

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RELACIÓN ENTRE RENDIMIENTO DE TRIGO Y MAÍZ DE SEGUNDA Y LA
VARIABILIDAD ESPACIAL DE ATRIBUTOS EDÁFICOS Y TOPOGRÁFICOS
DENTRO DE LA MISMA CHACRA

por

Fabián BERTÓN FERREIRA
Joaquín ROSTÁN CALCATERRA

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2014

Tesis aprobada por:

Director

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Mónica Cadenazzi

Ing. Agr. Guillermo Siri-Prieto

Fecha: 10 de setiembre de 2014

Autor:

Fabián Bertón Ferreira

Joaquín Rostán Calcaterra

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Ing. Agr. Oswaldo Ernst e Ing. Arg. Mónica Cadenazzi, por la ayuda y tiempo dedicado en la elaboración de este trabajo.

A nuestros padres: Raúl Bertón, Cristina Ferreira, Gerardo Rostán y Ana María Calcaterra, por el apoyo brindado.

A nuestros amigos: Gonzalo Tucac y Juan Oliver.

A la familia Diez por el aguante durante la elaboración de dicha tesis.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 VARIABILIDAD ESPACIAL EN LA CHACRA	2
2.2 AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y MANEJO SITIO-ESPECÍFICO	2
2.3 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABILIDAD	4
2.3.1 <u>Mapas de rendimiento</u>	5
2.3.2 <u>Muestreo de suelos</u>	5
2.3.3 <u>Análisis geoestadístico</u>	6
2.4 RELACIÓN DEL RENDIMIENTO CON PROPIEDADES DEL SUELO	7
2.4.1 <u>Resistencia del suelo</u>	8
2.4.2 <u>Topografía</u>	8
2.4.3 <u>Propiedades químicas</u>	9
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	11
3.1 MANEJO DE LOS CULTIVOS	13
3.2 DETERMINACIONES	14
3.3 DATOS CLIMÁTICOS	15
3.4 COSECHA MANUAL	15
3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	15
3.5.1 <u>Estadística descriptiva</u>	15
3.5.2 <u>Análisis espacial</u>	15

3.5.3	<u>Análisis de tablas de contingencia</u>	16
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	18
4.1	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	18
4.2	DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES.....	19
4.2.1	<u>Descripción de todas las variables</u>	19
4.2.2	<u>Definición de las zonas con distinta productividad</u>	20
4.2.3	<u>Definición de zonas utilizando datos de monitores de rendimiento de maíz y trigo</u>	21
4.3	COMPARACIÓN ENTRE AMBIENTES.....	22
4.4	RENDIMIENTOS DE MAÍZ Y TRIGO SEGÚN ATRIBUTOS EDÁFICOS.....	26
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	32
6.	<u>RESUMEN</u>	33
7.	<u>SUMMARY</u>	34
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	35

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Descripción de las unidades de suelo CONEAT presentes en el predio	11
2. Descripción de tratamientos aplicados al trigo	12
3. Manejo agronómico trigo 2011	13
4. Manejo agronómico maíz 2011-2012	14
5. Resumen de las variables relevadas	19
6. Rendimiento de maíz de segunda, según zonas diferenciadas de producción construidas por cosecha manual	20
7. Componentes de rendimiento de maíz según zonas construidas por cosecha manual	21
8. Rendimiento de trigo y maíz según zonas diferenciadas de producción construidas a partir de sus rendimientos	22
9. Tabla de contingencia entre zonas construidas por rendimiento de maíz(filas) y zonas pre-definidas (columnas). Se presentan las frecuencias absolutas con los desvíos respecto a lo esperado bajo independencia entre paréntesis	23
10. Relación entre zonas construidas por rendimiento de trigo(filas) y zonas pre-definidas (columnas). Se presentan las frecuencias absolutas con los desvíos respecto a lo esperado bajo independencia entre paréntesis	24
11. Tabla de contingencia entre zonas construidas por rendimiento	

de trigo(Columnas) y de maíz (Filas). Se presentan las frecuencias absolutas con los desvios respecto a lo esperado bajo independencia entre paréntesis	24
12. Tabla de contingencia entre zonificación conjunta (filas) y zonas pre-definidas (columnas). Se presentan las frecuencias absolutas con los desvíos respecto a lo esperado bajo independencia entre paréntesis	25
13. Características edáficas y topográficas según zonas construidas a partir del mapa de rendimiento de trigo.....	26
14. Rendimiento de maíz y propiedades edáficas y topográficas según zonas de producción contruidas por rendimiento de maíz	28
15. Zonificación de la chacra en base al contenido de carbono en el horizonte A	31

Figura No.

1. Comportamiento típico de un semivariograma acotado con una representación de los parámetros básicos.....	7
2. Ubicación de las grillas de muestreo.....	13
3. Precipitaciones durante el periodo mayo 2011- junio 2012 en relación al promedio 1961-90. Y etapas fenológicas de los cultivos de trigo y maíz.....	18
4. Mapas de monitor de rendimiento de trigo 2011 y de maíz 2012.....	22
5. Rendimiento de maíz según % de carbono en el horizonte A.....	27
6. Análisis de regresión lineal del rendimiento de maíz según la elevación, calculada a partir de 406 pares de valores.....	29
7. Rendimiento de trigo según elevación del terreno.....	30

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda mundial de alimentos, ha llevado a la agricultura a enfrentar el desafío de producir más y mejor. Mas, aumentando su producción de la mano de la expansión hacia nuevas áreas agrícolas y por aumento de los rendimientos; cuando se habla de producir mejor se hace referencia a hacerlo de forma más eficiente, disminuyendo costos, y más sustentable ambientalmente.

La búsqueda de la expansión hacia nuevas áreas ha llevado a la agricultura a zonas de menor aptitud agrícola y esto sumado a los años consecutivos en agricultura, trajo como consecuencia un aumento en la variabilidad dentro de las unidades de producción (chacra), siendo el desafío actual el predecir la forma y magnitud de cómo lo hacen y sus causas.

Tal variabilidad espacial y temporal, se puede cuantificar mediante la Agricultura de Precisión; esta tecnología tiene como principales objetivos reducir costos en la producción de granos, aumentar la productividad, y hacer un uso más eficiente de los insumos (Bongiovanni et al., 2006a).

Una de las herramientas que se utiliza para captar esa variabilidad dentro de las chacras son los mapas de rendimientos generados por los monitores de las cosechadoras.

El siguiente trabajo tiene como objetivo principal estudiar la utilización de estos mapas de rendimiento de un año en particular y observar en que medida pueden captar la variabilidad de la chacra. Analizar la concordancia entre zonas de producción de distintos cultivos y zonas de producción definidas previamente.

Otro de los objetivos, una vez obtenidos los mapas, es interpretar y analizar el origen de su variabilidad mediante el estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo.

Las hipótesis planteadas para el trabajo fueron: para cultivos sucesivos dentro de una misma chacra las zonas de producción coinciden entre si y con las zonas pre-definidas. A su vez éstas están determinadas por distintas características del suelo ya sea química y física como topográficas y tienen repetibilidad en cultivos sucesivos, por lo que permiten ajustar de manera diferencial el manejo de los cultivos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 VARIABILIDAD ESPACIAL EN LA CHACRA

La agricultura en nuestro país se desarrolla bajo un ambiente muy inestable temporal como espacialmente, y esto se ve reflejado en el rendimiento de los cultivos, los cuales varían mucho dentro de una chacra en un mismo año y entre años.

En el trabajo de Ahunchain y Klasseen (1990) se estudiaron las causas de variabilidad en el rendimiento de trigo, concluyendo que si los factores climáticos y los de manejo no fueran limitantes y si las diferencias existentes a nivel de chacra disminuían por ejemplo con una fertilización diferencial los responsables de la variabilidad de rendimientos deberían ser factores de suelo. Estos autores sugieren que resultaría prioritario orientar la investigación para identificar qué factores del suelo son los causantes de la variación de los rendimientos.

En otros estudios, algunas variables como la topografía, atributos del terreno y su impacto en la redistribución del agua, y algunas propiedades del suelo han sido descritas como ejemplos de factores relativamente estables y permanentes que afectan el rendimiento de los cultivos (Kravchenko y Bullock, 2000).

Terra et al. (2010) encontraron que en promedio, los atributos edáficos y topográficos explicaron el 54% de la variación de rendimiento de los cultivos (24-93%), siendo la elevación y la CE las variables más frecuentemente correlacionadas y el maíz el cultivo más relacionado a estos.

2.2 AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y MANEJO SITIO-ESPECÍFICO

La agricultura mundial ha enfrentado, a lo largo del tiempo, el desafío permanente de aumentar la producción agrícola en respuesta a la creciente demanda por parte de la población. El aumento se ha producido de dos formas: con la expansión hacia nuevas áreas agrícolas, y dentro de cada área, con el aumento de los rendimientos.

El aumento de los rendimientos se obtuvo mediante la generación de nuevas tecnologías.

Con la modernización de las prácticas agrícolas, surgen nuevos desafíos, principalmente respecto al concepto de sustentabilidad ambiental y económica del proceso de producción. La respuesta de la investigación, ha sido la generación de tecnologías que permitan desarrollar técnicas que cuantifiquen y manejen diferenciadamente la variabilidad natural del área productiva. A esta nueva tecnología se la denomina Agricultura de Precisión (AP), la cual se orienta a optimizar el uso de los insumos agrícolas en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola (Mantovani et al., 2006)

La aplicación del concepto de la agricultura de precisión está siendo posible gracias a la evolución de varias tecnologías: Sistema de Posicionamiento Global (GPS); Sistemas de Información Geográfica (SIG); Percepción remota; Tecnologías de dosis variable; y Análisis de datos georeferenciados (Geoestadística, Econometría Espacial, Análisis multivariado, y CART, etc.), (Mantovani et al., 2006).

