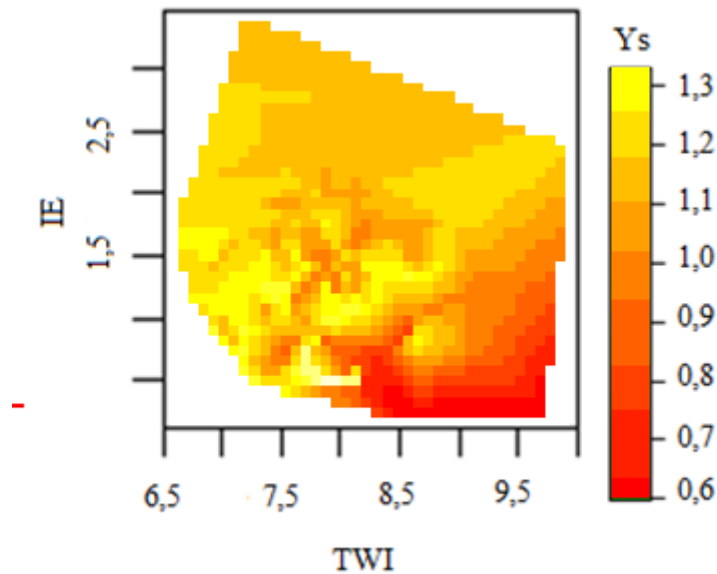


Figura 3.6: Rendimiento promedio de la secuencia (Y_s) en función del índice de estabilidad (IE) y el índice topográfico de humedad (TWI).

3.5.4 Zonas de rendimiento, propiedades de suelo y atributos topográficos

El 89% de la varianza total incluyendo además de las propiedades identificadas como limitantes, los atributos del terreno calculados para cada punto de muestreo fueron explicados por dos CP (Figura 3.7). El CP1 separó la población de datos de los ambientes definidos como A de los definidos como B, quedando en los A asociados principalmente las propiedades químicas como COS, concentración de fósforo y la relación de bases (CaMgK) y los B a la RP y los atributos del terreno. El segundo componente, separó los datos en los rendimientos E de los I. En este caso no se muestra una clara clasificación por las propiedades limitantes del rendimiento, pero la zona IB se separó de la EB por los atributos de terreno TWI y SPI.

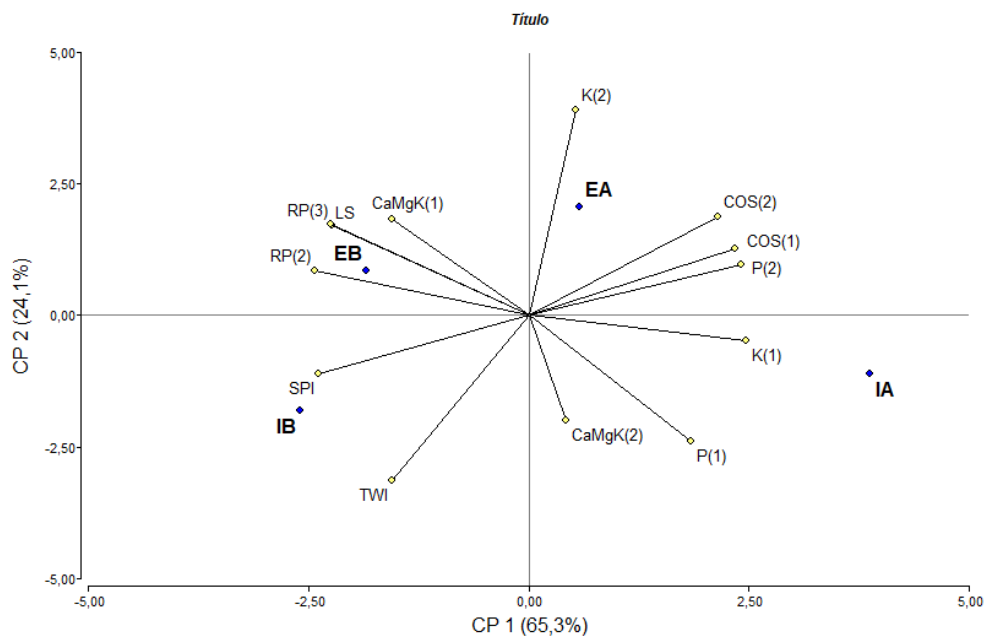


Figura 3.7: Análisis de componentes principales para las variables de suelo teniendo en cuenta las zonas de rendimiento diferencial.(IB: inestable bajo; EB: estable bajo; IA: inestable alto; EA: estable alto; P: concentración de fósforo; COS: carbono orgánico del suelo; RP: resistencia a la penetración; CaMgK: relación de bases como (Ca+Mg)/K).