Según Plant (2001) los efectos de la variación de suelos y sus efectos combinados con las prácticas de manejo sobre el rendimiento de los cultivos es reconocida. Sin embargo, la mayor parte de los cultivos son manejados en forma uniforme, basados en requerimientos promedio que ignoran esta variabilidad, generando ineficiencias económicas y ambientales.

La agricultura de precisión surge entonces como un concepto basado en delimitación de zonas u ambientes dentro de una chacra (Plant, 2001).

Según Plant, citado por Roel y Terra (2006), son tres los criterios básicos que deben cumplirse para justificar el manejo sitio-específico: a) la existencia de importante variabilidad espacial en factores que influyen la productividad de los cultivos; b) la identificación y cuantificación de las causas de la variabilidad de estos factores; y c) el conocimiento científico-agronómico que permita utilizar la información recolectada para el logro de un beneficio productivo, económico o ambiental.

Estas sub-áreas dentro de la chacra deberían expresar una combinación relativamente homogénea de factores del rendimiento para las que sería apropiado un manejo similar del suelo y los cultivos (Terra et al., 2010).

Tanto las fuentes de información utilizada como las técnicas para delinear “Zonas de Manejo” son diversas. Entre las fuentes se destacan: a) mapas detallados y semi detallados de suelos; b) mapas de distribución espacial de propiedades del suelo en base a muestreos intensos e interpolaciones geoestadísticas; c) imágenes remotas tomadas por plataformas montadas en satélites o aviones; d) mapas de rendimiento; e) atributos edáficos y topográficos estable temporalmente (elevación, pendiente, textura, conductividad eléctrica), (Terra et al., 2010).

Esta metodología se basa en estudiar la variabilidad del suelo y la planta, con el fin de establecer tendencias de rendimiento dentro de una misma área y también, a lo largo del tiempo, con las variaciones climáticas y modificaciones del suelo. Por lo tanto, para entender y aplicar la agricultura de precisión, es necesario definir dos conceptos básicos: la variabilidad espacial, que expresa las diferencias de producción en un mismo campo, en una misma zafra y cosecha y la) Variabilidad temporal, que expresa los cambios de producción en un mismo campo, en distintas campañas de cosecha (Bongiovanni et al., 2006a).

Las zonas de manejo no implican necesariamente recomendaciones de manejo diferenciales entre ellas ni tampoco son utilizadas para todas las aplicaciones de agricultura de precisión. Es reconocido que las zonas de manejo pueden ser diferentes dependiendo de las condiciones ambientales, el cultivo y el manejo de suelos utilizado. Por tanto, las zonas de manejo deberían ser analizadas, evaluadas y ajustadas en el tiempo, ya que las mismas no son necesariamente estáticas y posiblemente varíen ante cambios en las prácticas de manejo general de los productores. Pueden ser necesarios muchos años de datos para entender completamente las interacciones entre la variabilidad espacial y temporal en las propiedades de los suelos y la productividad de los cultivos (Bongiovanni et al., 2006a).

2.3 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD

Para el análisis de la variabilidad existen diferentes metodologías las cuales cuantifican la variación espacial en atributos del suelo y los cultivos. Plant (2000) clasifica estos métodos de medición como: discretos (muestreo de

suelos y plantas en grillas), continuos (monitores de rendimiento, sensores de conductividad eléctrica del suelo) y remotos (imágenes satelitales).

Con la información obtenida de los monitores de rendimiento y muestreo de suelos, se definen zonas agrupando variabilidades, y se procesan utilizando métodos analíticos que incorporan la variabilidad espacial como geoestadística y el análisis multivariado.

2.3.1 Mapas de rendimiento

Constituyen la mejor herramienta para la delineación de zonas de manejo o diseño de zonas donde muestrear los diferentes factores que afectan la producción, ya que el rendimiento del cultivo es el mejor indicador de la productividad del suelo en las distintas áreas de una chacra (Roel y Terra, 2006). En estas situaciones se necesitan datos de varias zafas climáticamente contrastantes debido al riesgo que efectos de años opuestos se neutralicen (Terra et al., 2010).

Los mapas de rendimiento permiten recolectar datos para delimitar zonas diferentes, para luego relacionar características edáficas, propiedades físicas y químicas del suelo, que puedan causar diferencias en los rendimientos.

Para la construcción de estos mapas se recorre la superficie que del ancho de la plataforma de la cosechadora y la distancia recorrida por esta en el tiempo que tarda en grabar un dato y otro. El monitor de rendimiento de la cosechadora está conectado a un GPS y esos datos componen un mapa de rendimiento, permitiendo captar la variabilidad espacial del rendimiento de una chacra.

2.3.2 Muestreos de suelo

La información de los relevamientos consiste en la localización geográfica de los suelos (delineación), datos de laboratorio (textura, densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico) e interpretaciones. Esta información es organizada en unidades de mapeo (Roel y Terra, 2006).

Según Roel y Terra, citados por Bosch y Lecueder (2011), para la realización de mapas de propiedades del suelo, la limitante es la cantidad de muestras que deben ser recolectadas y analizadas, con un alto costo en tiempo y dinero, lo que lo hace a priori prohibitivo a nivel productivo.

2.3.3 Análisis geoestadístico

Según Best y León (2006), la utilización de mapas ha sido tradicionalmente asociada a la ubicación de elementos en los mismos. Actualmente, mediante los llamados Sistemas de Información Geográfica (SIG), el punto de vista ha variado hacia el resolver problemáticas que surgen al intentar realizar asociaciones de tipo espacial.

Han surgido distintas herramientas para contestar en términos numéricos si una variable posee algún patrón espacial, de tal manera que pueda ser representada o asociada a otra(s) y así explicar el comportamiento productivo y de calidad de un cultivo en términos espaciales y temporales. Esta es la principal función de la “geoestadística”.

Cuando el objetivo es hacer predicción, la geoestadística opera básicamente en dos etapas. La primera es el análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio. En la segunda fase se hace predicción en sitios de la región no muestreados por medio del método de kriging (técnica de interpolación), proceso que calcula un promedio ponderado de las observaciones muestrales (Cressie, 1993).

En la mayoría de las variables, observaciones cercanas en el espacio son más semejantes entre sí que con aquellas más distantes, por lo que la distribución espacial de dichos atributos no es independiente (Plant 2001, Best y León 2006, Bosch y Lecueder 2011).

Para llevar a cabo el análisis estructural que corresponde a la primera etapa, se usan diferentes funciones siendo una de las más generalizadas la semivarianza. El variograma es una descripción matemática de la relación entre la varianza entre pares de observaciones (puntos de datos) y la distancia que separa esos puntos (h). Para interpretar el semivariograma experimental se parte del supuesto de que a menor distancia entre los sitios mayor similitud o correlación espacial entre las observaciones. Por ello en presencia de autocorrelación se espera que para valores de h pequeños el semivariograma experimental tenga magnitudes menores a las que este toma cuando las distancias h se incrementan (Giraldo Henao, 2002).

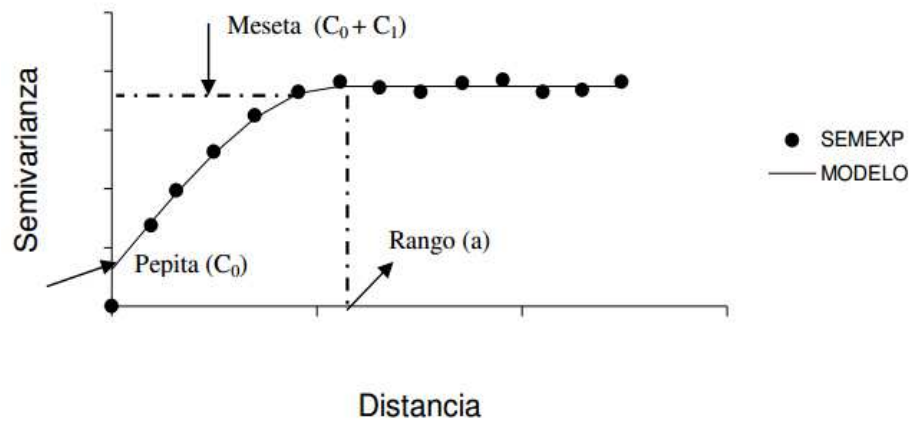


Figura No. 1 Comportamiento típico de un semivariograma acotado con una representación de los parámetros básicos (Fuente: Giraldo Henao, 2002).

SEMEXP corresponde al semivariograma experimental y MODELO al ajuste de un modelo teórico.

Este modelo consta de tres parámetros: “Efecto Pepita” se denota por C_0 y representa una discontinuidad puntual del semivariograma en el origen, el cual puede ser debido a errores de medición en la variable o a la escala de la misma; “Meseta” es la cota superior del semivariograma, también puede definirse como el límite del semivariograma cuando la distancia h tiende a infinito; “Rango” el cual corresponde a la distancia a partir de la cual dos observaciones son independientes y se interpreta como la zona de influencia.

2.4 RELACIÓN DEL RENDIMIENTO CON PROPIEDADES DEL SUELO

Atributos edáficos y topográficos están habitualmente correlacionados con los patrones de variación de rendimiento de cultivos agrícolas (Terra et al., 2006).

La relación entre el desarrollo del cultivo y las características del suelo puede dar criterios de manejo diferenciado de la parcela de cultivo, paso inicial para la agricultura de precisión (López Lozano et al., 2007).

2.4.1 Resistencia de suelo

El rendimiento del cultivo está relacionado con la compactación del suelo y la disponibilidad de agua. En períodos de escasez de lluvias, el déficit de agua para plantas y la resistencia del suelo a la penetración de raíces son los principales factores que causan la pérdida de rendimiento. La profundidad (cm) a la cual la resistencia a la penetración alcanza el valor de 2 MPa, se ve afectado por el estado de compactación y es directamente reflejado en los rendimientos de los cultivos. En suelos con alta compactación, las plantas ven restringido su crecimiento temprano principalmente por la resistencia a la penetración de raíces más que por déficit hídrico. En contraste, en suelos movidos o no muy compactados, la resistencia a la penetración es mucho menos importante que el déficit hídrico (Gubiani et al., 2010)

Según Özgöz y Abdullah (2007), la resistencia a la penetración con valores medidos después de la labranza y después de la cosecha en sitios experimentales no fue alta para restringir el crecimiento de plantas de maíz de segunda.