3.5.5 Descompactación sub superficial

No existió una clara correspondencia entre las zonas y los tratamientos (Cuadro 3.5). Únicamente podría notarse una tendencia de que en la zona IB predominaron los puntos provenientes del tratamiento SD y de forma opuesta en la zona IA predominan los puntos del tratamiento D (Cuadro 3.5). En todas las zonas la D redujo significativamente ($p \leq 0,05$) la RP, pasando del entorno de 1500 kPa en los tratamientos SD, a valores entorno de los 1100-1200 kPa en los D.

Cuadro 3.5: Número de puntos y resistencia a la penetración (RP) para cada zona de rendimiento según tratamiento. Zonas AE: alto y estable; AI: alto e inestable; BE: bajo y estable; BI: bajo e inestable. * estadísticamente significativo (p valor < 0,05) comparando valores de RP entre columnas.

Zona	Descompactado (D)		Testigo (T)	
	Nº puntos	RP (kPa)	Nº puntos	RP (kPa)
AE	25	1160	28	1489 *
AI	34	1163	6	1415 *
BE	14	1201	22	1529 *
BI	10	1235	26	1437 *

3.6 DISCUSIÓN

La metodología utilizada permitió, a partir de información proveniente de monitores de rendimiento, identificar zonas con comportamiento diferente a partir del rendimiento y la variabilidad temporal de una secuencia de cultivos diversa, bajo una situación favorable de oferta de factores determinantes del rendimiento. Las precipitaciones permitieron lograr rendimientos en promedio elevados comparados con la media nacional para los años correspondientes (DIEA, 2016). Los relativamente bajos coeficientes de variación del rendimiento de cada cultivo (Cuadro 3.1) podrían ser producto de la buena condición climática que enfrentaron, o que la variabilidad de propiedades del suelo del área seleccionada fue menor a la esperada.

Los máximos rendimientos de la secuencia se obtuvieron en la zona IA (Cuadro 3.2), implicando que la variabilidad temporal resultó de la capacidad de concretar altos rendimientos. Por el contrario, en la zona IB la variabilidad temporal ocurre resultó de rendimientos siempre bajos, lo que la transforma en la situación menos favorable (Cuadro 3.2). Los resultados sugieren que, mientras en IA las propiedades y atributos del suelo no limitan la respuesta del rendimiento a la oferta de factores determinantes del rendimiento, en IB existen factores limitantes del rendimiento que, además de establecer un Y_s menor al promedio de la chacra, resultarían en un incremento del riesgo de producción frente a condiciones ambientales variables. En general, los trabajos que determinan zonas de rendimiento

según su variabilidad espacial y temporal (Blackmore et al., 2003; Joensgard y Halmoe, 2003; Marques da Silva, 2006) solamente diferencian aquellas zonas que se comportan como inestables. El comportamiento diferente entre las zonas IA e IB muestran la importancia de definir cuatro zonas, analizando la interacción entre los niveles de rendimiento y la variabilidad temporal. Además, los antecedentes plantean principalmente identificar las limitantes y revertirlas en la zona clasificada como EB, sin embargo nuestros resultados muestran que la zona IB es la que genera los peores resultados para toda la secuencia.

El análisis de correspondencia entre las zonas de rendimiento y las propiedades limitantes solo permitió (con un valor de inercia del 71%) diferenciar la zona IB de las demás, siendo el COS la propiedad limitante en el 58% de los puntos de esta zona. Sin embargo, ésta variable también fue de las limitantes más frecuente del rendimiento de la secuencia en las otras zonas. La correspondencia entre variables limitantes del rendimiento y las demás zonas fue relativamente baja (Cuadro 3.3), por lo que si bien explican la variabilidad espacial del Ys (capítulo 2), pero no logran explicar su variabilidad temporal diferencial entre zonas.

Las propiedades de suelo y atributos del terreno relacionados con la capacidad de almacenaje de agua, han sido relacionados por varios autores con la variabilidad espacial del rendimiento (Kravchenko y Bullock, 2000; Fraisse et al., 2001). Las propiedades incluidas en el análisis del factor limitante (capítulo 2), son mayormente propiedades químicas (concentración de bases, fósforo, carbono) y como indicadora de la condición física se cuantificó únicamente la RP. Ninguna de ellas, es capaz de cuantificar o estimar procesos relacionados con la dinámica del agua. En tanto, al incorporar atributos del terreno que se relacionan con el movimiento del agua en la superficie (TWI y LS), se estiman posibles cambios en la oferta de agua para los cultivos. Las zonas de concentración y escorrentía diferencial tiene la capacidad de inducir déficit o exceso de agua frente a una misma cantidad de agua recibida por precipitaciones. Teniendo en cuenta la alta variabilidad inter anual de la oferta hídrica, la interacción entre propiedades y atributos de suelo podrían estar relacionados con la variabilidad temporal del rendimiento. El análisis de

componentes principales (Figura 3.7), en el que se incluyeron atributos topográficos como variables adicionales al factor limitante (propiedad) del rendimiento muestra que: i) ambas zonas A se asociaron a mejores condiciones en cuanto a propiedades químicas (concentración de nutrientes K y P, y el porcentaje de COS); ii) ambas zonas B tuvieron propiedades físicas estimadas por Rp menos favorables; iii) dentro de la zona B, la IB debe su inestabilidad a su ubicación en el paisaje (TWI y SPI), más precisamente a zonas topográficas con mayores riesgos potenciales de acumulación de agua. El TWI se relacionó de forma inversa con el Ys y el IE, lo que implicó que donde podría ocurrir una mayor acumulación de agua (mayor TWI) se registraron los menores y más variables rendimientos. Teniendo en cuenta las altas precipitaciones ocurridas durante la estación de crecimiento de los tres cultivos integrantes de la secuencia, la inestabilidad resultó de la ocurrencia de excesos hídricos que limitaron el rendimiento. Dentro de la secuencia el cultivo de cebada es el que presenta mayor susceptibilidad al exceso hídrico (de San Celedonio et al., 2014), lo que pudo magnificar el efecto negativo de la ubicación topográfica sobre el rendimiento.

La zona B se relacionó además, con mayores valores de resistencia a la penetración (Figura 3.7). Una alternativa utilizada a nivel comercial frente a problemas de compactación ha sido el uso de herramientas de descompactación sub superficial. El tratamiento D disminuyó significativamente ($p \leq 0,05$) la RP en todas las zonas identificadas (Cuadro 3.5), reduciéndola desde valores próximos a los 1500 kPa, a valores entorno a 1100 kPa. Esto implica que la Rp promedio de los tratamientos D se redujo por debajo del valor crítico a partir del cual no sería la propiedad limitante del rendimiento ($R_p < 1300$ kPa, Capítulo 2). Por tanto, siendo la zona B la de mayor RP, sería esperable que no hubiera puntos que recibieron el tratamiento D. Si bien existió una tendencia para las zonas inestables, en que la IB integró más puntos provenientes de tratamiento SD, y la IA con puntos en el tratamiento D, hubieron puntos provenientes de los tratamientos D en las cuatro zonas (Cuadro 3.5). Por tanto, el valor de RP como única variable no permitió predecir el comportamiento en cuanto al Ys. Si bien es probable que valores mayores

de Rp se correspondan con zonas de bajo rendimiento, la descompactación superficial no levantó la restricción generada por la zona, siendo necesario combinarlo con atributos topográficos para diferenciar entre las cuatro zonas de rendimiento.

3.7 CONCLUSIONES

A partir de información del rendimiento de distintos cultivos de una misma secuencia fue posible delimitar zonas con diferente nivel de Ys, y además distinto nivel de variabilidad temporal. Se constató que la mayor variabilidad temporal puede ocurrir a distintos niveles de Ys, siendo de gran importancia diferenciar la zona IB de la IA. Las propiedades de suelo identificadas como limitantes se relacionaron con el nivel de rendimiento, asociándose a los altos rendimientos mejores condiciones en cuanto a propiedades químicas (relación de bases, COS, concentración de P y K) y a los más bajos mayor RP. La mayor variabilidad temporal del rendimiento, en combinación con rendimientos bajos (zona IB) se asoció mayormente a los atributos del paisaje, ocurriendo en zonas de acumulación de agua. Por tanto, podrían asociarse problemas de drenaje con peores rendimientos, y mayor variabilidad.

3.8 AGRADECIMIENTOS

La investigación que da origen a los resultados presentados en el presente artículo fue financiada por el programa Fondos de Promoción de Tecnologías Agropecuarias (INIA-FPTA337), el cual fue ejecutado por la Facultad de Agronomía y la Asociación Uruguaya Pro Siembra Directa (AUSID). La autora Etchegoimberry P., recibió una Beca del Programa Posgrados Nacionales de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación bajo el código POS_NAC_2016_1_130394. Los autores agradecen a los estudiantes de Facultad de Agronomía Ramiro Izaguirre, Rocío Krall e Ignacio Prieto por la colaboración en la recolección de datos.