Por otra parte también, Mahl et al. (2008), indican que la preparación del suelo con el uso del cincel comparado con siembra directa, no influyo en la productividad del maíz, sugiriendo que los valores de resistencia de suelo a la penetración no son impedimento para el desarrollo del cultivo de maíz.

2.4.2 Topografía

Los atributos de terreno tienen gran influencia sobre algunas propiedades de los suelos por el simple hecho de que la topografía es uno de los cinco factores de formación de suelos. En cultivos extensivos de secano se ha encontrado que los patrones de disponibilidad de agua para los cultivos, resultante de la interacción entre las propiedades estáticas de los suelos, la topografía y la variabilidad temporal relacionada a factores climáticos, explican gran parte de la variabilidad de rendimiento de los cultivos a través de la fisiografía (Roel y Terra, 2006).

Según Terra et al. (2010), los atributos topográficos junto con los edáficos son los que explican la mayor variación de rendimientos de los cultivos, siendo la conductividad eléctrica y la elevación las variables más

frecuentemente correlacionadas, y el maíz el cultivo más relacionado a estas. También, la información recabada por el autor sugiere que el cultivo de maíz es más sensible en copiar las variaciones del terreno que el trigo, siendo los atributos topográficos junto con la conductividad eléctrica del suelo los factores que permitieron delinear zonas de productividad contrastante dentro de una chacra.

Kaspar et al., citados por Terra et al. (2010), encontraron que la relación entre atributos topográficos y rendimiento de maíz fue dependiente del régimen de precipitaciones durante la estación de crecimiento, en años lluviosos estos explicaron apenas el 13% de la variación de rendimiento, mientras que en años secos el 78%.

Según López Lozano et al. (2007), la granulometría dentro de una parcela varía de una zona a otra. En general, las zonas de alta producción de maíz corresponden con las topografías más elevadas en las que dominan materiales gruesos. Las de menor producción tienden a localizarse en áreas más bajas con mayor contenido de arcilla y a menudo con tendencia a encharcarse.

2.4.3 Propiedades químicas

Entre las características químicas de un suelo que están directamente relacionadas con la fertilidad del mismo, se pueden mencionar a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), afectada positivamente por la materia orgánica y el contenido de arcilla (Bosch y Lecueder, 2011).

En este sentido la materia orgánica del suelo (MO), la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el contenido de P y K, explicaron el 30 % de la variabilidad de rendimiento para maíz y soja, siendo el contenido de MO el más influyente principalmente en suelos pobres (baja MO), (Kravchenko y Bullock, citados por Otaño y Rodríguez, 2010).

La CIC es la cuantificación de la capacidad del suelo de retener cationes y se expresa como meq/100 g de suelo. Las posiciones de intercambio están ocupadas por bases como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} , H^{+} , Al^{3+} , Mn^{2+} y Fe^{3+} (Durán et al., citados por Bosch y Lecueder, 2011).

El carbono orgánico es un indicador de la calidad del suelo y es un atributo relevante ya que además de su función como reservorio de nutrientes,

define también muchos atributos físicos, químicos y biológicos (Ernst y Siri, 2011).

Según Navarro et al. (2008), existe una correlación positiva entre el contenido de materia orgánica del suelo y rendimiento de maíz, con un R^2 de 0,4941.

Las propiedades relacionados con el potencial redox del suelo y la salinidad no se correlaciona con la variabilidad espacial del rendimiento de maíz, pero se acreditan con la contribución a la reducción del rendimiento general de todo el lote (Sánchez et al., 2011).

Por otra parte, los patrones de variación de nutrientes como fósforo (P) y potasio (K) pueden estar relacionados con el tipo de suelo, pero en muchos casos están más afectados por prácticas de manejo, como la propia fertilización, la historia de la chacra, o la remoción diferencial de nutrientes dentro de éstas (Cambardella et al., citados por Del Campo 2006, Mallarino 2006, Otaño et al. 2010).

En lo que refiere a pH, Byre et al., citados por Bosch y Lecueder (2011), indican que afecta la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes esenciales para los cultivos y es una variable que controla y determina distintos procesos de la planta y microorganismos, siendo los pH ácidos, negativos para el cultivo.

En comparación con otros cultivos, el maíz se adapta bastante bien a la acidez o alcalinidad del terreno. Puede cultivarse con buenos resultados entre pH 5.5 y 7.0 (Havlin et al., 2005).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento fue realizado en el periodo mayo 2011- junio 2012, contemplando el doble cultivo anual trigo/maíz, en una chacra comercial ubicada en camino vecinal sobre ruta 96 Km 24, en zona aledaña a la ciudad de Dolores departamento de Soriano, Uruguay (39°10'95" E, 62°85'105" N, elevación 25m). La misma pertenece a la empresa ADP.

La chacra se ubica sobre formación geológica Fray Bentos según Carta geológica de Uruguay (Bossi et al., 1998), y en las unidades de suelo Villa Soriano y Fray Bentos según la carta de suelo 1/200.000. Cuenta con una superficie de 105 hectáreas en grupos de suelos coneat 03.51 y 11.2 sobre los padrones 12005 y 12006. En el Cuadro No. 1 se describen los grupo de suelos coneat anteriormente mencionados.

Cuadro No. 1 Descripción de las unidades de suelo CONEAT presentes en el predio

Grupo Coneat	Índice	Unidad de suelo	Mat Geológico	Suelos Dominantes	Suelos asociados
03.51	175	Villa Soriano	Sedimentos limo arcillosos de color pardo	Brunosoles Eutricos Luvicos	Solonetz
11.2	166	Fray Bentos	Sedimentos limosos que recubren la Formación Fray Bentos	Brunosoloes Eutricos Típicos profundos	Brunosoloes Eutricos Típicos Superficiales y Solonetz

Fuente: URUGUAY. MGAP. PRENADER (2010).

La chacra se encuentra dividida en tres zonas de productividad, las que fueron establecidas en base a: mapas de rendimientos generados a partir de una base de datos georeferenciados de 5 años, la que se obtuvo utilizando

monitores de rendimiento en cosechadoras equipadas con GPS, imágenes satelitales de índice verde (IVDN) e información topográfica y planimétrica de la chacra. Estas zonas, llamadas de aquí en más como “pre-definidas” fueron establecidas por el equipo técnico de Agricultura por Ambientes (AxA) de ADP. Se establecieron 3 zonas: zona A, de alto rendimiento, dicha zona rindió siempre un 30% por encima de la media de la chacra; zona B, de rendimiento variable, dicha zona dependiendo del año y del cultivo en cuestión, rindió por encima o por debajo de la media; zona D, de bajo rendimiento, dicha zona rindió siempre 30% por debajo de la media.

A su vez, dentro de cada zona pre-definida se delimitaron sub-ambientes, en base a datos de altimetría y topografía del terreno.

En un área de 9,72 hectáreas (Figura No. 2), se instaló un experimento con tratamientos de fertilización al trigo, los que cruzaron estos tres ambientes de productividad. Los tratamientos consistieron en una combinación aditiva de nutrientes (P, K y S) dispuestos en dos bloque al azar. De ésta forma, cada tratamiento estuvo presente en todos los ambientes pre-establecidos.

Cuadro No. 2 Descripción de tratamientos aplicados al trigo

Tratamiento	N (KgN/ha)	P (KgP/ha)	K (KgK/ha)	S (KgS/ha)
N-P	23,4	59,8	0	
N-P-K	23,4	59,8	51	
N-P-K-S	23,4	59,8	51	19
N-P-K-S 2	12,6	32,2	49	6,65
Chacra	18	46	0	

Los tratamientos se lograron combinando fertilizantes fosfato di amónico (18-46-0); cloruro de potasio (0-0-60) y sulfato de calcio.

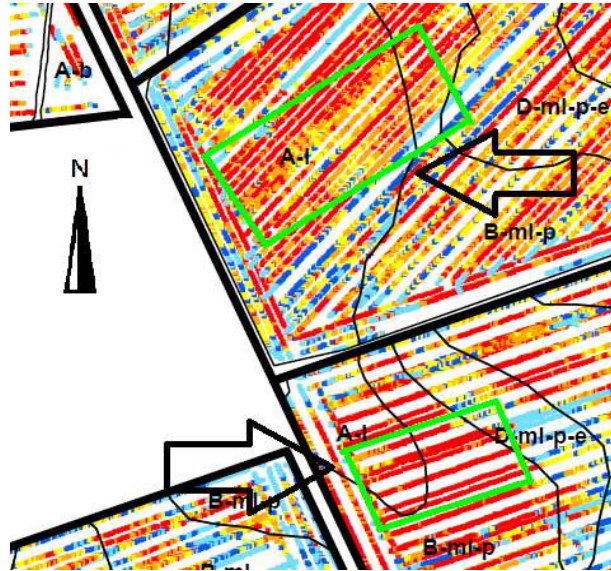


Figura No. 2 Ubicación de las grillas de muestreo

En el presente trabajo se analiza y presenta solamente el comportamiento de la secuencia trigo/maíz en los distintos ambientes de productividad. La respuesta a la fertilización en los distintos ambientes está en el trabajo de Oliver y Tucac aún sin publicar.

3.1 MANEJO DE LOS CULTIVOS

A continuación se presentan los manejos realizados a los cultivos desde la implantación hasta la cosecha.