3.9 BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez CR, Torres M, Chamorro ER, D'ambrosio D, Miguel A, Taboada MÁ. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Revista Ciencia del Suelo (Argentina)*. 27 (2): 159-169.
- Álvarez R, Steinbach HS. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research* 104: 1–15.
- Basso B, Bertocco M, Sartori L, Martin EC. 2007. Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in maize-wheat-soybean rotation. *European Journal of Agronomy* 26: 82-91.
- Blackmore S, Godwin RJ, Fountas S. 2003 The Analysis of Spatial and Temporal Trends in Yield Map Data over Six Years. *Biosystems Engineering* 84 (4): 455–466.
- Botta GF, Pozzolo O, Bomben M, Rosatto H, Rivero D, Ressia M, Tourn M, Soza E, Vázquez J. 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil and Tillage Research*, 96: 145 -154.
- Bray RH, Kurtz LT. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science* 59: 39 - 45.
- Cassman KG. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences U. S. A.* 96: 5952–5959.
- Cazorla CR, Masiero B. 2006. Resistencia a la penetración como indicador de compactación en ensayos de larga duración bajo siembra directa en Marcos Juárez. In: Díaz Roselló, R. ed. *Aportes de la ciencia y la tecnología al*

manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 123-132.

de San Celedonio RP, Abeledo LG, Miralles DJ. 2014. Identifying the critical period for waterlogging on yield and its components in wheat and barley. *Plant and Soil*, 378: 265–277.

DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2016. Anuario estadístico agropecuario. [en línea]. Consultado 20 de febrero de 2019. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politica-agropecuaria/estadisticas-y-documentos>

Ernst OR, Dogliotti S, Cadenazzi M, Kemanian AR. 2018. Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield. *Field Crops Research*, 217: 180-187.

Ernst OR, Kemanian AR, Mazzilli SR, Cadenazzi M, Dogliotti S. 2016. Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity. *Field Crops Research*, 186: 107–116.

Fraisse CW, Sudduth KA, Kitchen NR. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *American Society of Agricultural Engineers*, 44:155-166.

Girardello V, Carneiro T, Santi A, Cherubin M, Kunz J, de Gregori T. 2014. Resistencia a penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade de soja em latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38: 1234-1244

Hamza MA, Anderson WK. 2005. Soil compaction in cropping systems .A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82: 121–145.

- Joensgard B, Halmoe S. 2003. Intra-field yield variation over crops and years. *European Journal of Agronomy*, 19: 23-33.
- Koenker R. 2016. Quantreg: Quantile Regression. R Package Version 5.26. [En línea]. 25 de Octubre 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=quantreg>.
- Kravchenko AN, Bullock DG. 2000. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92(1): 75 - 83.
- Marques da Silva JR. 2006. Analysis of the spatial and temporal variability of irrigated maize yield. *Biosystems Engineering*, 94 (3): 337–349.
- Moron 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., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2*, 2nd edition. 9, 961–1010. American Society of Agronomy.
- Novelli LE, Caviglia OP, Wilson MG, Sasal MC. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*, 195: 260–267.
- Papiernik SK, Lindstrom MJ, Schumacher JA, Farenhorst A, Stephens KD, Schumacher TE, Lobb DA. 2005. Variation in soil properties and crop yield across an eroded prairie landscape. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60 (6): 388-395.
- Passioura JB. 2002. Environmental biology and crop improvement. *Functional Plant Biology Journal*, 29: 537–546.
- Pravia MV. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio temporal en la investigación de cultivos agrícolas. [Tesis de Maestría]. Uruguay: Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 98p.

- Rubio V. 2018. Diagnóstico de la calidad física del suelo: impacto en el cultivo de maíz, efecto del paraplow como medida correctiva. [Tesis de Maestría]. Uruguay: Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 63p.
- Sasal MC, Boizard H, Andriulo AE, Wilson MG, Leonard J. 2016. Platy structure development under no-tillage in the northern humid pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and Tillage Research* 173: 33-41.
- Shatar TM, Mcbratney AB. 2004. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *Journal of Agricultural Science*. 142: 553–560.
- van Ittersum MK, Cassman KG, Grassini P, Wolf J, Tittone P, Hochman Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance: a review. *Field Crops Research* 143: 4–17.
- Wander MM, Bollero GA. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in illinois. *Soil Society of America Journal* 63: 961–971.