Cuadro No. 3 Manejo agronómico trigo 2011

Fecha	Estadio	Manejo agronómico
8/7	-	65 kg/Ha de yeso agrícola y 150 kg/Ha de kcl
12/7	-	120 kg/Ha de 12/52 y siembra de trigo biointa 1005 120 Kg/Ha
11/8	Z 22	0,4 l/ha de Merit y 13,4 gr/Ha Tronador
15/8	Z 23	150 Kg/Ha de Solmix
30/8	Z 30	140 Kg/Ha de Urea
4/10	Z 49	1 l/Ha de Nativo y 100 cc/Ha de Intrepid
6/12		Cosecha

Cuadro No. 4 Manejo agronómico maíz 2011-2012

<u>Fecha</u>	<u>Estadio</u>	<u>Manejo Agronómico</u>
8/12	---	Pulverización terrestre 2,5 lts Panzer Gold y 1,5 lts Dual Gold
10/12	---	Siembra Variedad KM 4321 TDmax
15/12	---	Fertilización 100 kg de 18/46
12/1	V4	Fertilización 200 lts Solmix
10/3	R1	Aplicación de 350cc de Amixtar Xtra, 0,5lts Nimbus y 80cc de Belt
9/5	R6	Cosecha Manual
1/6	R6	Cosecha Mecánica John Deere 9770 y 9750

3.2 DETERMINACIONES

Para el presente trabajo se determinó:

- el rendimiento de trigo y maíz obtenidos con una cosechadora John Deere STS 9750 y 9770 equipada con un monitor de rendimiento y GPS. Se registró el rendimiento cada 5 m por el ancho de plataforma (10,66 m).
- se realizaron muestreos de suelos en grillas de 30*30m tomándose una muestra compuesta por 10 sub-muestras por sitio, en un radio de 10 m alrededor de un punto ge-referenciado, correspondiendo 10 sitios de muestreo por parcela en el Bloque 1 y 8 en el bloque 2. En cada sitio se determinó: humedad, concentración de carbono orgánico, potasio (meq/100g suelo) y Ph en los primeros 20 cm del perfil. Las determinaciones de humedad se realizaron a partir del secado de una muestra de 100g aproximadamente en estufa a 100 °C. El porcentaje de carbono orgánico se realizó por el método Walkley-Black; el contenido de potasio bajo la forma de cloruro de potasio, por la

técnica de determinación de bases mediante extracción con acetato de amonio 1M a pH 7 y lectura por espectrofotómetro de absorción atómica. El pH se determinó tanto en H₂O como en KCl por el método potenciométrico y el fósforo se determinó por la técnica de Bray No. 1.

- En los 108 sitios se realizó una descripción del perfil del suelo con la utilización de un taladro holandés. Se determinó el espesor de cada uno de los horizontes (A, B, y C).

3.3 DATOS CLIMÁTICOS

Los valores climáticos de referencia para el periodo 1961-1990, fueron obtenidos de la Dirección Nacional de Meteorología (URUGUAY. MDN. DNM, 1990), correspondientes a la estación meteorológica de Mercedes. Mientras que los valores de precipitación del periodo en donde se realizó el experimento, fueron proporcionados por la empresa ADP.

3.4 COSECHA MANUAL

Cuando el cultivo de maíz se encontraba en la etapa fenológica R6 se cosecharon manualmente 10 metros lineales en cada sitio de muestro, en donde también se registro número de plantas y numero de espigas por plantas, peso de grano y rendimiento corregido a 13% de humedad.

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.5.1 Estadística descriptiva

Para conocer características de la población muestreada se realizó un análisis de todas las variables mediante estadística descriptiva, utilizando el programa InfoStat. Fueron calculados los indicadores media, desvío estándar, coeficiente de variación, mínimo y máximo.

3.5.2 Análisis espacial

Para determinar la existencia de zonas de manejo fue removido el efecto tratamiento. Para ello se calculo un “residuo” en las variables cuyo resultado pudo ser modificado por los tratamientos, el cual mide la diferencia entre el valor observado en cada sitio y la media de cada tratamiento.

$${}^m r_{ij} = \frac{(Y_{ij} - \bar{Y}_{t(ij)})}{\bar{Y}_{t(ij)}}$$

Donde

${}^m r_{ij}$ = residuo normalizado de cada *ij* lugar

Y_{ij} = Valor observado de rendimiento de cada lugar *ij*

\bar{Y}_t = Rendimiento medio del tratamiento "t"

Se analizó la estructura espacial de esta nueva variable generada a partir de los rendimientos de trigo y maíz. También se analizó la estructura espacial de las observaciones obtenidas en los muestreos discretos, incluyendo rendimiento, % de carbono en el horizonte A, resistencia del suelo a la penetración y potasio intercambiable. Para ello fueron estimados semivariogramas para cada variable. La existencia de correlación espacial se definió utilizando la relación pepita/umbral, considerándose que la dependencia espacial es fuerte, moderada o débil cuando el cociente es menor a 0,25, entre 0,25 a 0,75 y mayor a 0,75 respectivamente (Cambardella et al., 1994).

Cuando existió correlación espacial fuerte o moderada, se interpolaron mapas utilizando la metodología de kriging ordinario (Best y León, 2006), y realizando una validación cruzada.

Los mapas interpolados se confeccionaron generando tres rangos de rendimiento establecidos por terciles. Rendimiento Alto (zona A), rendimiento medio (zona M) y rendimiento bajo (zona B).

3.5.3 Análisis de tablas de contingencia

Mediante un análisis de tablas de contingencia se estudió la concordancia entre las zonas pre-definidas "A", "B" y "D" y las construidas a partir del rendimiento de trigo ("At", "Mt" y "Bt") o maíz ("Am", "Mm" y "Bm") obtenidos de los monitores de rendimiento. Este análisis permite construir tablas de clasificación cruzada según diversos criterios de clasificación. Dichas tablas son útiles para el análisis simultáneo de dos o más variables categorizadas, en este caso serían las zonas de producción definidas

previamente por la empresa ADP y las zonas construidas a partir de los rendimientos de trigo y de maíz.

Se realizaron pruebas estadísticas de ajuste basadas en la distribución Chi cuadrado verificándose la relación entre las zonas definidas por la empresa y por el rendimiento obtenido de trigo y maíz. La asociación o concordancia entre los puntos categorizados por los dos métodos en la misma clase se observa por una mayor frecuencia absoluta conjunta. Según la cantidad de puntos de una zona que quedan dentro de la misma zona o no del otro cultivo (frecuencia absoluta) y el desvío respecto a lo esperado bajo independencia, se estudio que grado de coincidencia había entre las distintas zonas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

En la Figura No. 3 se presentan las precipitaciones del periodo comprendido entre mayo 2011 a junio 2012, comparado al promedio entre los años 1961 a 1990 para el mismo periodo.

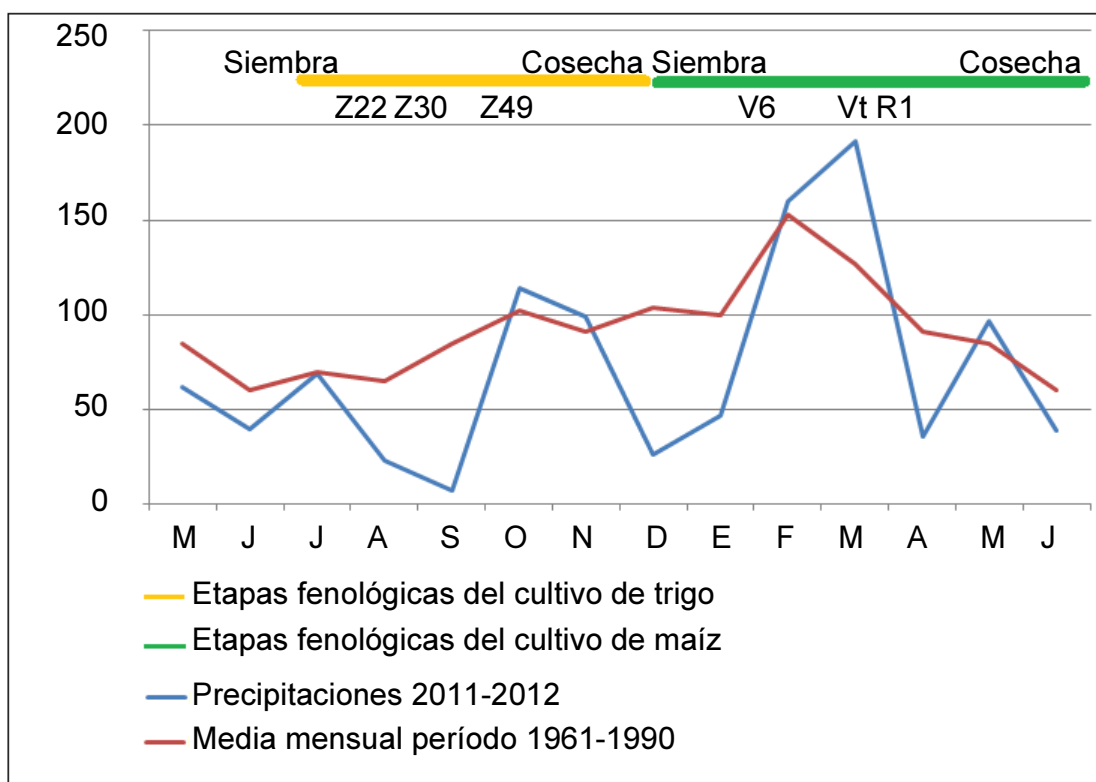


Figura No. 3 Precipitaciones durante el periodo mayo 2011- junio 2012 en relación al promedio 1961-1990 y etapas fenológicas de los cultivos de trigo y maíz

Las precipitaciones ocurridas durante la estación de crecimiento del trigo estuvieron por debajo de lo normal durante el periodo otoño-invierno y parte de la primavera (setiembre), comparado con la media mensual de los años 1961 a 1990. Las lluvias se normalizaron en el periodo octubre-noviembre. Estas condiciones son favorables para el cultivo, ya que le permite definir y concretar rendimientos altos (Ernst y Luizzi, 1987).

Con respecto al periodo siguiente verano-otoño, en los meses de diciembre a enero las precipitaciones fueron de escasas magnitud, lo que generó un déficit importante de agua en el suelo, seguido por un periodo febrero-marzo en donde las precipitaciones estuvieron por encima de lo normal.

Teniendo en cuenta que en verano el cultivo fue un maíz de segunda sembrado en diciembre, se puede decir que en el periodo de implantación y primeras etapas del cultivo presentó un déficit de agua hasta etapa fenológica V8. Luego en floración, su periodo crítico, (fines de febrero) comenzaron las lluvias abundantes, por encima de la media histórica, lo que determinó en gran parte el buen rendimiento del mismo.

4.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES

4.2.1 Descripción de todas las variables

Cuadro No. 5 Resumen de las variables relevadas

Variable	Media	D.E.	CV (%)	Mín.	Máx.
Rend. Trigo 2011 (Kg/ha)	4500	1017	22,6	1281	7251
Rend. Maíz 2012 (Kg/ha)	7068	1334	18	2918	11663
Resistencia del suelo (cm)	13	16	120	2	85
% de Humedad	25	3	12	17	36
% Carbono	2	0,5	20	1,1	3,2
pH(KCl)	4	0,65	13	4	6
A total (cm)	25	8,5	33	10	50
B total (cm)	34	16,5	47	0	79
Total suelo (cm)	60	17	28	25	105
Elevación (m)	26	3,7	14	19,6	33

El rendimiento medio de trigo fue 4500 kg, representando un rendimiento por encima del promedio nacional, con un coeficiente de variación del 22,6 %, un mínimo de 1281 kg y un máximo de 7251 kg indicando la existencia de variabilidad dentro de la chacra.

Con respecto al maíz el rendimiento medio fue 7068 kg con un coeficiente de variación del 18 %, un mínimo y un máximo de 2918 y 11663 kg

respectivamente lo que también representa, como en el caso del trigo la variabilidad presente dentro de la chacra.

También existió una gran variabilidad dentro de la chacra en las propiedades físicas y químicas del suelo. Según Kravchenco y Bullock (2000), estas características pueden explicar el 30% de la variación del rendimiento.

La variabilidad en los atributos del suelo y del terreno, profundidad del suelo (entre una máxima de 105 cm y un mínimo de 25 cm, con un coeficiente de variación de un 28 %); concentración de carbono orgánico (3% con un coeficiente de variación del 20%), altura, resistencia a la penetración, permite analizar su relación con las variables de respuesta (rendimiento de trigo y maíz).

4.2.2 Definición de zonas con distinta productividad

En el Cuadro No. 6 se presentan las zonas construidas utilizando el rendimiento de maíz obtenido de la cosecha manual.

Para cada zona de rendimiento Alto, Medio y Bajo (A, M y B) se agruparon la siguiente cantidad de puntos de muestreo, 86, 13 y 9 respectivamente, describiéndose estadísticamente las variables para cada una.

Cuadro No. 6 Rendimiento de maíz de segunda, según zonas diferenciadas de producción construidas por cosecha manual

Zona	Rendimiento	N	E.E.
A	7253 a	86	138
M	6690 ab	13	355
B	5854 b	9	427

N: número de sitios; EE: error experimental.

Los datos con la misma letra no presentan diferencias significativas según test de MDS de Fisher ($p < 0,05$).

Existieron diferencias significativas en rendimiento medio de maíz entre el promedio obtenido en el ambiente A y B, a su vez dichas zonas no se diferenciaron significativamente de la zona M de mediano potencial de rendimiento.

La diferencia entre la zona A y B fue de 1399 Kg/ha es decir un 24% superior.

Cuadro No. 7 Componentes de rendimiento de maíz según zonas construidas por cosecha manual

Zona	Rendimiento	No. Plantas/m	No. Espigas/m	Granos/ Espiga	PMG (gramos)
A	7253 a	2,7 a	3,6 a	327 a	347 a
M	6690 ab	2,6 a	3,4 ab	326 a	327 b
B	5854 b	2,5 a	3,1 b	324 ^a	316 b

PMG: Peso de mil granos.

Los datos con la misma letra no presentan diferencias significativas según test de MDS de Fisher ($p < 0,05$).

Las diferencias en rendimiento entre Zonas se asociaron a número de espigas por metro y el peso de mil granos (Cuadro No. 7), no existiendo diferencias en la población lograda ni el número granos por espiga.

4.2.3 Construcción de zonas utilizando los datos de rendimiento de maíz y trigo

Se realizó una nueva zonificación utilizando los datos de rendimientos obtenidos con los monitores de las cosechadoras (rendimiento, coordenadas X e Y y elevación) para la zafra de trigo 2011 y maíz 2012 (Figura No. 4, Cuadro No. 8).

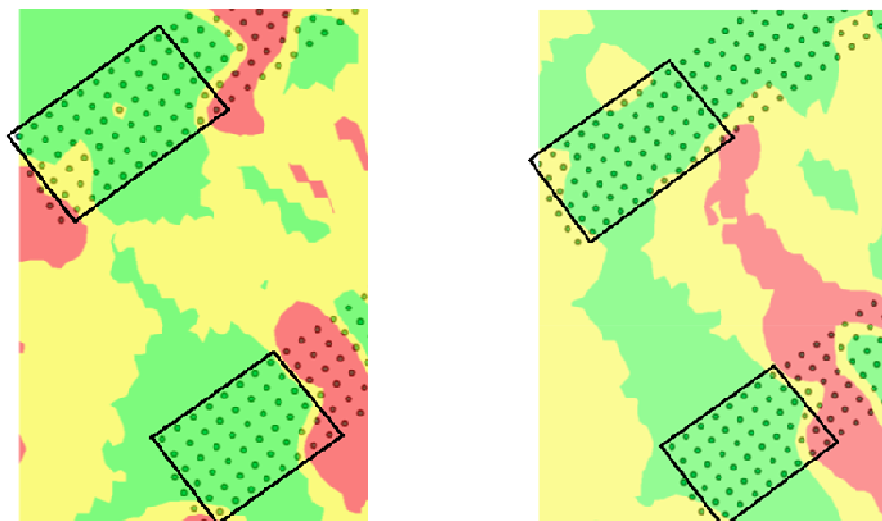


Figura No. 4 Mapas construidos en base a rendimiento de trigo 2011 y de maíz 2012

Se identificaron para cada cultivo tres zonas representadas por los colores: verde (Zona A, con rendimientos 17% sobre la media en el caso de maíz y 18% para trigo); amarillo (Zona M, con rendimiento entorno a la media); rojo (Zona B con producción 22,7% menor a la media para maíz y 21% para trigo).

En la Figura No. 4 se marcó con rectángulos los sitios en los que se realizaron las determinaciones de rendimiento en forma manual, componentes de rendimiento y determinaciones de suelo.

Cuadro No. 7 Rendimiento de trigo y maíz según zonas diferenciadas de producción construidas a partir de sus rendimientos

Ambiente	Rendimiento de trigo	Rendimiento de maíz
A	5329 a (120)	7542 a (123)
M	4631 b (171)	6661 b (151)
B	3512 c (115)	4975 c (132)

N: número de sitios; EE: error experimental.

Los datos con la misma letra en columnas no presentan diferencias significativas según test de MDS de Fisher ($p < 0,05$). Cabe aclarar que cada una de las columnas de rendimiento son independientes entre sí, es decir que la zona A de trigo es diferente de la zona A de maíz y así para las demás zonas.

Las diferencias en rendimiento obtenido de trigo y maíz entre las zonas definidas fueron significativas en ambos cultivos, siendo en maíz la zona A, 13,2% por encima de la zona M, y esta 25,4% por encima de la zona B.

En tanto, para trigo la zona A logró un rendimiento 15% superior a la zona M y la zona B un 24% inferior a la zona M.

4.3 COMPARACIÓN ENTRE AMBIENTES

Mediante el uso de tablas de contingencia, se procedió a analizar la concordancia entre las zonas creadas con los datos de rendimiento de trigo y maíz con los mapas de zonas pre-definidas (Cuadro No. 9 y No. 10).

Cuadro No. 9 Tabla de contingencia entre zonas construidas por rendimiento de maíz (filas) y zonas pre-definidas (columnas). Se presentan las frecuencias absolutas con los desvíos respecto a lo esperado bajo independencia entre paréntesis

Zona	A	B	D	Total
A _m	36(2.01)	77(10.20)	7(-12.21)	120.00(0.00)
M _m	44(-4.44)	118(22.81)	9(-18.38)	171.00(0.00)
B _m	35(2.43)	31(-33.01)	49(30.59)	115.00(0.00)
Total	115.00(0.00)	226.00(0.00)	65.00(0.00)	406.00(0.00)
Chi Cuadrado Pearson Valor 46.45				P <0.0001

Los resultados confirman la existencia de dependencia entre las zonas determinadas por rendimiento del cultivo de maíz, y las zonas pre-definidas.

Las zonas que mostraron mayor relación entre ambas clasificaciones fueron las de rendimiento medio y bajo siendo menor la asociación para las zonas de alto rendimiento.

La mayor concordancia ocurrió entre la zona B con la zona M_m y la B_m con la D dada la alta frecuencia que presentan con respecto al total dentro de cada zona, y desvíos altos con respecto a lo esperado bajo la condición de independencia. A su vez dentro de estas la mayor concordancia ocurrió en las zonas de menor productividad (B_m y D).

Similar fue el resultado utilizando el rendimiento de trigo (Cuadro No. 10).

Cuadro No. 8 Relación entre zonas construidas por rendimiento de trigo (filas) y zonas Pre-definidas (columnas). Se presentan las frecuencias absolutas con los desvíos respecto a lo esperado bajo independencia entre paréntesis

Zona	A	B	D	Total
A_t	42(7.16)	77(8.53)	4(-15.69)	123.00(0.00)
M_t	35(-7.77)	97(12.95)	19(-5.17)	151.00(0.00)
B_t	38(0.61)	52(-21.48)	42(20.87)	132.00(0.00)
Total	115.00(0.00)	226.00(0.00)	65.00(0.00)	406.00(0.00)

Chi Cuadrado Pearson Valor 46.45 P <0.0001

También existió relación entre ambas clasificaciones (p valor <0,0001), pero la mayor concordancia se encontró con las zonas Mt y Bt. Con respecto a las zonas A_t y A, a diferencia de lo ocurrido para maíz, la zonificación pre-definida sería capaz de predecir las zonas de mayor rendimiento de trigo.