4 DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo fue cuantificar el impacto de las propiedades de suelo sobre el rendimiento promedio de una secuencia de cultivos y su variabilidad temporal. Para ello se utilizó información de un sitio con más de 15 años de agricultura continua sin labranza, el que a priori tendría variabilidad espacial en las propiedades de suelo y restricciones generadas por degradación de las propiedades físicas del suelo (Sasal et al., 2016). Sobre esta situación, inducida por la historia de manejo se superpuso variabilidad en la resistencia a la penetración del suelo (RP) generada por descompactación mecánica sub_superficial aplicada de manera transversal al área de estudio y en años diferentes.

En el trabajo no se analizó el efecto del tratamiento descompactado (D) sobre el rendimiento de los cultivos, sino que se utilizó para generar artificialmente un gradiente en la condición física del suelo superpuesto a niveles similares de otras propiedades del suelo. Por tanto, la variabilidad en RP resultó independiente de otras propiedades del suelo, levantando así la interdependencia entre ellas. Si bien la estrategia no logró un alto coeficiente de variación de las propiedades del suelo (< 30%), permitió relacionarlas con la variabilidad del rendimiento de la secuencia de cultivos. Al trabajar bajo la misma oferta de radiación, temperatura y precipitaciones, la variabilidad espacial del rendimiento responde a la variabilidad espacial en las propiedades del suelo, lográndose así relacionarlas de manera independiente de los factores que definen el rendimiento (Bakhsh et al., 2000).

Bajo estas condiciones fue posible identificar la propiedad limitante del rendimiento aplicando los conceptos propuestos por van Ittersum et al. (2013). Para ello se definió como rendimiento alcanzable, el máximo cuantificado para la secuencia de cultivos. Estimando la curva envolvente de la población de datos, y siguiendo la lógica de la ley del mínimo (von Liebig, 1855) fue posible identificar qué propiedad de suelo generó la brecha entre el Yalc y el Ya de la secuencia de cultivos (Figura 2.5).

La brecha de rendimiento total producto de las diferencias en propiedades de suelo fue en promedio de 23%, alcanzando valores máximos de 50%. De ésta variación total, la brecha explicada por propiedades identificadas como limitantes, fue en promedio 15% y alcanzó valores máximos de 26%. El resto corresponde a brecha de rendimiento atribuible a otras propiedades o atributos del suelo no cuantificadas (brecha no identificada, Non Id_Yg), pero que se encuentran actuando como factores limitantes. La proporción de la Non Id_Yg se incrementó en los sitios de menor rendimiento (Figura 2.5). A pesar de la existencia de esta Non Id_Yg, el método permitió además de identificar propiedades del suelo que limitan el rendimiento, descartar cuales no lo fueron. Identificar de forma precisa cual es la causa de los menores rendimientos aseguraría plantear las estrategias más eficientes para revertir cada situación en particular. Por ejemplo, la inclusión del tratamiento D se basó en que la descompactación mecánica sub_superficial disminuye la RP (Álvarez et al., 2009). Por tanto, la RP no operaría como factor limitante del rendimiento dentro de fajas que recibieron el tratamiento D. Sin embargo, la RP fue limitante tanto en el tratamiento D como en las SD (Figura 2.4). A su vez, en estas últimas, tampoco la RP fue la principal limitante, demostrando la importancia de identificar las limitantes sitio-especificas previo a la implementación de medidas correctivas.

La brecha de rendimiento de la secuencia de cultivos representa la pérdida de rendimiento acumulado a través del tiempo. Su magnitud posiblemente difiera de la generada sobre el rendimiento de cada cultivo considerado individualmente. La misma incluye, por tanto, un efecto que resulta relevante al considerarlo a lo largo del tiempo y para el sistema de cultivo en su conjunto. Por tanto, puede vincularse al concepto de *sutiles pero acumulativos efectos de la degradación sobre la productividad de los sistemas de cultivos* propuesto por Cassman (1999). Para condiciones ambientales que permiten implementar sistemas de doble cultivo anual, es relevante cuantificar los resultados del sistema en su conjunto. Maximizar el rendimiento de una secuencia implica optimizar el rendimiento de todos sus componentes, y no maximizar el rendimiento de un solo cultivo. Por tanto conocer

los umbrales a partir de los cuales cada propiedad de suelo limita el rendimiento de la secuencia permitiría implementar estrategias que favorezcan a todo sistema.