Los resultados muestran que, utilizando la zonificación pre-definida existió capacidad de predecir las zonas de bajo rendimiento de maíz, no así las de alto rendimiento, por lo que sería una herramienta más útil para eliminar zonas que para elegir las mejores situaciones. En tanto, para trigo, sería útil tanto para eliminar las zonas de bajo rendimiento como para elegir las de mayor rendimiento en comparación con el maíz.

Cuadro No. 9 Tabla de contingencia entre zonas construidas por rendimiento de trigo (Columnas) y de maíz (Filas). Se presentan las frecuencias absolutas con los desvíos respecto a lo esperado bajo independencia entre paréntesis

Zona	A _(t)	M _(t)	B _(t)	Total
A_(m)	65(28.65)	34(-10.63)	21(-18.01)	120(0.00)
M_(m)	54(2.19)	75(11.40)	42(-13.60)	171(0.00)
B_(m)	4(-30.84)	42(-0.77)	69(31.61)	115(0.00)
Total	123(0.00)	151(0.00)	132(0.00)	406(0.00)

Chi Cuadrado Pearson Valor 92,92 P <0.0001

Existió una asociación significativa (p valor <0,0001) entre las zonas construidas utilizando el rendimiento de cada cultivo de manera independiente, registrándose una concordancia mayor en las zonas de alto y bajo rendimiento.

Para este caso podemos ver una mayor asociación entre las distintas zonas, no solo las de bajo rendimiento sino también entre las de rendimiento medio y alto, en comparación a los cuadros anteriores. Esto puede deberse a que el área donde se midieron los rendimientos de los cultivos fue la misma a diferencia de las comparaciones hechas contra las zonas pre-definidas, la cual cuenta con datos de toda la chacra, por lo que presenta una mayor variabilidad y otros parámetros a tener en cuenta a la hora de definir zonas de producción. A su vez las zonas pre-definidas toman en cuenta varios años de datos y la mayoría de los mismos son generados a partir de cultivo de soja. Y en este caso solo se comparan dos zafra consecutivas y en donde los dos cultivos tuvieron condiciones climáticas favorables.

A partir de estos resultados, se realizó una nueva zonificación por superposición de las zonas definidas por el rendimiento de cada cultivo de manera independiente (Cuadro No. 12) y se estudio la asociación entre la zonificación conjunta y la pre-definida.

Cuadro No. 10 Tabla de contingencia entre zonificación conjunta (filas) y zonas predefinidas (columnas). Se presentan las frecuencias absolutas con los desvíos respecto a lo esperado bajo independencia entre paréntesis

Zona	A	B	D	Total
A_(m,t)	21(2.59)	41(4.82)	3(-7.41)	65.00(0.00)
V_(m, t)	66(-11.33)	180(28.03)	27(-16.71)	273.00(0.00)
B_(m,t)	28(8.74)	5(-32.85)	35(24.11)	68.00(0.00)
Total	115.00(0.00)	226.00(0.00)	65.00(0.00)	406.00(0.00)

Chi Cuadrado Pearson Valor 105,38 P <0.0001

Como en los casos anteriores existe una relación entre ambas zonificaciones ($p < 0,0001$).

Al realizar una zonificación utilizando los dos cultivos, aumentó la cantidad de puntos en la zona denominada variable ($V_{m, t}$), para los cultivos de maíz y trigo. La mayoría de los puntos de la zona variable $V_{m,t}$ también están dentro de la zona pre-definida B (desvío =+ 28,03). También existió un desvío positivo (+24,1) con relación al comportamiento esperado bajo el supuesto de independencia para la zona $B_{m,t}$ con la zona D. En tanto, para la zona de alto rendimiento no existió asociación. Por tanto, los resultados confirman la

capacidad de identificar zonas de bajo rendimiento y la dificultad de identificar las de alto rendimiento para todos los cultivos de manera conjunta.

4.4 RENDIMIENTO DE MAÍZ Y TRIGO SEGÚN ATRIBUTOS EDÁFICOS Y TOPOGRÁFICOS

La relación entre zonas de productividad construidas a partir del rendimiento de trigo y algunas de las propiedades y atributos del terreno se muestran en el Cuadro No. 13.

Cuadro No. 13 Características edáficas y topográficas según zonas construidas a partir del mapa de rendimiento de trigo

Zona trigo	Profundidad del suelo (cm)	Resistencia a la penetración (cm)	Ph (H ₂ O)	% de carbono	Elevación del terreno
At	64 a	14,7 a	5,69 a	2,40 a	27,2 a
Mt	60,5 a	13,9 a	5,53 a	2,34 a	26,1 b
Bt	43,7 b	12,6 a	5,24 a	1,54 b	25,1 c

Las medias con la misma letra en columnas no presentan diferencias significativas según test de DMS de Fisher ($p < 0,05$).

La zona de menor rendimiento de trigo también se ubicó en zonas más bajas de la chacra (25 contra 27m de altura para Bt y At respectivamente). En ésta zona la profundidad del suelo fue significativamente menor a las otra dos, con una diferencia de 20,3 cm entre las zonas At y Bt. Por tanto se puede decir que una de las limitantes dentro de la zona B fue la profundidad del suelo con una profundidad de aproximadamente entre 17 y 20 cm menor en relación a las demás zonas.

En resistencia del suelo a la penetración no se presentaron diferencias significativas para las distintas zonas por lo que se puede afirmar que para el cultivo de trigo, en esas condiciones, esta no fue una limitante en la producción. En el caso de pH no hubo diferencias significativas ya que los rangos están muy cercanos a los valores óptimos para especies vegetales cultivadas (Havlin et al., 2005)

El % de carbono varió dentro de las distintas zonas presentando diferencias significativas entre las zonas At y la Bt. Posiblemente la distribución de la lluvia explique las diferencias en el peso relativo de la profundidad del suelo en definir las variaciones de rendimiento. Mientras que durante el período crítico de determinación del rendimiento de trigo existió un déficit de precipitaciones importante.

En la Figura No. 5 se puede ver la relación entre el rendimiento de trigo y la elevación del terreno. Si bien se observa una tendencia positiva ($b=55,87$) y con un $p<0,0001$ por lo que es significativa, el r^2 es de 0,04 por lo que se hace muy difícil su predicción en otras situaciones.

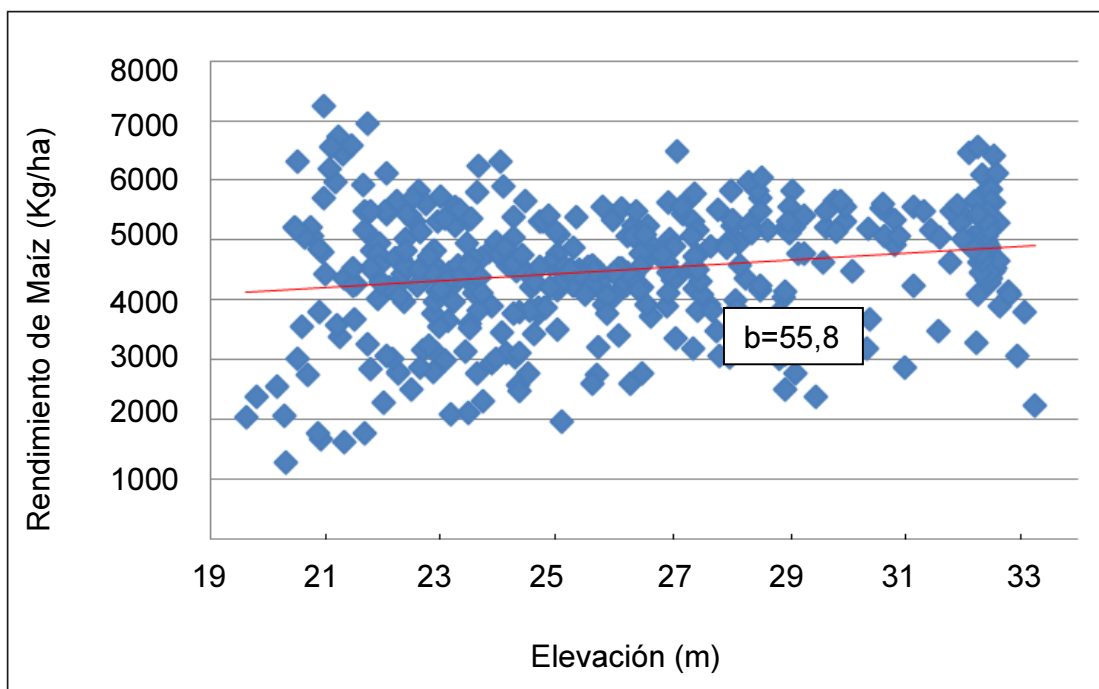


Figura No. 5 Rendimiento de trigo según elevación del terreno

En el Cuadro No. 14 se presenta los resultados del análisis de varianza para rendimiento, profundidad total del suelo, resistencia a la penetración, pH y % de carbono, para las zonas de producción definidas utilizando los datos obtenidos a partir de monitor de rendimiento por celdas de muestreo.

Cuadro No. 14 Rendimiento de maíz y propiedades edáficas y topográficas según zonas de producción construidas por rendimiento de maíz

Zona	Rendimiento de maíz (Kg/ha)	Profundidad del suelo (cm)	Resistencia a la penetración	Ph (H ₂ O)	% Carbono	Elevación del terreno
Am	7253 a	62,23 a	14 a	5,4 a	2,53 a	28,67 a
Mm	6690 ab	52,38 a	10,4 a	5,6 a	1,95 b	26,42 b
Bm	5854 b	53,67 a	16,5 a	5,8 a	1,48 c	23,06 c

Medias con la misma letra en columnas no presentan diferencias significativas según test DMS de Fisher ($p < 0,05$).

El rendimiento en grano de maíz, al igual que %C varió significativamente entre las zonas, pero no existieron diferencias significativas para la profundidad de suelo, ni en la profundidad a la cual se alcanzó el valor crítico de resistencia a la penetración, ni el Ph de los primeros 20 cm del perfil. La profundidad del suelo varió entre 25 cm a 105 cm (ver Cuadro No. 5), pero no se asoció con las zonas definidas por rendimiento. Esto sería consecuencia de que la profundidad del suelo varió sin un padrón espacial definido, por lo que no logró asociarse con el rendimiento.

No se observaron diferencias significativas entre las distintas zonas en la resistencia que ejerce el suelo a la penetración radicular, ya que el valor crítico establecido se alcanzó entre los 10 y 16 cm de profundidad en las tres zonas. Esto no permite establecer si esta propiedad no fue limitante o lo fue en todas las situaciones con igual magnitud. Para el caso del Ph del suelo, el óptimo para cultivo de maíz se encuentra en el rango entre 5,5 y 7,0, por lo que podría considerarse como no limitante Havlin et al. (2005).

Las zonas de productividad se ubicaron a distintas alturas en el terreno ($p < 0,0001$). Estudiando la asociación entre elevación y el rendimiento, se observó que los mayores rendimientos se encontraron en las partes más

elevadas de la chacra, y los menores rendimientos en zonas más bajas, si bien esta tendencia es significativa y positiva ($b=182$) su capacidad de extrapolar es baja ($R^2=0,26$) (Figura No. 6).

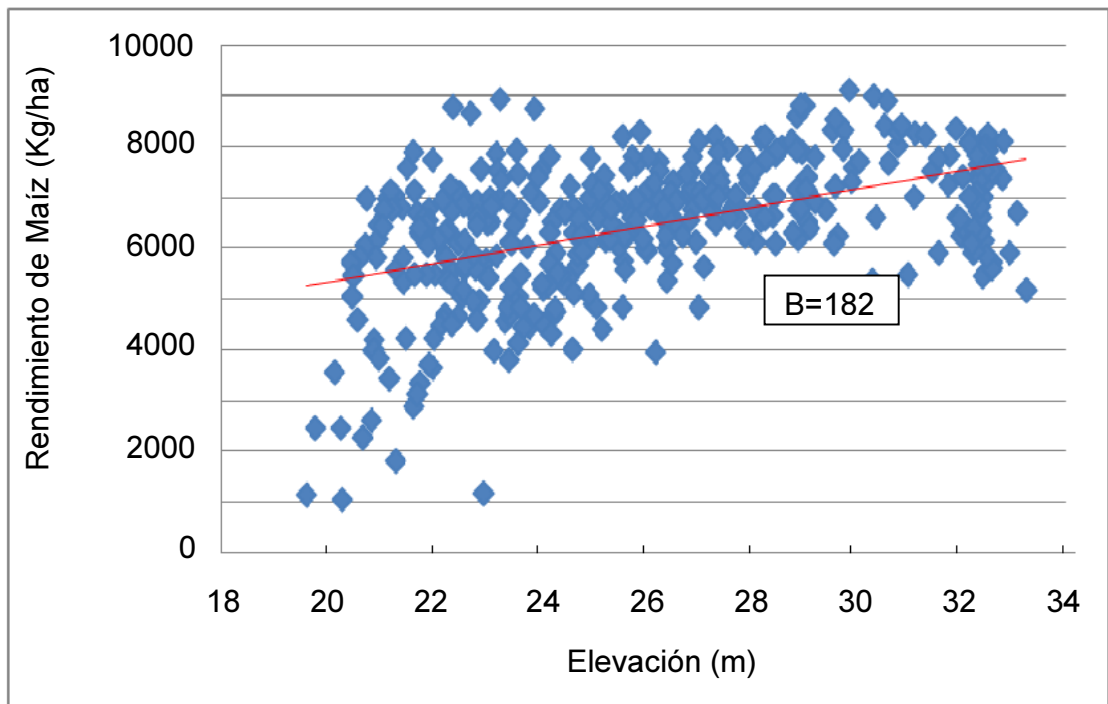


Figura No. 6 Análisis de regresión lineal del rendimiento de maíz según la elevación, calculada a partir de 406 pares de valores

Cabe destacar que a partir de elevaciones superiores a 22 metros comienzan a aumentar los pisos del rendimiento. De este modo se puede asociar alguna o algunas limitantes desde el punto de vista del suelo, a las partes más bajas de la chacra.

Al igual que López Lozano et al. (2007), atribuimos este comportamiento a la relación que hay entre la elevación del terreno y los tipos de suelo, siendo los bajos suelos tipo 03.51, los cuales poseen mayor contenido de arcilla, en comparación con los suelos 11.2, ubicados en las zonas elevadas, los que presentan mayores contenidos de limo. De esta forma la granulometría del suelo tiende a disminuir hacia las partes bajas de la chacra, y siendo que fue un verano con precipitaciones por encima de lo normal, estas

zonas presentaron problemas de encharcamiento por el pobre drenaje, lo que provoco disminuciones en el rendimiento.

Si bien el ajuste fue bajo, el resultado concuerda con lo citado por Terra (2010), quien atribuye que los atributos topográficos junto con los edáficos provocan la mayor variación de rendimientos de los cultivos, siendo la elevación una de las variables más frecuentemente correlacionadas al rendimiento y siendo el cultivo de maíz el más sensible en responder a las variaciones del terreno.

La relación encontrada con el % de carbono es coincidente con la cuantificada por Bosch y Lecueder (2011), en el cual, en los distintos ambientes previamente definidos también se encontraron diferencias entre las cantidades de carbono orgánico en el horizonte A, siendo los ambientes de mayor producción los que contaron con mayor cantidad de carbono.

En la Figura No. 7 se presenta la relación entre el rendimiento de maíz y él % de carbono en el horizonte A, esta tendencia general fue calculada a partir de 108 pares de valores, si bien es significativa ($p < 0,0001$ y $b = 1159$), el valor de r^2 es de 0,18 por lo que la capacidad de predecirla es baja.

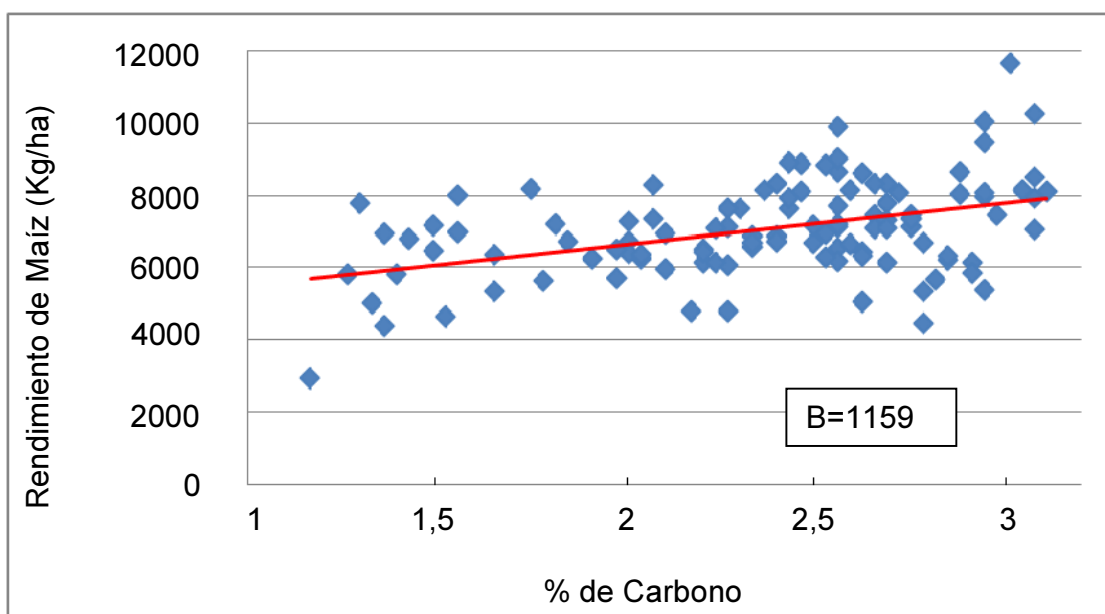


Figura No. 7 Rendimiento de maíz según % de carbono en el horizonte A

Cuadro No. 11 Zonificación de la chacra en base al contenido de carbono en el horizonte A

Zon	%	Rendimien	Profundidad	Resisten	Ph	K
a	Carbo	to de maíz	(cm)	cia (cm)	(h ₂ O)	(meq/10
	no	(kg/ha)				0g)
A	2,82 a	7578 a	62,2 a	23,23 a	5,84 a	0,73 a
M	2,42 b	7320 a	61 ab	11,1 b	5,42 b	0,62 b
B	1,91 c	6293 b	54,8 b	10,3 b	5,37 b	0,57 b

Las medias de zonas con la misma letra en columnas no presentan diferencias significativas según test de MDS de Fisher ($p < 0,05$).

En base a los datos del cuadro se puede decir que, para la chacra en estudio, el porcentaje de carbono en el horizonte A se relaciono positivamente con el rendimiento, (Cuadro No. 15), y también con las propiedades del suelo medidas en el experimento.

Cabe aclarar que dicha zonificación fue realizada a partir de la grilla de muestreo discreto la cual ocupa unos 108 puntos y un área de 9,72 has por lo que dichas asociaciones no son extrapolables a todo el resto de la chacra en donde se realizaron las zonificaciones a partir de los rendimientos sino que solo sería para ésta área.

A partir de la misma, se pudieron observar diferencias significativas entre las zonas de alta producción (A) y producción deficiente (D) no solo en rendimiento, sino también para profundidad del suelo, resistencia, a la penetración, ph y potasio.