Las propiedades que aparecieron como limitantes en la mayor proporción del área fueron el COS y la RP (Figura 2.4). El COS se asocia con mayor disponibilidad de nutrientes y mejor estructura física del suelo. Esto último modifica propiedades hídricas como la infiltración y el agua disponible para las plantas (Martínez et al., 2008). Mayores contenidos de COS han sido asociados con mayores valores de intervalo hídrico óptimo (Rubio et al., 2018, Sadras et al., 2005). El cambio en las propiedades hídricas en combinación con un ambiente restrictivo para el crecimiento de raíces provocaría un efecto negativo tanto en la captura como en la utilización del agua.

Identificar las limitantes del rendimiento, tiene como principal objetivo mitigar su impacto sobre el rendimiento implementando estrategias de manejo diferencial y/o cambios en la secuencia de cultivos. Identificar las limitantes de rendimiento a partir de las propiedades del suelo, presenta como desventaja el alto costo generado por la densidad de muestreo necesaria. Nuestros resultados sugieren que es posible definir ambientes homogéneos definidos a partir del estudio de la variabilidad espacial y temporal del rendimiento. Combinando la variabilidad espacial con la temporal se identificaron cuatro zonas caracterizadas como EB, IB, EA e IB, pero las mismas no tuvieron una alta correspondencia con las propiedades del suelo identificadas como limitantes. Al agregar atributos topográficos en el análisis se logró identificar atributos del paisaje vinculados a la dinámica del agua en superficie como determinantes de la estabilidad temporal del rendimiento.

Las cuatro zonas identificadas presentaron distinto comportamiento en cuanto al rendimiento de la secuencia. La situación más desfavorable ocurrió en la zona IB, presentando rendimientos que fueron variables entre cultivos y a su vez en promedio rindieron por debajo de la media. Esta zona ocupó un 22% del área, y se asoció con menor concentración de COS y mayor RP (Figura 3.4, Figura 3.7). De todas formas, no existió una clara correspondencia con las propiedades identificadas como

limitantes del rendimiento dentro de la zona, lo que coincidió con que la brecha de rendimiento cuando el Ya fue más bajo estuvo explicada en mayor proporción por la $Non\ I_g_Y_g$. El comportamiento de la zona IB estuvo fuertemente asociado su posición topográfica, explicada por mayores valores de TWI. Esto implica que en dicha zona la humedad es potencialmente mayor debido a su posición en el paisaje, por lo que en ella la velocidad de infiltración es menor, presentando posibles problemas de drenaje.

Intuitivamente, el objetivo podría haber sido determinar que propiedades aseguran rendimientos altos todos los años, es decir el comportamiento de la zona EA, y conociéndolas, implementar medidas que reviertan las limitantes en las demás zonas. Sin embargo, los resultados obtenidos demuestran que la zona definida como IA se comportó aún mejor que la EA. En ésta, la variabilidad o inestabilidad deja de ser un factor negativo, ya que ocurre siempre en valores de rendimiento altos. Las condiciones edáficas y topográficas que definen esta zona, generan que en años “malos” el rendimiento no se reduzca hasta ser menor que la media, y en años “buenos” se alcancen los máximos rendimientos. Este comportamiento inesperado, muestra la importancia de la delimitación de 4 zonas, considerando la variabilidad temporal del rendimiento como una variable determinante.

Los resultados obtenidos muestran la magnitud del impacto que genera la variabilidad en las propiedades del suelo en la brecha de rendimiento de una secuencia de cultivos. Para minimizar esta brecha, es necesario identificar exactamente cuál es la propiedad o condición de cada sitio, y así evitar el uso de estrategias que no se relacionan con las limitantes. Los análisis realizados en esta tesis muestran un posible camino para lograrlo, combinando un análisis espacio temporal del rendimiento para identificar donde se ubican las situaciones más desfavorables, con un análisis específico (curva envolvente) para aislar que propiedad está limitando el rendimiento de los cultivos. A su vez, queda de manifiesto como es necesario incluir la descripción topográfica o toda la información disponible que se relacione con la dinámica del agua, ya que esta parecería ser el principal recurso determinante del rendimiento y su variabilidad.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez CR, Torres M, Chamorro ER, D´ambrosio D, Miguel A, Taboada MÁ. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Revista Ciencia del Suelo (Argentina)* 27 (2): 159-169.
- Álvarez R, Steinbach HS. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research* 104: 1–15.
- Andrews SS, Karlen DL, Mitchell JP. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture Ecosystems Environment* 90: 25–45.
- Aparicio V, Costa JL. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research* 96: 155–165.
- Bakhsh A, Colvin TS, Jaynes DB, Kanwar RS, Tim US. 2000. Using soil attributes and GIS for interpretation of spatial variability in yield. *American Society of Agricultural Engineers* 43(4): 819-828.
- Basso B, Bertocco M, Sartori L, Martin EC. 2007. Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in maize-wheat-soybean rotation. *European Journal of Agronomy* 26: 82-91.
- Batey T. 2009. Soil compaction and soil management -a review. *Soil Use and Management* 25(4): 335–345.
- Blackmore S, Godwin RJ, Fountas S. 2003 The Analysis of Spatial and Temporal Trends in Yield Map Data over Six Years. *Biosystems Engineering* 84 (4): 455–466.

- Boone FR, van der Werf KH, Kroesbergen B, ten Hag BA, Boers A. 1986. The effect of compaction of the arable layer in sandy soil on the growth of maize for silage. I. Mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 34: 155-171.
- Botta GF, Pozzolo O, Bomben M, Rosatto H, Rivero D, Ressia M, Tourn M, Soza E, Vázquez J. 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil and Tillage Research*, 96: 145 -154.
- Bray RH, Kurtz LT. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science* 59: 39 - 45.
- Bruinsma J. 2009. The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? En: En: Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. (2009, Roma) Food and Agriculture Organization of the United Nations Economic and Social Development Department. 2- 32
- Casanova D, Goudriaan J, Bouma J, Epema GF. 1999. Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice. *Geoderma* 91: 191–216.
- Cassman KG. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences U. S. A.* 96: 5952–5959.
- Cazorla CR, Masiero B. 2006. Resistencia a la penetración como indicador de compactación en ensayos de larga duración bajo siembra directa en Marcos Juárez. In: Díaz Roselló, R. ed. *Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur*. Montevideo, PROCISUR. pp. 123-132.
- Conlin T, Van den Driessche R. 2000. Response of soil CO₂ and O₂ concentrations to forest soil compaction at the long-term soil productivity sites in central British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science* 80: 625–632.

- De Neve S, Hofman G. 2000. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. *Biology Fertility Soils Journal* 30: 544–549.
- de San Celedonio RP, Abeledo LG, Miralles DJ. 2014. Identifying the critical period for waterlogging on yield and its components in wheat and barley. *Plant and Soil*, 378: 265–277.
- Díaz Zorita M, Duarte GA, Grove JH. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Tillage Research* 65: 1–18.
- Díaz Zorita M, Buschiazzi DE, Peinemann N. 1999. Soil organic matter and wheat productivity in the semiarid argentine pampas. *Agronomy Journal* 91 (2): 276-279.
- DIEA (Dirección de estadísticas agropecuarias). 2016. Anuario estadístico agropecuario. [en línea]. Consultado 20 de febrero de 2019. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politica-agropecuaria/estadisticas-y-documentos>
- Ernst OR, Dogliotti S, Cadenazzi M, Kemanian AR. 2018. Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield. *Field Crops Research*, 217: 180-187.
- Ernst OR, Kemanian AR, Mazzilli SR, Cadenazzi M, Dogliotti S. 2016. Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity. *Field Crops Research*, 186: 107–116.
- Ernst OR, Siri G. 2011. La agricultura en Uruguay: su trayectoria y consecuencias. In: *II Simposio Nacional de Agricultura (2011, Paysandú, Uruguay)*. Montevideo. Editorial Hemisferio Sur. 149 - 163.
- Evans LT. 1993. *Crop Evolution, Adaptation, and Yield*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 500p

- Fischer RAG, Edmeades OE. 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Science* 50: 85-98.
- Fletcher AL, Brown HE, Johnstone PR, de Ruiter JM, Zyskowski RF. 2011. Making sense of yield trade-offs in a crop sequence: a New Zealand case study. *Field Crops Research* 124: 149–156.
- Fraisse CW, Sudduth KA, Kitchen NR. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *American Society of Agricultural Engineers*, 44:155-166.
- Franzluebbers AJ, Sawchik J, Taboada MA. 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture and crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190: 18–26.
- 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. 51 p
- Girardello V, Carneiro T, Santi A, Cherubin M, Kunz J, de Gregori T. 2014. Resistencia a penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade de soja em latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38: 1234-1244
- Glinski J, Lipiec J, 1990. *Soil physical conditions and plant roots*. Boca Raton, Florida. CRC Press Inc. 260p.
- Guilpart N, Grassini P, Sadras VO, Jagadish T, Cassman KG. 2017. Estimating yield gaps at the cropping system level. *Field Crops Research* 206: 21–32.
- Hamza MA, Anderson WK. 2005. Soil compaction in cropping systems .A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82: 121–145.