5. CONCLUSIONES

La zonificación predefinida, y basada en varios años de análisis de datos, para el caso del trigo y del maíz de segunda en el periodo en estudio, fue buena en detectar las zonas de baja producción tanto en maíz como en trigo, concordando en un 65 y 75 % respectivamente, pero la capacidad de predecir las zonas de alto rendimiento fue menor, 36% en trigo y 31% en maíz.

La zonificación realizada a partir del rendimiento del cultivo de trigo, fue mejor que la zonificación predefinida en predecir las zonas de alto rendimiento para el cultivo de maíz, teniendo una concordancia del 53%, mientras que para las zonas media y baja la concordancia fue de 50% y 52% respectivamente.

Las propiedades edáficas y topográficas que se diferenciaron entre las distintas zonas fueron: % de carbono en el horizonte A y la elevación del terreno para el caso de los dos cultivos, mientras que para el caso del trigo la profundidad del suelo mostro diferencias entre las distintas zonas delimitadas por rendimiento.

Debido a la baja correlación entre el rendimiento de los cultivos de trigo y maíz con las propiedades edáficas y topográficas, no es posible afirmar que dichas asociaciones se puedan ajustar en cultivos siguientes.

Las zonas productividad definidas por % carbono se asociaron a atributos del suelo y topográficos permanentes e identificaron las distintas zonas de productividad de maíz.

6. RESUMEN

El crecimiento constante de la demanda mundial por alimentos y energía, ha generado un compromiso sobre la agricultura, de tener que producir más y de manera más eficiente. Si bien la expansión a nuevas áreas, es uno de los caminos hacia el aumento de la producción, el principal desafío es lograr aumentar la producción por unidad de superficie. Esto lleva a tener que conocer mejor cada hectárea dentro de la chacra y de ese modo tener en cuenta su variabilidad espacial para optimizar recursos y levantar sus restricciones. Una de las herramientas para llevar esto a cabo es la agricultura de precisión la cual se basa en un manejo diferenciado según las distintas zonas de producción en la chacra. Este trabajo tiene como objetivo estudiar la variabilidad existente dentro de la chacra mediante la utilización de mapas de rendimiento y verificar de que manera pueden ayudar o no en predecir el comportamiento del siguiente cultivo en las distintas zonas. El trabajo de campo se realizó en una chacra con 3 ambientes predefinidos por la empresa ADP: ambiente A de alto potencial, ambiente B de potencial variable, ambiente D de potencial deficiente. A su vez mediante información generada por monitores de rendimiento de trigo y maíz de segunda, se realizó una nueva zonificación para cada uno de estos cultivos. Luego utilizando tablas de contingencia se realizó la comparación entre las zonas predefinidas y las zonas definidas mediante los monitores de rendimiento, para determinar la concordancia entre estas y observar con que grado pueden predecir el comportamiento de los cultivos. Para el caso de la zonificación realizada por ADP, la misma predijo de mejor manera las zonas más deficientes de la chacra, tanto para maíz como para trigo, pero la capacidad de predecir las zonas de alto rendimiento fue menor. En cambio la zonificación realizada a partir de los datos de monitor de rendimiento de trigo predijo de mejor manera lo que sucedería con el comportamiento del maíz en este año en particular. Por otro lado mediante el uso de una grilla de muestreo georeferenciados que abarcaba las distintas zonas de producción, se procedió a analizar cuáles eran las variables edáficas, químicas, físicas y topográficas que generan dicha variabilidad. Para el caso del maíz la elevación y el porcentaje de carbono fueron las más relacionadas y para el caso del trigo el porcentaje de carbono y la profundidad del suelo.

Palabras clave: Variabilidad; Zonas de producción; Mapa de rendimiento.

7. SUMMARY

The steady growth in the global demand for food and energy has generated a commitment to increase agriculture production and the efficiency as well. Even knowing that the expansion to new areas is considered a solution to boost production, the main challenge is to increment production per unit of area. This leads to better know each hectare within the farm and thus take into account the variability to optimize resources as well as lift its restrictions. To accomplish this, the precision agriculture is used based on an outstanding management according to the different areas of production in the farm. This thesis aims to study the variability within the farm using yield maps and verify how it can help or not to predict the behavior of the next crop in different areas. The fieldwork was carried out on a farm with three environments predefined by ADP Company: environment A with high potential, environmental B with variable potential, environment D with deficient potential. Also, by using a monitor of wheat and corn performance a new zoning was made for each crop. Later on, using contingency tables predefined areas were compared with areas defined by performance monitors to determine the correlation and observe how certain could it be to predict the crops behavior. In one hand, according to the zoning made by ADP, the deficient areas for wheat and corn were better predicted, otherwise, the high performance areas were worst predicted. On the other hand, zoning based on the performance monitor data predicted more efficiently the corn behavior, particularly this year. Furthermore, by using a grid of georeferenced sampling, which covers different areas of production, it was proceeded to analyze the edaphic, chemical, physical and topographical variables that lead to the variability. In the case of corn, the carbon height and percentage were the most related variables, while in the case of the wheat the most associated were the carbon percetage and the soil depth.

Keywords: Variability; Production area; Yield map.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. AHUNCHAIN, M.; KLAASSEN, M. 1990. Causas de variabilidad de rendimiento en Trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 165 p.
2. BARRIOS, M. B.; BOZZO, A. A.; DEBELIS, S. P.; PEREYRA, A. M.; BUJÁN, A. 2006. Soil physical properties and root activity in a soybean second crop/maize rotation under direct sowing and conventional tillage. Buenos Aires, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 355-362.
3. BEST, S.; LEÓN, L. 2006. Geoestadística. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 147-161.
4. BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. 2006a. Adopción de la agricultura de precisión en el cono sur de América. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 201-209.
5. _____; MÉNDEZ, A.; SCARAMUZZA, F.; PROIETTI, F. 2006b. Monitoreo de rendimiento y elaboración de mapas. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 43-52.
6. BOSCH, F.; LECUEDER, F. 2011. Relación entre el rendimiento de soja de segunda y la variación espacial de los atributos edáficos dentro de una misma chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 66 p.

7. BOSSI, J.; FERRANDO, L.; MONTAÑA, J.; CAMPAL, N.; MORALES, M.; GANCIO, F.; SCHIPILOV, A.; PIÑEYRO, D.; SPRECHMANN, P. 1998. Carta geológica del Uruguay; version 1.0 digital. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. Escala 1/500000.
8. CRESSIE, N. 1993. Statistics for spatial data. New York, Willey International. 900 p.
9. DEL CAMPO, B. 2007. Factores que afectan la variabilidad intra chacra del rendimiento de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 77 p.
10. ERNST, O.; SIRI, G. 2011. La agricultura en el Uruguay, su trayectoria y consecuencias. In: Simposio Nacional de Agricultura (2º, 2011, Paysandú). No se llega, si no se sabe a dónde ir. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 149-163.
11. _____.; LUIZZI, V. 1987. Alternativas tecnológicas para la producción de trigo. Paysandú, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. 37 p.
12. GIRALDO HENAO, R. 2002. Introducción a la geoestadística; teoría y aplicación. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Estadística. 17 p.
13. GRUPO INFOSTAT. 2010. Manual del usuario; versión 2010e. Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. pp. 149-160.
14. GUBIANIA, P. I.; REICHERT, J. M.; DA LVAN, J. R.; SOMAVILLA GELAIN, N. 2010. Soil resistance to penetration under the dynamic and predictive perspective of restriction to crop yield. Brisbane, Australia, RS, Federal University of Santa Maria (UFSM). Soils Department. pp. 161-164.
15. HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. 2005. Soil acidity and alkalinity. In: Simposio Nacional de Agricultura (3º, 2013, Paysandú). No se llega, si no se sabe a dónde ir. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 81-82.

16. KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D. 2000. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*. 92(1): 75-83.
17. LÓPEZ LOZANO, R.; CASTERAD, M. A.; HERRERO-ISERN, J. 2007. Relación entre desarrollo del cultivo, rasgos edáficos y rendimiento en una parcela de maíz mediante teledetección y SIG. Zaragoza, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA). pp.24-31.
18. MAHL, D.; BARBOZA DA SILVA, R.; GAMERO, C.A; ARBEX SILVA, P. R. 2008. Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal e produtividade do milho em plantio direto escarificado. *Maringá*. 30: 741-747.
19. MANTOVANI, E.; DE CARVALHO PINTO, F. de A.; MARÇAL DE QUEIRO, D. 2006. Introducción a la agricultura de precisión. *In*: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 13-22.
20. ÖZGÖZ, E.; KASAP, A. 2007. Management effect on soil characteristics and yield in secon crop corn grown. Tokat, Turkey, University of Gaziosmanpasa. Faculty of Agriculture. Departament of Agricultural Machinery. pp. 592-598
21. PLANT, R. E. 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 30:9-29.
22. ROEL, A.; TERRA, J. 2006c. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. *In*: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 67-79.
23. SÁNCHEZ, J. D. T.; LIGARRETO, G. A.; LEIVA, F. R. 2011. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo y su efecto sobre el rendimiento del cultivo; estudio de caso en maíz (*Zea mays* L.) para choclo en la Sabana de Bogotá. Bogotá, Universidad Nacional de

Colombia. Facultad de Agronomía. Departamento de Agronomía. pp. 265-274.

24. TERRA, J.; MELO, D.; SAWCHIK, J. 2010. Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimiento de cultivos agrícolas en Uruguay. In: Reunión Técnica (1ª, 2010, Colonia del Sacramento, Colonia, Uruguay). Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Montevideo, Sociedad Uruguaya de Ciencias del Suelo/International Soil and Tillage Research Organization. pp. 7-17.
25. URUGUAY. MDN. DNM. 1990. Estadísticas climatológicas. Gráficas estadísticas pluviométricas. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 15 ago. 2012. Disponible en <http://meteorologia.gub.uy/index.php/estcli>.
26. _____. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. PRENADER. 2010. Cartografía de suelos CONEAT. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 15 set. 2012. Disponible en <http://www.prenader.gub.uy/coneat/viewer.htm?Title=CONEAT%20Digital>