- Hochman Z, Prestwidge D, Carberry PS. 2014. Crop sequences in Australia's northern grain zone are less agronomically efficient than implied by the sum of their parts. *Agricultural Systems* 129: 124–132.
- Joensgard B, Halmoe S. 2003. Intra-field yield variation over crops and years. *European Journal of Agronomy*, 19: 23-33.
- Koenker R. 2016. Quantreg: Quantile Regression. R Package Version 5.26. [En línea]. 25 de October 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=quantreg>
- Kravchenko AN, Bullock DG. 2000. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92(1): 75 - 83.
- Laborte AG, de Bie K, Smaling EMA, Moya PF, Boling A, Van Ittersum MA. 2012. Rice yields and yield gaps in Southeast Asia: past trends and future outlook. *European Journal of Agronomy* 36: 9–20.
- Lobell DB, Cassman KG, Field CB. 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources* 34: 179–204.
- Marques da Silva JR. 2006. Analysis of the spatial and temporal variability of irrigated maize yield. *Biosystems Engineering*, 94 (3): 337–349.
- Martínez E, Fuentes JP, Acevedo E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Science Plant Nutrition* 8 (1): 68-96.
- Moron A, Quincke A, Molfino J, Ibáñez W, García A. 2012. Soil quality assessment of Uruguayan agricultural soils. *Agrociencia Uruguay* 16: 135–146.
- Nawaz MF, Bourrié G, Trolard F. 2013 Soil compaction impact and modelling. A review *Agronomy for Sustainable Development* 33: 291–309.

- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2*, 2nd edition. 9, 961–1010. American Society of Agronomy.
- Novelli LE, Caviglia OP, Wilson MG, Sasal MC. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*, 195: 260–267.
- Papiernik SK, Lindstrom MJ, Schumacher JA, Farenhorst A, Stephens KD, Schumacher TE, Lobb DA. 2005. Variation in soil properties and crop yield across an eroded prairie landscape. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60 (6): 388-395.
- Passioura JB. 2002. Environmental biology and crop improvement. *Functional Plant Biology Journal*, 29: 537–546.
- Pierce FJ, Nowak P. 1999 Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, 67: 1–85.
- Pittelkow CM, Linquist BA, Lundy ME, Liang X, Jan van Groenigen K, Lee J, van Gestel N, Six J, Venterea RT, van Kessel C. 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research* 183: 156-168.
- Pravia MV. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio temporal en la investigación de cultivos agrícolas. [Tesis de Maestría]. Uruguay: Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 98p.
- Rubio V. 2018. Diagnóstico de la calidad física del suelo: impacto en el cultivo de maíz, efecto del paraplow como medida correctiva. [Tesis de Maestría]. Uruguay: Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 63p.
- Rubio V, Gama D, Pérez M, Quincke A. 2018. Evaluación del intervalo hídrico óptimo en un brunosol éutrico típico bajo diferentes intensidades de uso agrícola. *Agrociencia Uruguay* 22 (1): 107-115.

- Sadras VO, O’Learyb GJ, Rogeta DK. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research* 91: 131–148.
- Sasal MC, Boizard H, Andriulo AE, Wilson MG, Leonard J. 2016. Platy structure development under no-tillage in the northern humid pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and Tillage Research* 173: 33-41.
- Schneider F, Don A, Hennings I, Schmittmann O, Seidel SJ. 2017. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil and Tillage Research* 174: 193-204.
- Shatar TM, Mcbratney AB. 2004. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *Journal of Agricultural Science*. 142: 553–560.
- Soane BD. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research* 16: 179-201.
- Terra JA, Shaw JN, Reeves DW, Raper RL, van Santen E, Schwab EB, Mask PL. 2006. Soil Management and Landscape Variability Affects Field-Scale Cotton Productivity. *Soil Science Society of America Journal* 70: 98–107.
- van Ittersum MK, Cassman KG, Grassini P, Wolf J, Tittonell P, Hochman Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance: a review. *Field Crops Research* 143: 4–17.
- van Ittersum MK, Rabbinge R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research* 52: 197–208.
- von Liebig J. 1855. *The Natural Laws of Husbandry* London, UK: Walton and Maberly. 408p
- Wander MM, Bollero GA. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Society of America Journal* 63: 961–971.

Webb RA. 1972. Use of the boundary line in the analysis of biological data. *Journal of Horticultural Science* 47: 309-319.

Wingeyer AB, Amado T, Pérez-Bidegain M, Studdert GA, Perdomo Varela CH, Garcia FO, Karlen DL. 2015. Soil quality impacts of current South American. *Sustainability* 7: 2213–2242.